

# 4H-EC3ST Stabilität

## Detailinformationen

Seite bearbeitet Juli 2024

[Kontakt](#) 
[Programmübersicht](#) 
[Bestelltext](#) 

### Infos auf dieser Seite

[... als pdf](#) 

- [Nachweise/Profildaten](#) 
- [System](#) 
- [Drehbettung](#) 
- [Nachweise Brandfall](#) 
- [Bemessungsschnittgrößen](#) 
- [Ausnutzungen](#) 
- [Querschnittsklassifizierung](#) 
- [Drehfeder- / Schubfeldsteifigkeit](#) 
- [Nachweis Biegeknicken](#) 
- [Nachweis Biegedrillknicken](#) 
- [Stabilität im Brandfall](#) 
- [Beispiele](#) 

### Nachweise, Material, Querschnitt



die Wahl der Nachweise und der Profildaten erfolgt im Registerblatt *Nachweise, Material, Querschnitt*.

4H-EC3 - Stabilität [Position 64: Hilfe - Bsp.1]

4H-EC302

#### Nachweise

- Standard EN 1993-1-1, 6.3
- Brandfall EN 1993-1-2, 4.2
- Querschnittsklasse 1 (PL-PL)
- Querschnittsklasse 2 (EL-PL)
- Querschnittsklasse 3 (EL-EL)
- kleinstmögliche Querschnittsklasse
- c/t-Nachweis
- Spannungsnachweis am Stabende
- Biegeknicken nur N
  - einschl. Drillknicken
  - Knicken um die y-Achse
  - Knicken um die z-Achse
- Biegedrillknicken
  - Nachweis My
  - Nachweis N+My
  - Nachweis N+My+Mz
  - Interaktion Gl. (6.61)
  - Interaktion Gl. (6.62)

#### Stahlgüte

S355 (S152)

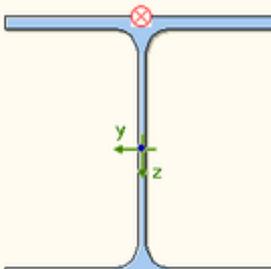
#### Materialsicherheit genormt

Querschnitte	$\gamma_{M0}$	1.00
Stabilität	$\gamma_{M1}$	1.10

#### Querschnitt



Bezeichnung: HE300A



verdrehsteif     verdrehweich  
 ein Stabende verschieblich

#### Lastangriffspunkt (Biegedrillknicken)

- Trägeroberkante
- Schubmittelpunkt
- Schwerpunkt
- Trägerunterkante
- vorgeben bzgl. S:

- Trägerkante links
- Schubmittelpunkt
- Schwerpunkt
- Trägerkante rechts
- vorgeben bzgl. S:

$z_p$  -145 mm       $y_p$  0 mm

#### Knicklinien

y-Knicklinie (EC3 Tab. 6.2)

z-Knicklinie (EC3 Tab. 6.2)

BDK-Knicklinie (EC3 Tab. 6.5)

[Bild vergrößern](#) 

### Nachweise

- Standard EN 1993-1-1 6.3
- Brandfall EN 1993-1-2 4.2

Zunächst ist festzulegen, ob der klassische Stabilitätsfall (bei Raumtemperatur) vorliegt oder die Festigkeiten durch eine erhöhte Querschnittstemperatur (im Brandfall) herabgesetzt sind.

Die nachfolgende Beschreibung, insbesondere der Normenbezug, betrifft den Standardfall. Die Nachweisführung im Brandfall wird im Kapitel **Nachweise im Brandfall** beschrieben.

- Querschnittsklasse 1 (PL-PL)
- Querschnittsklasse 2 (EL-PL)
- Querschnittsklasse 3 (EL-EL)
- kleinstmögliche Querschnittsklasse
- c/t-Nachweis

Für Nachweise der Tragfähigkeit werden die Querschnitte gemäß EC 3-1-3, 5.5 in Querschnittsklassen eingeteilt.

Die Klassifizierung dient der Begrenzung der Beanspruchbarkeit und Rotationskapazität durch lokales Beulen von Querschnittsteilen.

Im Programm kann die Querschnittsklasse vorgegeben oder es kann die kleinstmögliche Klasse vom Programm berechnet werden.

In Abhängigkeit davon werden die Nachweise entweder mit den elastischen oder plastischen Kennwerten geführt.

Die Querschnittsklassen 1 und 2 können die plastischen Tragreserven ausnutzen, während in Querschnittsklasse 3 die elastischen Tragfähigkeiten angesetzt werden.

Nachweise in Klasse 4 sind nicht möglich.

Optional kann ein 'Nachweis' geführt und damit eine Ausnutzung berechnet werden, in der Art, dass der vorhandene c/t-Wert ins Verhältnis zum geforderten c/t-Wert gesetzt wird.

Das Ergebnis wird unabhängig von den Tragfähigkeitsnachweisen ausgewiesen.

- Spannungsnachweis

Nach EC 3-1-1, 6.3.3(2), sind zusätzlich zu den Stabilitätsnachweisen Querschnittsnachweise an den Bauteilenden zu führen. Diese können zugeschaltet und in die Gesamttragfähigkeit einbezogen werden.

- Biegeknicke nur N
  - einschl. Drillknicken
  - Knicken um die y-Achse
  - Knicken um die z-Achse

Es kann ein Biegeknicknachweis nach dem Ersatzstabverfahren in EC 3-1-1, 6.3.1, mit reiner Normalkraftbeanspruchung gewählt werden.

Optional kann zusätzlich der Drillknicknachweis nach EC 3-1-1, 6.3.1.4, geführt werden.

Das Knicken kann um die starke (y-) und/oder die schwache (z-) Achse erfolgen.

- Biegedrillknicken
  - Nachweis  $M_y$
  - Nachweis  $N+M_y$
  - Nachweis  $N+M_y+M_z$
  - Interaktion Gl. (6.61)
  - Interaktion Gl. (6.62)

Es kann ein Biegedrillknicknachweis n. EC 3-1-1, 6.3.2, gewählt werden. Tritt Biegung mit Druck auf, wird die Tragfähigkeit über die Interaktionsbeziehung n. EC 3-1-1, 6.3.3 (4), nachgewiesen.

Die Interaktionsgleichungen können separat ausgewertet werden.

### Stahlgüte

- S235 (St37)
- S235 (St37)
- S275 (St44)
- S355 (St52)
- S420 N/NL
- S460 N/NL
- freies Material

Die zu verwendende Stahlgüte wird per Listbox gewählt.

freies Material

$E_{mod}$	210000	N/mm <sup>2</sup>
$f_{y,k}$	235	N/mm <sup>2</sup>

Bei Wahl eines **freien Materials** werden die benötigten Festigkeitsparameter direkt vorgegeben.

Diese Werte entsprechen den Festigkeiten bei Normaltemperatur und werden bei der Berechnung im Brandfall abgemindert.

### Materialsicherheitsbeiwerte

**Materialsicherheit** ( genormt)

Querschnitte	$\gamma_{M0}$	1.00
Stabilität	$\gamma_{M1}$	1.10
Brandfall	$\gamma_{M,fi}$	1.00

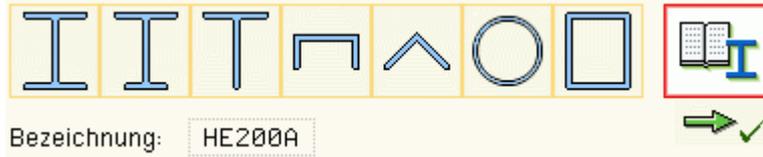
Im Programm 4H-EC3ST werden die in EC 3-1-1 (Standard) bzw. EC 3-1-2 (Brandfall) gegebenen Materialsicherheitsbeiwerte verwendet.

Die Werte werden entweder den entsprechenden Normen (s. **Nationaler Anhang**) entnommen oder vom Anwender vorgegeben.

Im Brandfall gilt  $\gamma_{M0} = \gamma_{M1} = \gamma_{M,fi}$ .

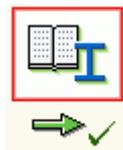
**Querschnitt**

Der Nachweis für Biegeknicken kann für einfach- und doppelsymmetrische Querschnitte geführt werden.



Die ersten drei Profile sind geschweißte Blechträger.

Die übrigen Profile sind Walzprofile, deren Parameter und Name frei festgelegt werden.



Alternativ können Standardwalzprofile aus dem **pcae**-eigenen **Profilmanger** übernommen werden.

Um ein Profil aus dem Angebot des Profilmangers zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu betätigen.

Das externe Programm wird aufgerufen und ein Profil kann aktiviert werden. Bei Verlassen des Profilmangers werden die benötigten Daten übernommen und der Profilname protokolliert.

Für den Nachweis *Biegeknicken* sind alle vorhandenen Profiltypen erlaubt.

Für den Nachweis *Biegedrillknicken* kann nur das doppelsymmetrische Doppel-T-Profil verwendet werden.

Weitere Querschnitts-Optionen

**Biegeknicken**

- warmgefertigt
- kaltgefertigt

Hinsichtlich der Knicklinien wird bei Hohlprofilen zwischen warmgefertigten und kaltgeformten Querschnitten unterschieden (nicht bei Profilen aus der Bibliothek).

**Biegedrillknicken**

- verdrehsteif
- verdrehweich
- ein Stabende verschieblich

Zur Berechnung der Interaktionsbeiwerte wird zwischen verdrehweichen (offene Querschnitte ohne Drehbehinderung) und verdrehsteifen (ausgesteifte Querschnitte) Profilen differenziert.

Die Berechnungsformeln im EC 3-1-1, Anh. B, beziehen sich auf eine beidseitig gelenkige Lagerung des Stabbauteils. Es besteht die Möglichkeit, auch ein verschiebliches Stabende zu berücksichtigen.

- |  |  |
|--|--|
| <input checked="" type="radio"/> Trägeroberkante | <input type="radio"/> Trägerkante links      |
| <input type="radio"/> Schubmittelpunkt           | <input type="radio"/> Schubmittelpunkt       |
| <input type="radio"/> Schwerpunkt                | <input checked="" type="radio"/> Schwerpunkt |
| <input type="radio"/> Trägerunterkante           | <input type="radio"/> Trägerkante rechts     |
| <input type="radio"/> vorgeben bzgl. S:          | <input type="radio"/> vorgeben bzgl. S:      |
| $z_p$ -100 mm                                    | $y_p$ 0 mm                                   |

Bezogen auf den Schubmittelpunkt hat der Angriffspunkt der Last günstige oder ungünstige Auswirkungen auf das Biegedrillknicken.

Der Einfluss der Lastexzentrizität wird über die Eingabe des Lastangriffspunkts [ $y_p$ ,  $z_p$ ] erfasst.

Der Punkt wird in der maßstäblichen Profilskizze markiert.

**Knicklinien**

Der Schlankheitsgrad des Bauteils richtet sich nach der zuständigen

y-Knicklinie (EC3 Tab. 6.2)

autom. ▼

z-Knicklinie (EC3 Tab. 6.2)

autom. ▼

BDK-Knicklinie (EC3 Tab. 6.5)

autom. ▼

Knicklinie in Abhängigkeit des Querschnitts.

Die Knicklinien für das Biegeknicken oder Biegedrillknicken können entweder vom Programm nach Norm bestimmt oder vom Anwender festgelegt werden.

## System



die Angaben über die Lagerung und die Stablängen erfolgen im Registerblatt *System*.

**System**

6.00  
Ansicht

Draufsicht

Längeneingabe in [m]

---

**Zwischenlager**

z-Richtung:       y-Richtung:

---

**Knicklängenbeiwerte  $\beta$**

⊥ y-Achse:  $\beta_y$  :

⊥ z-Achse:  $\beta_z$  :

---

**Wölbeinspanngrad**

$\beta_0$  :      Berechnen aus Stirnplattensteifigkeit

Stirnplattenbreite  $b_{Stirn}$  :  mm

Stirnplattendicke  $t_{Stirn}$  :  mm

$G_{Stirn}$  :  N/mm<sup>2</sup>

Bild vergrößern

### Systemlänge

Die Gesamtlänge  $L$  des knick- oder biegedrillknickgefährdeten Stabs wird in das Eingabefeld in der Maßkette eingegeben. Die Stabenden (Stabanfang und -ende) sind gabelgelagert.

6.00  
Ansicht

Draufsicht

Längeneingabe in [m]

### Zwischenlager

In y- und/oder z-Richtung können Zwischenlager (ebenfalls mit Gabelagerung) angeordnet werden, die zum einen die Knicklänge in der jeweiligen Richtung reduzieren, zum anderen der Seitenstabilität (s. [Reg. 3](#)) dienen.

Die Zwischenlager werden in der Systemgrafik dargestellt.

**Zwischenlager**

z-Richtung:       y-Richtung:

## Knicklängenbeiwerte

Die Knicklängenbeiwerte  $\beta$  sind in y- und z-Richtung vorzugeben; sie beeinflussen die Knicklänge  $L_{cr} = \beta \cdot L$ .

Sie können entweder über ein Symbol oder 'per Hand' festgelegt werden.

$\beta_y$  gilt für Knicken um die starke (y-) Achse,  $\beta_z$  für Knicken um die schwache (z-) Achse.

Knicklängenbeiwerte $\beta$						
1 y-Achse:	$\beta_y$ :	<input type="text" value="1.500"/>				
1 z-Achse:	$\beta_z$ :	<input type="text" value="1.000"/>				

## Wölbeinspanngrad

Der Wölbeinspanngrad  $\beta_0$  kann vorgegeben oder aus der Stirnplattensteifigkeit (nur bei Doppel-T-Profilen) berechnet werden.

$\beta_0 = 1$  entspricht einer Gabellagerung,  $\beta_0 = 0.5$  einer starren Wölbeinspannung.

Wölbeinspanngrad	
$\beta_0$ :	<input type="text" value="0.938"/> <input checked="" type="checkbox"/> Berechnen aus Stirnplattensteifigkeit
Stirnplattenbreite $b_{Stirn}$ :	<input type="text" value="170.0"/> mm
Stirnplattendicke $t_{Stirn}$ :	<input type="text" value="10.0"/> mm
$G_{Stirn}$ :	<input type="text" value="81000"/> N/mm <sup>2</sup>

## Drehelastische Lagerung am Obergurt des Trägers



eine evtl. vorhandene Drehbettung des Trägers kann im Registerblatt *Drehelastische Lagerung* gewählt werden.

Die Gefahr des Biegedrillknickens eines Doppel-T-Profiles kann durch die Anordnung einer Drehbettung am Druckgurt (Obergurt) erheblich reduziert werden.

Dazu zählen Trapezbleche, die gleichzeitig als Dacheindeckung fungieren oder auch in gleichmäßigen Abständen angebrachte Querträger.

Trapezbleche können durch ihre Schubfeldsteifigkeit das Biegedrillknicken u.U. sogar gänzlich verhindern.

Auf der sicheren Seite liegend werden für die Bemessung im Brandfall die Zusatzsteifigkeiten durch die drehelastische Lagerung am Obergurt vernachlässigt.

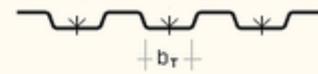
## Trapezbleche

**Drehelastische Lagerung am Obergurt des Trägers**

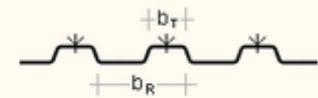
keine Drehbettung  
  Trapezbleche  
  Trapezbleche mit Setzbolzen  
  Querträger  
  Vorgabe der Kennwerte

Nr	Lage der Trapezbleche		Befestigung am		Abstand der Befestigungen		Scheibendurchmesser mm	C <sub>100</sub> kNm/m	b <sub>T,max</sub> mm
	positiv	negativ	Untergurt	Obergurt	b <sub>R</sub>	2 b <sub>R</sub>			
Bei Auflast									
1	x		x		x		22	5,2	40
2	x		x			x	22	3,1	40
3		x		x	x		Ka	10,0	40
4		x		x		x	Ka	5,2	40
5		x	x		x		22	3,1	120
6		x	x			x	22	2,0	120
Bei abhebender Last									
7	x		x		x		16	2,6	40
8	x		x			x	16	1,7	40

Befestigung am Untergurt des Trapezblechs



Befestigung am Obergurt des Trapezblechs



'Ka' steht für eine Stahldeckplatte t ≥ 0,75 mm. Die Werte gelten für Schrauben ϕ = 6,3 mm mit Unterlegscheiben aus Stahl t ≥ 1,0 mm.

A :  kN/m (Auflast, die zwischen Blech und Träger wirkt)  
 s :  m (Stützweite des Trapezblechs)  
 n :  Anzahl Schubfelder (L<sub>S</sub> = 4.000 m)

Trapezblech  Vorgabe

Hoesch :   
 t<sub>nom</sub> :  mm  
 E<sub>mod</sub> :  N/mm<sup>2</sup>  
 I<sub>eff</sub> :  cm<sup>4</sup>/m  
 b<sub>R</sub> :  mm  
 b<sub>T</sub> :  mm  
 K<sub>1</sub> :  m/kN  
 K<sub>2</sub> :  m<sup>2</sup>/kN

Drehfedersteifigkeit

C<sub>D,A</sub> :  kNm/m  
 C<sub>D,B</sub> :  kNm/m  
 C<sub>D,C</sub> :  kNm/m  
 C<sub>D</sub> :  kNm/m

Schubfeldsteifigkeit

G<sub>S</sub> :  kN/m  
 S :  kN

Drehfedersteifigkeit

- C<sub>D,B</sub> Berechnung nach EN 1993-1-3
- C<sub>D,B</sub> Berechnung nach Wagenknecht
- C<sub>D,C</sub> Endfeld und entgegengesetzte Verdrehung der Träger bzw. Endfeld bei nur einem Träger
- C<sub>D,C</sub> Innenfeld und entgegengesetzte Verdrehung der Träger bzw. Innenfeld bei nur einem Träger
- C<sub>D,C</sub> Endfeld und gleichsinnige Verdrehung der Träger
- C<sub>D,C</sub> Innenfeld und gleichsinnige Verdrehung der Träger

Schubfeldsteifigkeit

Check, ob Biegedrillknicken erforderlich

Befestigung in Sonderausführung

Bild vergrößern

**Drehfedersteifigkeit**

Die Drehfedersteifigkeit C<sub>D</sub> berechnet sich aus den drei Steifigkeitsanteilen C<sub>D,A</sub> der Verbindung zwischen Trapezblech und Träger, C<sub>D,B</sub> der Profilverformung des Trägers, C<sub>D,C</sub> des Trapezblechs.

Für die Berechnung der Steifigkeit der Verbindung zwischen Trapezblech und Träger C<sub>D,A</sub> ist in der angegebenen Tabelle die betreffende Zeile zu markieren.

Nr	Lage der Trapezbleche		Befestigung am		Abstand der Befestigungen		Scheibendurchmesser mm	C <sub>100</sub> kNm/m	b <sub>T,max</sub> mm
	positiv	negativ	Untergurt	Obergurt	b <sub>R</sub>	2 b <sub>R</sub>			
Bei Auflast									
1	x		x		x		22	5,2	40
2	x		x			x	22	3,1	40
3		x		x	x		Ka	10,0	40
4		x		x		x	Ka	5,2	40
5		x	x		x		22	3,1	120
6		x	x			x	22	2,0	120
Bei abhebender Last									
7	x		x		x		16	2,6	40
8	x		x			x	16	1,7	40

**Trapezbleche mit Setzbolzen** können nicht am Obergurt des Trapezblechs befestigt werden. Daher wird eine entsprechend angepasste Tabelle angeboten.

Nr	Lage der Profilbleche		Befestigung am		Abstand der Befestigungen		C <sub>100</sub> kNm/mm positiv	b <sub>T,max</sub> mm negativ
	positiv	negativ	Untergurt	Obergurt	b <sub>R</sub>	2 b <sub>R</sub>		
Bei Auflast								
1	x		x		x		4,0	40
2	x		x			x	3,1	40
5		x	x		x		3,1	120
6		x	x			x	2,0	120

Die Lage (positiv/negativ), der Befestigungsort (Untergurt/Obergurt) und der Abstand der Befestigungen (b<sub>R</sub>/2·b<sub>R</sub>) sind

bei der Konstruktion zu berücksichtigen.

Bei Auflast ist die Last, die zwischen Trapezblech und Träger wirkt, anzugeben ( $A \leq 12 \text{ kN/m}$ ).

Außerdem ist das Trapezblech auszuwählen.

Trapezblech <input type="checkbox"/> Vorgabe	
Hoesch :	T 40.1
$t_{\text{nom}}$ :	1.25 mm
$E_{\text{mod}}$ :	210000 N/mm <sup>2</sup>
$I_{\text{eff}}$ :	44.10 cm <sup>4</sup> /m
$b_R$ :	183.0 mm
$b_T$ :	40.0 mm
$K_1$ :	0.137 m/kN
$K_2$ :	2.950 m <sup>2</sup> /kN
<input type="checkbox"/> Befestigung in Sonderausführung	

In der programminternen Datenbank sind Trapezprofile der Fa. Hoesch hinterlegt.

Die Auswahl erfolgt über eine Listbox.

Bei Aktivierung der Option **Vorgabe** können die benötigten Parameter 'per Hand' eingegeben werden.

Die Berechnung der Drehbettung aus der Profilverformung des Trägers  $C_{D,B}$  kann entweder nach Eurocode oder Wagenknecht erfolgen.

- $C_{D,B}$  Berechnung nach EN 1993-1-3
- $C_{D,B}$  Berechnung nach Wagenknecht

Zur Berechnung der Profilverformung des Trapezblechs  $C_{D,C}$  ist die Lagerung des oder der Träger (Endfeld/Innenfeld) sowie bei Anordnung mehrerer Träger die Verdrehungsrichtung der Trägerprofile zueinander zu beachten.

- $C_{D,C}$  Endfeld und entgegengesetzte Verdrehung der Träger bzw. Endfeld bei nur einem Träger
- $C_{D,C}$  Innenfeld und entgegengesetzte Verdrehung der Träger bzw. Innenfeld bei nur einem Träger
- $C_{D,C}$  Endfeld und gleichsinnige Verdrehung der Träger
- $C_{D,C}$  Innenfeld und gleichsinnige Verdrehung der Träger

Es wird unterschieden zwischen einer entgegengesetzten Verdrehung der Trägerquerschnitte, d.h. dass die Träger dem stabilisierenden Trapezblech nachgeben (einer dreht nach links, einer nach rechts), und der gleichsinnigen Verdrehung, d.h. dass die Träger ihre Verdrehung (alle drehen nach rechts oder links) dem Trapezblech aufzwingen.

Außerdem geht die Stützweite des Trapezblechs in die Berechnung ein.

$C_{D,A}$ :	9.227	kNm/m
$C_{D,B}$ :	66.349	kNm/m
$C_{D,C}$ :	185.220	kNm/m
$C_D$ :	7.761	kNm/m

Die Teilfedersteifigkeiten werden zu der Ersatzfedersteifigkeit  $C_D$  zusammengefasst und am Bildschirm protokolliert.

### Schubfeldsteifigkeit

Des Weiteren kann optional die Schubfeldsteifigkeit des Trapezblechs ausgenutzt werden, um die Biegedrillknickgefährdung zu reduzieren.

Dazu ist die Anzahl Schubfelder, die der Aussteifung dienen, anzugeben. Die Stützweite des Trapezblechs  $s$  entspricht auch der Länge eines Schubabschnitts. Die Schubfeldlänge  $L_S$  wird am Bildschirm protokolliert.

- Schubfeldsteifigkeit**
- Check, ob Biegedrillknicken erforderlich

Optional kann untersucht werden, ob die Schubfeldsteifigkeit ausreicht, um ein Biegedrillknickversagen auszuschließen. Wird der **Check**-Button deaktiviert, erfolgt ein Biegedrillknicknachweis.

$G_S$ :	3811.7	kN/m
$S$ :	3049.4	kN

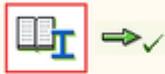
Es werden die ideale Schubsteifigkeit  $G_S$  und die resultierende Schubfeldsteifigkeit  $S$  am Bildschirm protokolliert.

## Querträger

**Drehelastische Lagerung am Obergurt des Trägers**

keine Drehbettung
  Trapezbleche
  Trapezbleche mit Setzbolzen
  Querträger
  Vorgabe der Kennwerte

**Querträgerprofil**

Profil aus Profilmanager
 
  
 parametrisiertes Stahlprofil

Profilname: IPE180

n : 3 (Anzahl Querträger)  
 s : 2.000 m (Stützweite der Querträger)  
 E<sub>mod</sub> : 210000 N/mm<sup>2</sup>  
 c : 1.500 m (gleichmäßiger Abstand der Querträger)  
 I<sub>y</sub>/c : 877.96 cm<sup>4</sup>/m

**Drehfedersteifigkeit**

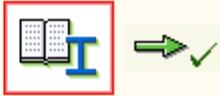
C<sub>0,B</sub> Berechnung nach EN 1993-1-3  
 C<sub>0,B</sub> Berechnung nach Wagenknecht  
 C<sub>0,B</sub> Berechnung nach Lindner  
 C<sub>0,C</sub> Endfeld (Ein-, Zweifeldträger)  
 C<sub>0,C</sub> Innenfeld (Durchlaufträger)

C<sub>0,B</sub> : 13.314 kNm/m  
 C<sub>0,C</sub> : 3687.430 kNm/m  
 C<sub>D</sub> : 13.266 kNm/m

Bild vergrößern 

### Drehfedersteifigkeit

Gleichmäßig am Obergurt des Trägers befestigte Querträger können den Träger gegen Biegedrillknicken sichern.

Profil aus Profilmanager
 
  
 parametrisiertes Stahlprofil

Profilname: IPE180

n : 3 (Anzahl Querträger)  
 s : 2.000 m (Stützweite der Querträger)  
 E<sub>mod</sub> : 210000 N/mm<sup>2</sup>  
 c : 1.500 m (gleichmäßiger Abstand der Querträger)  
 I<sub>y</sub>/c : 877.96 cm<sup>4</sup>/m

Der Querschnitt des Querträgers kann entweder über den **pcae**-eigenen Profilmanager in das Programm importiert oder als parametrisiertes Stahlprofil eingegeben werden.

Um ein Profil aus dem Angebot des **Profilmanagers** zu wählen, ist der grün unterlegte Pfeil zu betätigen.

Das externe Programm wird aufgerufen und ein Profil kann ausgewählt werden. Bei Verlassen des Profilmanagers werden die benötigten Daten übernommen und der Profilname protokolliert.

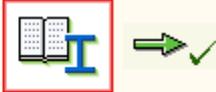
Die hinterlegten Profilparameter können am Bildschirm eingesehen werden, wenn auf **parametrisiertes Stahlprofil** umgeschaltet wird.

Zur Definition eines **parametrisierten Stahlprofils** ist zunächst die Profilkategorie festzulegen. Es können nur Doppel-T-Profile ausgewählt werden.

In Abhängigkeit davon werden Profilhöhe, Stegdicke sowie Flanschbreite und -dicke zur Eingabe angeboten.

Flanschneigungen werden nicht berücksichtigt.

Bei gewalzten Doppel-T-Profilen wird der Ausrundungsradius  $r$  zwischen Flansch und Steg geometrisch berücksichtigt, während ein geschweißtes Blechprofil mit Schweißnähten (Kehlnähte der Dicke  $a$  oder durchgeschweißte Stumpfnähte) zusammengefügt ist.

Profil aus Profilmanager
 
  
 parametrisiertes Stahlprofil

Profilname: IPE180

Profil aus Profilmanager  
 parametrisiertes Stahlprofil

Profilkategorie: I-Profil   
 Profilhöhe: h 180.0 mm  
 Stegdicke: t<sub>w</sub> 5.3 mm  
 Flanschbreite: b<sub>f</sub> 91.0 mm  
 Flanschdicke: t<sub>f</sub> 8.0 mm  
 gewalztes Profil  
 Ausrundungsradius: r 9.0 mm  
 geschweißtes Profil

Die Anzahl Querträger korrespondiert mit den Zwischenlagern in y-Richtung (s. Register *System*). Es sind mindestens zwei Querträger anzuordnen, um eine drehstabilisierende Wirkung zu erzielen.

Der sich daraus ergebende gleichmäßige Abstand  $c$  und das bezogene Trägheitsmoment  $I_y/c$  werden protokolliert.

Die Drehfedersteifigkeit  $C_D$  berechnet sich aus den zwei Steifigkeitsanteilen  $C_{D,B}$  der Profilverformung des Trägers und  $C_{D,C}$  der Querträger. Die Verbindung zwischen den Querträgern und dem Träger ist hier unmaßgeblich.

Die Berechnung der Drehbettung aus der Profilverformung des Trägers  $C_{D,B}$  kann entweder nach Eurocode, Wagenknecht oder Lindner erfolgen.

- $C_{D,B}$  Berechnung nach EN 1993-1-3
- $C_{D,B}$  Berechnung nach Wagenknecht
- $C_{D,B}$  Berechnung nach Lindner

Zur Berechnung der Drehbettung der Querträger  $C_{D,C}$  ist die Lagerung des Trägers (Endfeld / Innenfeld) zu beachten.

- $C_{D,C}$  Endfeld (Ein-, Zweifeldträger)
- $C_{D,C}$  Innenfeld (Durchlaufträger)

Außerdem gehen die Stützweite der Querträger sowie der E-Modul der Querträger in die Berechnung von  $C_{D,C}$  ein.

$C_{D,B}$ :	13.314	kNm/m
$C_{D,C}$ :	3687.430	kNm/m
$C_D$ :	13.266	kNm/m

Die Teilfedersteifigkeiten werden zu der Ersatzfedersteifigkeit  $C_D$  zusammengefasst und am Bildschirm protokolliert.

### Schubfeldsteifigkeit

Das Schubfeld kann durch Querträger nicht ausgesteift werden.

### Vorgabe der Kennwerte

**Drehelastische Lagerung am Obergurt des Trägers**

keine Drehbettung  
 Trapezbleche  
 Trapezbleche mit Setzbolzen  
 Querträger  
 Vorgabe der Kennwerte

**Drehfedersteifigkeit**

$C_D$  :  kNm/m

**Schubfeldsteifigkeit**

$S$  :  kN

Bild vergrößern 

Die Steifigkeiten können auch 'per Hand' vorgegeben werden.

## Nachweise im Brandfall



im Registerblatt *Nachweise im Brandfall* werden Parameter zur Berechnung der Stahltemperatur im Brandfall abgefragt.

Bei dünnwandigen Profilen wird davon ausgegangen, dass die thermische Beanspruchung durch den Brand eine gleichmäßige Temperatur im Material erzeugt.

Die Festigkeit des Stahls wird dadurch z.T. stark herabgesetzt, so dass durch einen Spannungsnachweis die Standfestigkeit nach einer Mindestzeit (Feuerwiderstandsdauer) nachgewiesen werden muss.

Es wird die Einheits-Temperaturzeitkurve n. EC 1-1-2, 3.2.1, verwendet.

Die Berechnung der Stahltemperatur erfolgt nach EC 1-1-2 unter Berücksichtigung des Profilmfaktors (Formfaktor des Querschnitts) sowie einer ggf. vorhandenen Profilmantelung.

Es werden Eingabefelder für die erforderlichen Werte angeboten. Sind sie nicht belegt, kann das Programm diese Werte berechnen.

Berechnung der Stahltemperatur

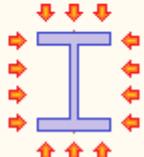
Feuerwiderstandsdauer  $t$   min

Emissivität der Profilloberfläche

Profilfaktor  $A_m/V$   1/m =0: wird berechnet

Abschattung (durch Wand, Decke)

Profil ungeschützt  
 profilfolgende Bekleidung  
 Kastenbekleidung



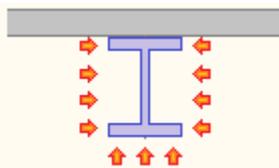
Bei ungeschützten Profilen entwickelt sich die Temperatur abhängig von der Absorptivität (Emissivität) der Bauteiloberfläche. Es besteht die Möglichkeit, diese anzugeben. Programmintern wird sie für **unbehandelten Stahl** und **feuerverzinkten Stahl** vorgelegt. Alternativ kann ein Wert vorgegeben werden.

Emissivität der Profilloberfläche

$\epsilon_m$   =0: Stahl

Das Profil kann durch angrenzende Bauteile teilweise vor der Hitze geschützt sein. Diese Abschattungseffekte durch eine Wand oder aufliegende Deckenplatte können berücksichtigt werden. Sie werden grafisch verdeutlicht.

Abschattung (durch Wand, Decke)



Ist das Profil ungeschützt, werden Abschattungseffekte durch das Profil selbst über einen Korrekturfaktor berücksichtigt. Der entsprechende Beiwert kann vorgegeben oder vom Programm berechnet werden.

Korrekturfaktor  $k_{sh}$   =0: wird berechnet  
für Abschattungseffekte (durch Profil)

Oberfläche d. umschließ. Kastens  $A_b$   mm<sup>2</sup>/mm =0: wird berechnet

Bemessungsgrößen und Beiwerte																				
Nr	A	N <sub>d</sub> [kN]	M <sub>y,d</sub> -Verlauf		M <sub>0y,d</sub> [kNm]		M <sub>1y,d</sub> [kNm]		k <sub>Cy</sub> [-]		ζ <sub>y</sub> [-]		C <sub>NLT</sub> [-]	C <sub>My</sub> [-]		k <sub>yy</sub> [-]		k <sub>zy</sub> [-]		
			M <sub>z,d</sub> -Verlauf	M <sub>0z,d</sub> [kNm]	M <sub>1z,d</sub> [kNm]	k <sub>Cz</sub> [-]	ζ <sub>z</sub> [-]	C <sub>Nz</sub> [-]	k <sub>zz</sub> [-]	k <sub>yz</sub> [-]										
1	<input type="checkbox"/>	40.00	<input type="text" value="Mo"/>	<input type="text" value="55.00"/>	-----	<input checked="" type="checkbox"/>														
			<input type="text" value="Mh"/>	<input type="text" value="25.00"/>	<input type="text" value="-25.00"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														
2	<input type="checkbox"/>	100.00	<input type="text" value="Mo"/>	<input type="text" value="26.00"/>	-----	<input checked="" type="checkbox"/>														
			<input type="text" value="Mh"/>	<input type="text" value="13.00"/>	<input type="text" value="-7.00"/>	<input checked="" type="checkbox"/>														

[neue Zeile ...](#)

Andernfalls sind die Materialparameter der Bekleidung vorzugeben. Im deutschen Anhang des EC 3-1-2, Anhang AA, sind Werte für Putz- und Plattenbekleidung dokumentiert, die hier angewählt werden können.

Kastenbekleidung

Brandschutzmaterial:

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_p$   W/(m K)

spezifische Wärmekapazität  $c_p$   J/(kg K)

Rohdichte  $\rho_p$   kg/m<sup>3</sup>

Alternativ können die Parameter frei belegt und ein Name vergeben werden kann. Feuchtigkeit und Dicke des Dämmmaterials sind ebenfalls anzugeben.

Feuchtigkeitsgehalt	$p_p$	<input type="text" value="0.0"/>	%
Dicke	$d_p$	<input type="text" value="25.0"/>	mm

Beim Brandschutznachweis wird eine gleichmäßige Temperaturverteilung sowohl über den Querschnitt als auch in Stablängsrichtung angenommen. Um z.B. Temperaturdifferenzen durch Abschattung (Querschnitt) oder an Auflagern (Träger) auszugleichen, kann die Brandlast durch Anpassungsfaktoren abgemindert werden.

ungleichmäßige Temperaturverteilung			
Anpassungsfaktor (Querschnitt)	$\kappa_1$	<input type="text" value="0.85"/>	
Anpassungsfaktor (Träger)	$\kappa_2$	<input type="text" value="1.00"/>	

### Bemessungsschnittgrößen



die Bemessungsschnittgrößen werden in das Registerblatt *Bemessungsschnittgrößen und Beiwerte* eingetragen.

Bemessungsgrößen und Beiwerte											
Nr	A	$N_d$ [kN]	$M_{y,d}$ -Verlauf $M_{z,d}$ -Verlauf	$M_{0y,d}$ [kNm] $M_{0z,d}$ [kNm]	$M_{1y,d}$ [kNm] $M_{1z,d}$ [kNm]	$k_{cy}$ [-] $k_{cz}$ [-]	$\zeta_y$ [-] $\zeta_z$ [-]	$C_{NLT}$ [-]	$C_{My}$ [-] $C_{Mz}$ [-]	$k_{yy}$ [-] $k_{zz}$ [-]	$k_{zy}$ [-] $k_{yz}$ [-]
1	<input type="checkbox"/>	40.00	$M_0$	55.00	-----	<input checked="" type="checkbox"/> 1.000	<input checked="" type="checkbox"/> autom.	<input checked="" type="checkbox"/> autom.			
			$M_0$	25.00	-25.00	<input checked="" type="checkbox"/> 0.602	<input checked="" type="checkbox"/> 2.555		<input checked="" type="checkbox"/> 0.400	<input checked="" type="checkbox"/> autom.	<input checked="" type="checkbox"/> autom.
2	<input type="checkbox"/>	180.00	$M_0$	26.00	-----	<input checked="" type="checkbox"/> 0.940	<input checked="" type="checkbox"/> 1.128	<input checked="" type="checkbox"/> 0.950	<input checked="" type="checkbox"/> 0.950	<input checked="" type="checkbox"/> autom.	<input checked="" type="checkbox"/> autom.
			$M_0$	13.00	-7.80	<input checked="" type="checkbox"/> 0.910	<input checked="" type="checkbox"/> 1.188		<input checked="" type="checkbox"/> 0.400	<input checked="" type="checkbox"/> autom.	<input checked="" type="checkbox"/> autom.

Bild vergrößern

Maximal 20 Schnittgrößenkombinationen können eingegeben werden.

In Abhängigkeit vom gewählten Nachweis werden nur die Eingabegrößen angezeigt, die zur Berechnung benötigt werden.

Es wird von einer über den Stab konstant verlaufenden Normalkraft ( $N_d$  als Druckkraft positiv) ausgegangen.

Der Eingabewert des Biegemoments  $M_{0,d}$  bezieht sich auf die Momentenverteilung in der Listbox.

Der Spannungsnachweis wird an den Stabenden geführt, daher ist die (max.) Querkraft  $V_d$  dieser Stelle einzugeben.

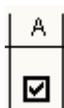
### Eingabefunktionen



ein Klick auf den Mülleimer löscht die betreffende Eingabezeile

[neue Zeile ...](#)

ein Klick auf den Text *neue Zeile* erzeugt eine Zeile für eine weitere Bemessungskombination



über die Option **A** wird die betreffende Schnittgrößenkombination in der außergewöhnlichen Situation nachgewiesen

$N_d$ [kN]	$M_{0y,d}$ [kNm]
<input type="text" value="40.00"/>	<input type="text" value="55.00"/>

Die Schnittgrößen werden in die zugehörigen Eingabefeldern eingegeben.

Es werden Bemessungsschnittgrößen vorgegeben.

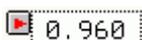
**Drucknormalkräfte sind positiv einzugeben!**



Einige Eingabefelder besitzen einen Optionsbutton.

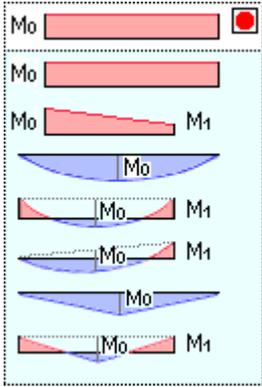
Ist dieser deaktiviert (kenntlich durch das x), wird der Eingabewert automatisch vom Programm berechnet.

Das Eingabefeld ist inaktiv.



Ein Klick auf das x aktiviert das Eingabefeld.

Der betreffende Wert kann nun vom Anwender geändert werden.



Über die Listbox wird die Form des Momentenverlaufs festgelegt.

Das Bezugsmoment  $M_0$  und der  $\psi$ -Parameter legen die Dimensionen fest.

Der Momentenverlauf hat Einfluss auf die  $k_c$  und die C-Werte.



Bei den Momentenverläufen Nr. 1 bis 3 entspricht  $M = M_0$ , wohingegen bei den Momentenverläufen Nr. 4 bis 7 für  $M$  das "eingehängte" Parabelmoment  $M_0$  einzusetzen ist. Der Wert  $\psi$  ist positiv für negative Stützmente.

### Ergebnisse am Bildschirm



im Registerblatt *Ergebnisse* werden die Ausnutzungen der einzelnen Teilnachweise sowie die Gesamtausnutzung angezeigt.

Lk	Teilnachweis	Ausnutzung
1	c/t - Verhältnis bzgl. Querschnittsklasse 2	53%
	Spannungsnachweis	36%
	Biegeknicken	15%
	Biegedrillknicken	90%
	<b>gesamt</b>	<b>90%</b>
2	c/t - Verhältnis bzgl. Querschnittsklasse 2	53%
	Spannungsnachweis	68%
	Biegeknicken	19%
	Biegedrillknicken	109%
	<b>gesamt</b>	<b>109%</b>
	<b>Gesamtnachweis</b>	<b>109%</b>

Überschreitungen der Ausnutzungen werden durch rote Balken angezeigt.

Je Lastkombination werden die Ausnutzungen der Teilnachweise sowie deren gesamte Ausnutzung aufgelistet.

Bei mehr als fünf Lastkombinationen wird nur das Gesamtergebnis jeder Lastkombination protokolliert.

### Nachweis der Querschnittsklassifizierung

Bei druckbeanspruchten, dünnwandigen Querschnitten ist der Nachweis gegen lokales Beulen einzelner Querschnittsteile notwendig.

Der allgemeine Beulsicherheitsnachweis ist in EC 3-1-5 geregelt.

In EC 3-1-1, 5.5, ist der Nachweis der Querschnittsklassifizierung als vereinfachter Beulnachweis angegeben.

Die Querschnittsklassen sind gemäß EC 3-1-1, 5.5(1), wie folgt definiert

- Klasse 1 Querschnitte können plastische Gelenke oder Fließzonen mit ausreichender plastischer Momententragfähigkeit und Rotationskapazität für die plastische Berechnung ausbilden
- Klasse 2 Querschnitte können die plastische Momententragfähigkeit entwickeln, haben aber aufgrund örtlichen Beulens nur eine begrenzte Rotationskapazität
- Klasse 3 Querschnitte erreichen für eine elastische Spannungsverteilung die Streckgrenze in der ungünstigsten Querschnittsfaser, können aber wegen örtlichen Beulens die plastische Momententragfähigkeit nicht entwickeln
- Klasse 4 Querschnitte sind solche, bei denen örtliches Beulen vor Erreichen der Streckgrenze in einem oder

mehreren Teilen des Querschnitts auftritt

Querschnitte der Klasse 4 können vom Programm nicht behandelt werden.

Maßgebend für die Einordnung in die Klassen sind das Verhältnis von Länge zu Dicke der Querschnittsbleche ( $c/t$ -Verhältnis), die Lagerung der Blechenden und die Spannungsverläufe über die Querschnittsteile.

Außerdem wird die Stahlfestigkeit über den Beiwert  $\epsilon$  berücksichtigt.

Die Einstufung erfolgt gemäß EC 3-1-1, Tab. 5.2.

### Drehfeder- und Schubfeldsteifigkeit

Sind Träger am Druckgurt (Obergurt) mit anderen Bauteilen verbunden, können sich diese stabilisierend auf den biegedrillknickgefährdeten Träger auswirken.

Voraussetzung ist, dass das aussteifende Bauteil eine kontinuierliche Stützung bildet, wie es z.B. bei Trapezblechen der Fall ist.

Auch können mehrere Querträger eine drehelastische Bettung hervorrufen.

Die drehelastische Bettung berechnet sich nach EC 3-1-1, BB.2.2 (analog EC 3-1-3, 10.1.5.2), mit

$$\frac{1}{C_{\mathfrak{A},k}} = \frac{1}{C_{\mathfrak{A}R,k}} + \frac{1}{C_{\mathfrak{A}C,k}} + \frac{1}{C_{\mathfrak{A}D,k}} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$C_{\mathfrak{A}R,k}$  Verdrehsteifigkeit (je Längeneinheit) des stabilisierenden Bauteils unter der Annahme einer steifen Verbindung mit dem Träger

$C_{\mathfrak{A}C,k}$  Verdrehsteifigkeit (je Längeneinheit) der Verbindung zwischen dem Träger und dem stabilisierenden Bauteil

$C_{\mathfrak{A}D,k}$  Verdrehsteifigkeit (je Längeneinheit) infolge Querschnittsverformungen des Trägers

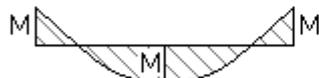
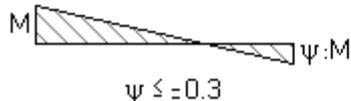
Die Bezeichnungen im Programm sind analog EC 3-1-3 gewählt, d.h.

$$C_{\mathfrak{A}R,k} = C_{D,C} \quad \dots \text{ und } \dots \quad C_{\mathfrak{A}C,k} = C_{D,A} \quad \dots \text{ und } \dots \quad C_{\mathfrak{A}D,k} = C_{D,B} \quad \dots \text{ und } \dots \quad C_{\mathfrak{A},k} = C_D$$

Der Träger darf als ausreichend biegedrillknickgesichert angesehen werden, wenn gilt

$$C_{\vartheta,k} > \frac{M_{pl,k}^2}{E \cdot I_z} \cdot K_{\vartheta} \cdot K_{\nu} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

- $C_{\vartheta,k}$  Verdrehsteifigkeit (je Längeneinheit Trägerlänge), die durch das stabilisierende Bauteil (z.B. Dachkonstruktion) und die Verbindung mit dem Träger wirksam ist
- $M_{pl,k}$  charakteristischer Wert der plastischen Momententragfähigkeit des Trägers
- $K_{\vartheta}$  0.35 für die elastische und 1.00 für die plastische Berechnung
- $K_{\nu}$  Faktor zur Berücksichtigung des Momentenverlaufs und der Art der Verdrehbarkeit des drehbehindert gestützten Trägers

Momentenverlauf	freie Drehachse	gebundene Drehachse
	4.0	0
	3.5	0.12
	3.5	0.23
	2.8	0
	1.6	1.0
	1.0	0.7

Eine gebundene Drehachse liegt vor, wenn infolge der Schubfeldsteifigkeit (s.u.) des aussteifenden Elements die Lage der Drehachse für das Biegedrillknicken am Obergurt festgehalten wird.

Nach *Wagenknecht* wirkt sich die Drehfeder positiv auf die Torsionssteifigkeit aus, d.h. für die Berechnung des Biegedrillknickwiderstands wird vereinfachend ein Ersatztorsionsmoment  $I_T^*$  verwendet

$$I_T^* = I_T + \Delta I_T \quad \dots \text{ mit } \dots \quad \Delta I_T = (C_D \cdot c^2) / (G \cdot \pi^2)$$

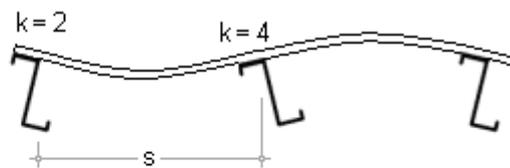
Diese Näherung gilt streng genommen nur für gabelgelagerte Einfeldträger mit Gleichstreckenlast ohne negative Randmomente.

### Drehfedersteifigkeit

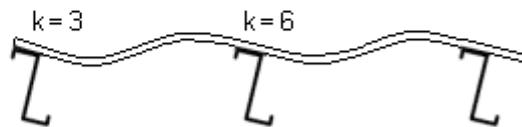
Die Drehbettung aus der Biegesteifigkeit des *abstützenden Bauteils* (Trapezblech, Querträger) wird n. EC 3-1-3, 10.1.5.2(4), ermittelt mit

$$C_{D,C} = \frac{k \cdot E \cdot I_{\text{eff}}}{s} \quad \dots \text{ mit } k \text{ als Koeffizient für folgende Fälle}$$

Endfeld und Verdrehung  
Innenfeld und Verdrehung



Endfeld und Verdrehung  
Innenfeld und Verdrehung



$I_{\text{eff}}$  wirksames Flächenmoment 2. Grades je Breitereinheit des Profilblechs  
 $s$  Pfettenabstand

I.A. wird für Ein- und Zweifeldträger bei Betrachtung des Endfelds der Wert  $k = 2$  und bei Durchlaufträgern bei Betrachtung des Innenfelds der Wert  $k = 4$  gesetzt.

Die Drehbettung aus der *Anschlusssteifigkeit* wird nur für Trapezbleche n. EC 3-1-3, 10.1.5.2(5), ermittelt mit

$$C_{D,A} = C_{100} \cdot k_{ba} \cdot k_t \cdot k_{bR} \cdot k_A \cdot k_{bT} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$k_{ba} = (b_a / 100)^2 \quad \dots \text{ wenn } \dots b_a < 125 \text{ mm}$$

$$k_{ba} = 1.25 \cdot (b_a / 100) \quad \dots \text{ wenn } \dots 125 \text{ mm} \leq b_a < 200 \text{ mm}$$

$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0.75)^{1.1} \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} \geq 0.75 \text{ mm} \quad \text{positive Lage}$$

$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0.75)^{1.5} \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} \geq 0.75 \text{ mm} \quad \text{negative Lage}$$

$$k_t = (t_{\text{nom}} / 0.75)^{1.5} \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} < 0.75 \text{ mm}$$

$$k_{bR} = 1.0 \quad \dots \text{ wenn } \dots b_R \leq 185 \text{ mm}$$

$$k_{bR} = 185 / b_R \quad \dots \text{ wenn } \dots b_R > 185 \text{ mm}$$

bei Auflast

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) \cdot 0.08 \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} \equiv 0.75 \text{ mm} \quad \text{positive Lage}$$

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) \cdot 0.16 \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} \equiv 0.75 \text{ mm} \quad \text{positive Lage}$$

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) \cdot 0.095 \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} \equiv 1.00 \text{ mm} \quad \text{negative Lage}$$

$$k_A = 1.0 + (A - 1.0) \cdot 0.095 \quad \dots \text{ wenn } \dots t_{\text{nom}} \equiv 1.00 \text{ mm} \quad \text{negative Lage}$$

lineare Interpolation für  $t$  zwischen  $t \equiv 0.75 \text{ mm}$  und  $t \equiv 1.00 \text{ mm}$  zulässig

Gleichung gilt nicht für  $t < 0.75 \text{ mm}$

bei  $t > 1 \text{ mm}$  ist in der Gleichung  $t \equiv 1 \text{ mm}$  zu setzen

bei abhebender Last

$$k_A = 1.0 \quad \dots \text{ und } \dots k_{bT} = \sqrt{b_{T,\text{max}} / b_T} \quad \dots \text{ wenn } b_T > b_{T,\text{max}}, \text{ sonst } k_{bT} \equiv 1$$

$A \leq 12$  in  $\text{kN/m}$  ist die Last in  $\text{kN/m}$ , die zwischen Blech und Pfette wirkt

$b_a$  Breite des Pfettengurts in  $\text{mm}$

$b_R$  Rippenabstand des Profilblechs in  $\text{mm}$

$b_T$  Breite des Profilblechgurts, der mit der Pfette verbunden ist

Die Beiwerte  $C_{100}$  und  $B_{T,\text{max}}$  sind EC 3-1-3, Tab. 10.3, zugeordnet zur Lage der Profilbleche (positiv, negativ), zum Befestigungsort (Unter-, Obergurt) und zum Abstand der Befestigung (in jeder Rippe, nur in jeder zweiten Rippen) zu entnehmen.

Die Drehbettung aus der *Profilverformung des Trägers* selbst wird folgendermaßen ermittelt

nach EC 3-1-3, 10.1.5.1(4)

$$C_{\vartheta D,k} = \frac{E}{4 \cdot (1 - \nu^2) \cdot (h_w/t_w^3 + b_{\text{mod}}/t_f^3)} \quad \dots \text{ dabei gilt für ein I-Profil}$$

$t_w, t_f$       Blechdicken von Steg und Flansch des Trägers  
 $b_{\text{mod}} \approx b_f/2$       Abstand zwischen Verbindungsmittel und Trägersteg  
 $h_w, b_f$       Steghöhe, Flanschbreite des Trägers

nach Wagenknecht

$$C_{\vartheta D,k} = \frac{E \cdot t_w^3}{4 \cdot h_w}$$

nach Lindner (nur für Querträger)

$$C_{\vartheta D,k} = \frac{E \cdot G \cdot t_f^3 \cdot b_f \cdot t_w^3}{3 \cdot h_w}$$

Erfolgt die drehelastische Lagerung durch Querträger, ist die Drehbettung aus der Berechnung nach EC 3-1-3 oder Wagenknecht auf eine wirksame Breite  $b_{\text{eff}} = h_{\text{Träger}} + b_{\text{Querträger}}$  zu beziehen.

### Schubfeldsteifigkeit

Trapezbleche besitzen in ihrer Ebene auch eine Schubfeldsteifigkeit, die das Biegedrillknicken, d.h. das Ausweichen in Richtung des Schubfelds, verhindern kann.

N. EC 3-1-1, BB.2.1 und EC 3-1-3, 10.1.1(6), darf der Träger in der Ebene der Trapezbleche als starr gelagert betrachtet werden, wenn gilt

$$S \geq \left( E \cdot I_w \cdot \pi^2/L^2 + G \cdot I_T + E \cdot I_z \cdot \pi^2/L^2 \cdot 0.25 \cdot h^2 \right) \cdot 70/h^2 \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$S$       Schubsteifigkeit der Bleche (je Längeneinheit Trägerlänge) im Hinblick auf die Verformungen eines Trägers in der Blechebene

$I_w$       Wölbfächenmoment des Trägers

$I_T$       Torsionsflächenmoment des Trägers

$I_z$       Flächenträgheitsmoment des Trägerquerschnitts um die schwache Querschnittsachse

$L$       Länge des Trägers

$h$       Höhe des Trägers

Die vorhandene Schubsteifigkeit je auszusteifendem Träger berechnet sich mit

$$S = G_s \cdot L_s / n \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$G_s = \frac{10^4}{K_1 + K_2/L_s} \quad \text{ideeller Schubmodul des Trapezblechs}$$

$K_1, K_2$       Schubfeldbeiwerte n. Herstellerdatenblatt des Trapezblechs

$L_s$       Schubfeldlänge in m

$n$       Anzahl auszusteifender Träger

Bei Befestigung des Trapezblechs nur in jeder 2. Rippe wird  $0.2 \cdot S$  angesetzt.

I.A. wird nur mit  $K_1$  und  $K_2$  die Nachgiebigkeit der umlaufenden Verbindung vernachlässigt, die über die Beiwerte  $K_1^*$  und  $K_2^*$  berücksichtigt werden kann.

$$G_s = \frac{10^4}{K_1 \cdot \alpha_2 + K_1^* \cdot e_L + \frac{K_2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_4 + K_2^* \cdot \alpha_3}{L_s}} \quad \text{ideeller Schubmodul des Trapezblechs}$$

$K_1, K_2, K_1^*, K_2^*$  ..... Schubfeldbeiwerte n. Herstellerdatenblatt des Trapezblechs  
 $L_s$  ..... Schubfeldlänge in m  
 $e_L$  ..... Abstand der Verbindungselemente am Längsstoß  
 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$  ..... Faktoren für den Einfluss der Anzahl Zwischenlager (Misiek/Podleschny, Tab. 11, Stahlbaukalender 2020)  
 $\alpha_4 = 1 + 0.3 \cdot n_b$  ..... Faktor für den Einfluss der Anzahl Profiltafeln  
 $n_b$  ..... Anzahl Querstöße im Schubfeld

### Nachweis gegen Biegeknicken

Der Nachweis gegen Biegeknicken erfolgt nach dem Ersatzstabverfahren aus EC 3, 6.3.1.

Es wird für dünnwandige offene und Hohl-Profile der Querschnittsklassen 1 bis 3 angewandt.

Die Nachweisgleichung hat die Form

$$\frac{N_{Ed}}{N_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.46)} \quad \dots \text{mit } \dots$$

$N_{Ed}$  Bemessungswert der einwirkenden Druckkraft

$N_{b,Rd}$  ..... der Biegebeanspruchbarkeit

Dabei gilt

$$N_{b,Rd} = \frac{\chi \cdot A \cdot f_y}{\gamma_{M1}} \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.47)}$$

Der Wert  $\chi$  ergibt sich aus

$$\chi = \frac{1}{\Phi + \sqrt{\Phi^2 - \bar{\lambda}^2}} \leq 1.0 \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.49)} \quad \dots \text{mit } \dots$$

$$\Phi = 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha \cdot (\bar{\lambda} - 0.2) + \bar{\lambda}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda} = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} = \frac{L_{cr}}{i \cdot \lambda_1} \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.50)}$$

$$\lambda_1 = \pi \cdot \sqrt{\frac{E}{f_y}} = 93.9 \cdot \varepsilon$$

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}}$$

$\alpha$  Imperfektionsbeiwert gemäß EC 3, Tab. 6.1 und 6.2, für die maßgebende Knicklinie

$N_{cr}$  ideale Verzweigungslast für den maßgebenden Knickfall

$i$  Trägheitsradius für die maßgebende Knickebene

$L_{cr}$  Knicklänge in der betrachteten Knickebene

Bei Bauteilen mit offenen Querschnitten kann u.U. auch Drill- oder Biegedrillknicken maßgebend werden. Die Schlankheit ergibt sich in diesem Falle zu:

$$\bar{\lambda}_T = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}} \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.52)}$$

### Nachweis gegen Biegedrillknicken

Der Nachweis gegen Biegedrillknicken erfolgt nach dem Ersatzstabverfahren aus EC 3-1-1, 6.3.2.3.

Das Verfahren ist für gewalzte oder gleichartige geschweißte Querschnitte unter Biegebeanspruchung erlaubt.

Es wird für doppelsymmetrische Doppel-T-Profile der Querschnittsklassen 1 bis 3 angewandt.

Die Nachweisgleichung hat die Form

$$\frac{M_{Ed}}{M_{b,Rd}} \leq 1.0 \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.54)}$$

$$M_{b,Rd} = \chi_{LT} \cdot W_y \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}} \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.55)} \quad \dots \text{mit } \dots$$

$$W_y = W_{pl,y} \quad \dots \text{für Querschnitte der Klassen 1 oder 2}$$

$$W_y = W_{el,y} \quad \dots \text{der Klasse 3}$$

$$\chi_{LT} = \frac{1}{\Phi_{LT} + \sqrt{\Phi_{LT}^2 - \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2}} \quad \dots \text{jedoch } \dots \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1.0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$

$$\Phi_{LT} = 0.5 \cdot \left( 1 + \alpha_{LT} \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - \bar{\lambda}_{LT,0}) + \beta \cdot \bar{\lambda}_{LT}^2 \right)$$

$$\bar{\lambda}_{LT,0} = 0.4 \quad \text{Höchstwert}$$

$$\beta = 0.75 \quad \text{Mindestwert}$$

$$\bar{\lambda}_{LT} = \sqrt{\frac{W_y \cdot f_y}{M_{cr}}}$$

Die Biegedrillknicklinien werden entsprechend EC 3, Tab. 6.5, berücksichtigt.

Das Biegedrillknickmoment wird wie folgt bestimmt:

$$M_{cr} = \zeta \cdot N_{cr} \cdot \left( \sqrt{c^2 + \left( f \cdot \frac{z_p}{2} \right)^2} + f \cdot \frac{z_p}{2} \right) \quad \dots \text{mit } \dots$$

$$f = 0.8 \cdot \zeta \quad \dots \text{wenn } \zeta > 1.35 \quad \dots \text{und } M \neq 0 \quad \dots \text{sonst } f = 1$$

$$N_{cr} = \pi^2 \cdot \frac{E \cdot I_z}{(\beta_z \cdot l)^2}$$

$$c^2 = \frac{(\beta_z \cdot l)^2}{I_z} \cdot \left( \frac{I_\omega}{(\beta_0 \cdot l)^2} + \frac{G \cdot I_T}{E \cdot \pi^2} \right)$$

Die  $\zeta$ -Werte werden nach [13] ermittelt.

Zur Berücksichtigung der Momentenverteilung zwischen den seitlichen Lagerungen darf  $\chi_{LT}$  wie folgt modifiziert werden:

$$\chi_{LT,mod} = \frac{\chi_{LT}}{f} \quad \dots \text{jedoch } \dots \begin{cases} \chi_{LT} \leq 1.0 \\ \chi_{LT} \leq \frac{1}{\bar{\lambda}_{LT}^2} \end{cases}$$

$$f = 1 - 0.5 \cdot (1 - k_c) \cdot [1 - 2.0 \cdot (\bar{\lambda}_{LT} - 0.8)^2] \quad \dots \text{jedoch } \dots f \leq 1.0$$

Hohlprofile sind nach EC 3-1-1, 6.3.2.1(2), nicht biegedrillknickgefährdet, der Abminderungsfaktor ist also nicht relevant ( $\chi_{LT,mod} = 1$ ).

Die Momenten-Querkraft-Interaktion wird n. EC 3-1-1, 6.2.8, durch eine Verringerung der Streckgrenze berücksichtigt,

$$\text{Für } V_{Ed} > V_{pl,Rd}/2 \text{ gilt } f_y = (1 - \rho) \cdot f_y \quad \dots \text{mit } \dots \rho = (2 \cdot V_{Ed} / V_{pl,Rd} - 1)^2$$

wobei sich die Querkraft aus der Momentenverteilung (s. EC 3-1-1, Tab. 6.6) ergibt.

Der Nachweis für Bauteile, die auf Biegung und Druck beansprucht werden, wird nach EC 3, 6.3.3, geführt.

Die Nachweisgleichungen haben die Form

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_y \cdot N_{Rk}} + k_{yy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{yz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.61)}$$

$$\frac{N_{Ed}}{\chi_z \cdot N_{Rk}} + k_{zy} \cdot \frac{M_{y,Ed}}{\chi_{LT} \cdot \frac{M_{y,Rk}}{\gamma_{M1}}} + k_{zz} \cdot \frac{M_{z,Ed}}{\frac{M_{z,Rk}}{\gamma_{M1}}} \leq 1 \quad \dots \text{EC 3, Gl. (6.62)}$$

$N_{Ed}, M_{y,Ed}, M_{z,Ed}$  Bemessungswerte der Druckkraft und der einwirkenden maximalen Momente um die y-y-Achse und z-z-Achse

$\chi_y, \chi_z$  Abminderungsbeiwerte für Biegeknicken n. 6.3.1

$\chi_{LT}$  ... für Biegedrillknicken n. 6.3.2

$k_{yy}, k_{yz}, k_{zy}, k_{zz}$  Interaktionsfaktoren werden nach EC 3, Anhang B, Verfahren 2, bestimmt

### Stabilität im Brandfall

Ebenso wie die Spannungsnachweise werden die Stabilitätsnachweise mit den reduzierten Festigkeiten geführt.

Die Nachweisführung erfolgt auf Traglastebene.

Die im Folgenden beschriebenen Nachweise gelten für Querschnittsklassen 1 bis 3.

#### Biegeknicken

N. 4.2.3.2 berechnet sich die Knickfestigkeit druckbeanspruchter Bauteile der Querschnittsklassen 1 bis 3 zu

$$N_{b,fi,t,Rd} = \chi_{fi} \cdot A \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$\chi_{fi} = \frac{1}{\varphi_{\theta} + \sqrt{\varphi_{\theta}^2 - \bar{\lambda}_{\theta}^2}} \quad \dots \text{ und } \dots \quad \varphi_{\theta} = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{\theta} + \bar{\lambda}_{\theta}^2) \quad \dots \text{ und } \dots \quad \alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235 / f_y} \quad \dots \text{ und } \dots$$

$$\bar{\lambda}_{\theta} = \bar{\lambda} \cdot \sqrt{k_{\theta} / k_{E,\theta}}$$

Im Unterschied zur Bemessung bei Normaltemperatur wird für  $\chi_{\min,fi}$  der kleinere der beiden Werte  $\chi_{fi,y}$  und  $\chi_{fi,z}$  verwendet. Der Imperfektionsbeiwert  $\alpha$  ist auf die Streckgrenze bei Normaltemperatur  $f_y$  zu beziehen.

Die Knicklänge sollte i.A. der Knicklänge bei Normaltemperatur entsprechen. Wenn das betrachtete Bauteil ein Durchlaufträger oder eine durchlaufende Stütze ist und sich in einem abgeschlossenen Brandraum befindet, darf die Knicklänge im Brandfall reduziert werden auf  $l_{fi} = 0.7 \cdot L$  im Endfeld bzw.  $l_{fi} = 0.5 \cdot L$  im Innenfeld mit der Feldlänge  $L$ .

Eine seitliche Aussteifung darf berücksichtigt werden, wenn sie den gleichen Feuerwiderstand aufweist wie das auszusteifende Bauteil.

#### Biegedrillknicken

N. 4.2.3.3(4) berechnet sich die Biegedrillknickbeanspruchbarkeit eines Bauteils mit einem Querschnitt der Klassen 1 bis 3 bei gleichmäßiger Temperaturverteilung zu

$$M_{b,fi,t,Rd} = \chi_{LT,fi} \cdot W_{pl,y} \cdot k_{y,\theta,com} \cdot f_y / \gamma_{M,fi} \quad \dots \text{ mit } \dots$$

$$\chi_{LT,fi} = \frac{1}{\Phi_{LT,\theta,com} + \sqrt{\Phi_{LT,\theta,com}^2 - \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2}}$$

$$\Phi_{LT,\theta,com} = 0.5 \cdot (1 + \alpha \cdot \bar{\lambda}_{LT,\theta,com} + \bar{\lambda}_{LT,\theta,com}^2) \quad \dots \text{ und } \dots \quad \alpha = 0.65 \cdot \sqrt{235 / f_y} \quad \dots \text{ und } \dots$$

$$\bar{\lambda}_{LT,\theta,com} = \bar{\lambda}_{LT} \cdot \sqrt{k_{y,\theta,com} / k_{E,\theta,com}}$$

$k_{y,\theta,com}$  und  $E_{\theta,com}$  sind die Abminderungsfaktoren des Materials bei maximaler Temperatur im Druckflansch. Vereinfachend können die Faktoren für die maximale Temperatur  $\theta_a$  im Querschnitt verwendet werden.

**Interaktion Druck und Biegung**

Die Tragfähigkeit von auf Biegung und Druck beanspruchten Bauteilen wird n. EC 3-1-2, 4.2.3.5, nachgewiesen mit

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{min,fi} \cdot A \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_y \cdot M_{y,fi,Ed}}{W_y \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_z \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1 \quad \text{EC 3-1-2 Gl. 4.21 a+c}$$

$$\frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_{LT} \cdot M_{y,fi,Ed}}{\chi_{LT,fi} \cdot W_y \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} + \frac{k_z \cdot M_{z,fi,Ed}}{W_z \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1 \quad \text{EC 3-1-2 Gl. 4.21 b+d}$$

$$k_{LT} = 1 - \frac{\mu_{LT} \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 1 \quad \dots \text{ mit } \dots \quad \mu_{LT} = 0.15 \cdot \bar{\lambda}_{z,0} \cdot \beta_{M,LT} - 0.15 \leq 0.9$$

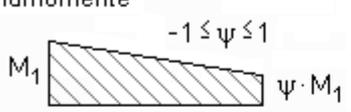
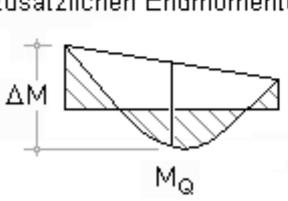
$$k_y = 1 - \frac{\mu_y \cdot N_{fi,Ed}}{\chi_{y,fi} \cdot A \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 3 \quad \dots \text{ mit } \dots \quad \mu_y = (2 \cdot \beta_{M,y} - 5) \cdot \bar{\lambda}_{y,0} + 0.44 \cdot \beta_{M,y} + 0.29 \leq 0.8$$

... mit ...  $\bar{\lambda}_{y,20^\circ C} \leq 1.1$

$$k_z = 1 - \frac{N_{fi,Ed}}{\chi_{z,fi} \cdot A \cdot k_{y,0} \cdot f_y / \gamma_{M,fi}} \leq 3 \quad \dots \text{ mit } \dots \quad \mu_z = (1.2 \cdot \beta_{M,z} - 3) \cdot \bar{\lambda}_{z,0} + 0.71 \cdot \beta_{M,z} - 0.29 \leq 0.8$$

wobei  $W_y = W_{y,pl}$ ,  $W_z = W_{z,pl}$  bei Querschnitten der Klasse 1 und 2 und  $W_y = W_{y,el}$ ,  $W_z = W_{z,el}$  bei Querschnitten der Klasse 3 gesetzt werden.

Der Anpassungsfaktor für den Momentenverlauf wird EC 3-1-2 Bild 4.2, entnommen.

Momentenverlauf	Anpassungsfaktor $\beta_M$
<p>Endmomente</p>  <p><math>-1 \leq \psi \leq 1</math></p>	$\beta_{M,\psi} = 1.8 - 0.7 \cdot \psi$
<p>Momente aus Querlasten in Tragwerksebene</p> 	$\beta_{M,Q} = 1.3$ $\beta_{M,Q} = 1.4$
<p>Momente aus Querlasten in Tragwerksebene mit zusätzlichen Endmomenten</p> 	$\beta_M = \beta_{M,\psi} + \frac{M_Q}{\Delta M} \cdot (\beta_{M,Q} - \beta_{M,\psi})$ $M_Q =  \max M $ nur aus Querlast $\Delta M =  \max M $ ..... bei Momentenverläufen ohne Vorzeichenwechsel $\Delta M =  \max M  +  \min M $ bei Momentenverläufen mit Vorzeichenwechsel

**Beispiele**

Das Programm 4H-EC3ST führt die Stabilitätsnachweise Biegeknicken und Biegedrillknicken unter Normaltemperatur oder im Brandfall für ausgewählte dünnwandige Querschnitte der Klasse 1 bis 3.

Nähere Informationen zum Biegeknicken finden Sie [hier](#).

... zum Biegedrillknicken finden Sie [hier](#).

... zur Berechnung im Brandfall finden Sie [hier](#).

Im Folgenden wird beispielhaft der Berechnungsablauf dargestellt. Beispiel 1 behandelt den Biegedrillknicknachweis eines Rahmenriegels bei Normaltemperatur; Beispiel 2 stellt den Biegedrillknicknachweis einer Stütze im Brandfall dar.

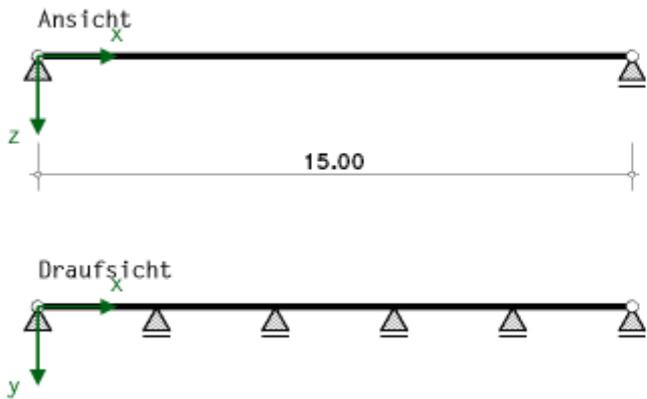
**Bsp. 1: Rahmenriegel, L = 15 m, IPE 450, S 355, seitlich ausgesteift durch vier Querträger (aus Kommentar EC 3, Kap. IV.12)**

Ein Riegel wird durch Normalkraft und Biegung um die starke Achse (y-Achse) beansprucht. Der Lastangriffspunkt befindet sich in Mitte der Trägeroberkante. Die Stabenden sind gabelgelagert.

Der Obergurt wird seitlich durch vier Querträger (Stützweiten 5 m) gehalten, die in dieser Richtung auch die Knicklänge des Riegels reduzieren.

Zusätzlich zu den Stabilitätsnachweisen werden der c/t- und der Spannungsnachweis geführt.

Das System wird grafisch dargestellt und zeigt die Lage der Zwischenlager, die hier durch die Pfetten (Querträger) in y-Richtung gebildet werden.



In diesem Beispiel werden die Schnittgrößen für einen Biegedrillknicknachweis  $N+M_y$  (Momentenverlaufstyp 5) definiert. Für den Spannungsnachweis, der am Stabende zu führen ist, wird die zugehörige Querkraft eingetragen.

**1.8. Bemessungsschnittgrößen (Lastkombinationen)**

Lk	Nd kN	Typ -y-	M <sub>0y,d</sub> kNm	ψ <sub>y</sub>	k <sub>c,y</sub>	ζ <sub>y</sub>	V <sub>z,d</sub> kN
1	24.00	5	393.80	0.798	0.910	1.993	-230.70

Nd: konstante Normalkraft im Stab; Typ (y): Momentenverlaufstyp je Richtung; M<sub>0y,d</sub>, ψ<sub>y</sub>: Bezugsgrößen des Momentenverlaufs  
k<sub>c,y</sub>, ζ<sub>y</sub>: Beiwerte für die Berechnung; V<sub>z,d</sub>: maximale Querkraft am Stabende

**Momentenverlaufstypen**



Die vier Querträger bewirken eine drehelastische Einspannung, die näherungsweise durch eine Vergrößerung des Torsionsträgheitsmoments berücksichtigt wird. Der Drehfederanteil durch die Querträger wird nach Lindner (s. Theorie Drehfeder) bestimmt.

**1.9. Drehelastische Bettung durch 4 Querträger**

Profil IPE180

h = 180.0 mm, t<sub>w</sub> = 5.3 mm, b<sub>f</sub> = 91.0 mm, t<sub>f</sub> = 8.0 mm, r = 9.0 mm

A = 23.95 cm<sup>2</sup>, I<sub>y</sub> = 1316.94 cm<sup>4</sup>, I<sub>z</sub> = 100.83 cm<sup>4</sup>, I<sub>T</sub> = 5.15 cm<sup>4</sup>, y<sub>s</sub> = -45.5 mm, z<sub>s</sub> = 90.0 mm

E = 210000 N/mm<sup>2</sup>, c = 3.000 m (Abstand), I<sub>y</sub>/c = 4389797 mm<sup>3</sup>, s = 6.000 m (Stützweite)

C<sub>D,B</sub>: Berechnung nach Lindner, C<sub>D,C</sub>: Innenfeld

C<sub>D,B</sub> = 26.620 kNm/m, C<sub>D,C</sub> = 614.572 kNm/m, C<sub>D</sub> = 25.515 kNm/m ⇒ I<sub>T</sub><sup>\*</sup> = 95.91 cm<sup>4</sup>

I<sub>T</sub><sup>\*</sup> = I<sub>T</sub> + ΔI<sub>T</sub> mit I<sub>T</sub> = 67.10 cm<sup>4</sup>, ΔI<sub>T</sub><sup>\*</sup> = (C<sub>D</sub> · c<sup>2</sup>) / (G · π<sup>2</sup>) = 28.81 cm<sup>4</sup>

Die Querträger werden im Abstand c derart am Hauptträger angebracht, dass sie das seitliche Ausweichen des Druckgurts verhindern bzw. reduzieren. Die Länge der Querträger (Stützweite) wird mit s bezeichnet. Aus der Gesamtsteifigkeit der Drehfeder lässt sich ein vergrößertes Torsionsträgheitsmoment I<sub>T</sub><sup>\*</sup> berechnen.

## 2. Nachweise

### 2.1. Querschnittsklassifizierung

#### 2.1.1. Lastkombination 1 $\Rightarrow$ Querschnittsklasse 1

Nr	c mm	t mm	c/t -	$\epsilon$ -	$\sigma_1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	Tab 5.2	$\alpha$ -	$\psi$ -	$k_{\sigma}$ -	Klasse -
1	69.3	14.6	4.75	0.814	205.19	205.19	Eins. 1/1	---	---	---	1
2	69.3	14.6	4.75	0.814	205.19	205.19	Eins. 1/1	---	---	---	1
3	378.8	9.4	40.30	0.814	178.84	-173.98	Beids. 3/1	0.509	---	---	1
4	69.3	14.6	4.75	0.814	-200.34	-200.34	-----	---	---	---	---
5	69.3	14.6	4.75	0.814	-200.34	-200.34	-----	---	---	---	---

Druckspannungen haben entsprechend EC 3 ein positives Vorzeichen.

Die Nachweise erfolgen in der vorgegebenen Querschnittsklasse 2:  $U_{c/t} = 0.611 < 1$  ok

Voraussetzung für die weitere Berechnung ist die Einordnung des Querschnitts in eine Klasse, die die Lastaufnahmekapazität kennzeichnet (s. [Theorie Klassifizierung](#)). Querschnitte der Klasse 3 müssen elastisch, Querschnitte der Klassen 1 und 2 dürfen plastisch nachgewiesen werden.

Es besteht die Möglichkeit, das Nachweisverfahren zu steuern, indem eine Querschnittsklasse vorgegeben wird. Der Nachweis wird geführt mit  $U_{c/t} = \text{vorh} (c/t) / \text{zul} (c/t)$ .

In diesem Beispiel soll der Träger plastisch nachgewiesen werden, daher wurde die Querschnittsklasse 2 vorgegeben.

### 2.2. Spannungsnachweis gemäß EN 1993-1-1, 6.2

Nr	$N_{Ed}$ kN	$M_{y,Ed}$ kNm	$V_{z,Ed}$ kN	$\sigma_x$ N/mm <sup>2</sup>	$\tau$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_y$ N/mm <sup>2</sup>	U -
1	-24.00	314.25	-230.70	---	---	---	0.595

max U = 0.595 < 1 ok

Nach EC 3-1-1, 6.3.3(2) ist an den Bauteilenden zusätzlich ein Querschnittsnachweis zu führen.

Aus den Eingabegrößen  $N_d = \text{const.}$ ,  $M_d$  mit Momentenverlauf und max  $V_d$  können die Bemessungsgrößen  $N_{Ed}$ ,  $M_{Ed}$ ,  $V_{Ed}$  berechnet werden, mit denen der Querschnitt plastisch mit der Methode mit Dehnungsiteration (s. [Theorie Querschnittsnachweise](#)) nachgewiesen wird.

### 2.3. Biegedrillknicken gemäß EN 1993-1-1, 6.3.3

#### 2.3.1. Biegeknicken für Normalkraft gemäß EN 1993-1-1, 6.3.1

$I_p = 35420 \text{ cm}^4$ ,  $I_T = 96 \text{ cm}^4$ ,  $i_p^2 = 35850 \text{ mm}^2$ ,  $c^2 = 67105 \text{ mm}^2$ ,  $i_m^2 = 35850 \text{ mm}^2$

Biegeknicken um die y-Achse:

$i_y = 184.8 \text{ mm}$ ,  $\beta_z = 1.00$  ( $\perp$  z-Achse),  $L_{cr,z} = 3.000 \text{ m}$ ,  $\lambda_1 = 76.409$

$\lambda_y = 1.062$ , y-Knicklinie a  $\Rightarrow \alpha_y = 0.21$ ,  $\Phi_y = 1.155$ ,  $\chi_y = 0.622$ ,  $N_{by,Rd} = 1983.40 \text{ kN}$

Biegeknicken um die z-Achse:

$i_z = 41.2 \text{ mm}$ ,  $\beta_y = 1.00$  ( $\perp$  y-Achse),  $L_{cr,y} = 15.000 \text{ m}$ ,  $\lambda_1 = 76.409$

$\lambda_z = 0.952$ , z-Knicklinie b  $\Rightarrow \alpha_z = 0.34$ ,  $\Phi_z = 1.081$ ,  $\chi_z = 0.628$ ,  $N_{bz,Rd} = 2001.21 \text{ kN}$

#### 2.3.1.1. Ausnutzungen

Lk	$N_d$ kN	$U_y$ -	$U_z$ -
1	24.00	0.012	0.012

Der Nachweis des Biegedrillknickens beinhaltet den Biegeknickenachweis, der um beide Achsen nur für die Normalkraft geführt wird. Die Knicklänge senkrecht zur z-Achse wird durch die Querträger reduziert auf  $L_{cr,z} = 15 / 5 = 3 \text{ m}$ . Die Knicklinien werden vom Programm bestimmt.

Das Biegeknicken ist hier also unbedeutend.

#### 2.3.2. Biegedrillknicken gemäß EN 1993-1-1 6.3.2 um die z-Achse

$c^2 = 67105 \text{ mm}^2$ , Knicklinie c  $\Rightarrow \alpha_{LT} = 0.49$ ,  $N_{cr} = 3868.88 \text{ kN}$

#### 2.3.2.1. Ausnutzungen

Lk	$M_{cr}$ kNm	$\lambda_{LT}$ -	f -	$\Phi_{LT}$ -	$\chi_{LT}$ m	$\chi_{LT,mod}$ m	$M_{Ed}$ kNm	$M_{b,Rd}$ kNm	U -
1	835.08	0.851	0.955	0.882	0.732	0.766	314.25	420.87	0.747

Der Biegedrillknickenachweis wird für das Biegemoment um die schwache Achse (z-Achse) geführt. Die Berechnung von

$c^2$  erfolgt mit dem geänderten Torsionsträgheitsmoment  $I_T^*$  durch die drehelastische Einspannung der Querträger. Die Knicklinie wird vom Programm bestimmt.



Die ausgewiesenen Ausnutzungen für das reine Biegeknicken und Biegedrillknicken brauchen nicht nachgewiesen zu werden, da sie in die Interaktionsgleichungen eingehen.

### 2.3.3. Interaktion

Lk	G1.	$C_{my}$	$k_{yy}$	$C_{mLT}$	$k_{zy}$	U
1	(6.61) (6.62)	0.400 ---	0.404 ---	0.950 0.950	--- 0.998	0.314 <b>0.757</b>

max U = 0.757 < 1 **ok**

Bei der Beanspruchung Normalkraft mit Biegemoment sind die Interaktionsgleichungen (6.61) und (6.62) auszuwerten.

## 3. Endergebnis

Maximale Ausnutzung U = 0.757 < 1 **ok**

c/t-Ausnutzung U = 0.611 < 1 **ok**

### Nachweis erbracht

Im Endergebnis wird die maximale Ausnutzung aus den Stabilitäts- und Spannungsnachweisen ausgegeben. Die c/t-Ausnutzung wird separat angeführt.

### Bsp. 2: Stütze, seitlich gehalten, HE200B, S235, $t_{fi} = 15$ min, Putzbekleidung, allseitig beflammt (aus Fire Design of Steel Structures, Bsp. 5.9, modifiziert)

Eine durchlaufende Stütze ist in der Zwischenetage (Geschosshöhe 3 m) eines aussteifenden Rahmens zu untersuchen. Sie wird zusätzlich zur Druckkraft durch ein Biegemoment (linearer Verlauf) beansprucht. Sie soll im Brandfall 30 min standhalten und wird daher mit Wärmedämmschutz versehen. Der Querschnitt ist allseitig beflammt.

Die Schnittgrößen sind für einen Biegedrillknicknachweis N+M<sub>y</sub> (Momentenverlaufstyp 2 mit  $\psi = -1$ ) definiert.

### 1.8. Bemessungsschnittgrößen (Lastkombinationen)

Lk	N <sub>d</sub> kN	Typ -y-	M <sub>0y,d</sub> kNm	$\psi_y$	$k_{c,y}$	$\zeta_y$
1	800.00	2	50.00	-1.000	0.602	2.555

N<sub>d</sub>: konstante Normalkraft im Stab; Typ (y): Momentenverlaufstyp je Richtung; M<sub>0y,d</sub>,  $\psi_y$ : Bezugsgrößen des Momentenverlaufs  
k<sub>c,y</sub>,  $\zeta_y$ : Beiwerte für die Berechnung

#### Momentenverlaufstypen



Die Angaben für die Berechnung der Querschnittstemperatur und der daraus folgenden reduzierten Tragfähigkeit betreffen

### 1.9. Brandschutznachweis

thermische Beanspruchung mit der Einheitstemperaturkurve, Feuerwiderstandsdauer  $t = 30.0$  min

Profil allseitig beflammt

Wärmedämmschutz durch Putzbekleidung n. EC 3-1-2, Anhang AA:

Wärmeleitfähigkeit  $\lambda_p = 0.12$  W/(m·K), spezifische Wärmekapazität  $c_p = 1100$  J/(kg·K), Rohdichte  $\rho_p = 550$  kg/m<sup>3</sup>

Dicke des Dämmstoffs  $d_p = 5.0$  mm

Rohdichte Stahl 7850.0 kg/m<sup>3</sup>, Raumtemperatur 20.0 °C

Brandschutznachweis auf Traglastebene

Anpassungsfaktoren der Biegemomente für eine ungleichmäßige Temperaturverteilung

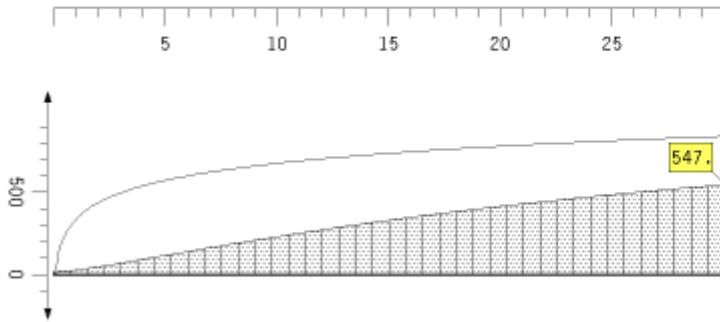
über den Querschnitt  $\kappa_1 = 1.00$ , entlang des Trägers  $\kappa_2 = 1.00$

## 2. Querschnittstemperatur

innere Abwicklung der brandbeanspruchten profilfolgenden Verkleidung  $A_p = 1151.1 \text{ mm}^2/\text{mm}$

Profilfaktor des geschützten Bauteils  $A_p/V = 1151.1 / 7808.1 \cdot 10^3 = 147.4 \text{ 1/m}$

Temperaturentwicklung:



Temperatur in °C  
Brandzeit in min  
max  $T_a = 547.2^\circ\text{C}$   
max  $t = 30 \text{ min}$

Querschnittstemperatur nach  $t = 30.0 \text{ min}$ :  $T_a = 547.2^\circ\text{C}$

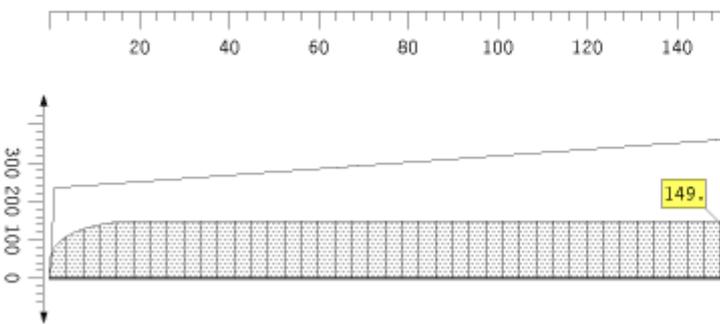
Im Brandfall sinkt die Festigkeit des Stahls z.T. massiv. Die thermische Beanspruchung ergibt eine Stahltemperatur von  $T_a = 547^\circ\text{C}$  für das wärme gedämmte Profil. Die Temperaturentwicklung des Stahlquerschnitts im zeitlichen Verlauf wird im Bezug zur Einheitstemperaturkurve dargestellt.

Abminderungsfaktoren:  $k_{y,fi} = 0.634$ ,  $k_{E,fi} = 0.463$

Materialkennwerte:  $f_{y,fi} = 148.9 \text{ N/mm}^2$ ,  $E_{fi} = 97242.3 \text{ N/mm}^2$

Grenzdehnungen:  $\epsilon_{y,fi} = 20\text{‰}$ ,  $\epsilon_{t,fi} = 150\text{‰}$

Spannungsdehnungslinie:



Spannung in  $\text{N/mm}^2$   
Dehnung in ‰  
max  $f_{y,fi} = 148.9 \text{ N/mm}^2$   
max  $\epsilon_{fi} = 150.0\text{‰}$

Infolge der Temperaturbelastung sinken die Festigkeitswerte auf  $f_{y,fi} = k_{y,fi} \cdot f_y = 149 \text{ N/mm}^2$  und  $E_{fi} = k_{E,fi} \cdot E = 97242 \text{ N/mm}^2$ . Die Spannungsdehnungslinie des heißen Stahls wird im Vergleich zur 'kalten' Spannungsdehnungslinie dargestellt.

Die Nachweise werden unter Beachtung der Regeln des EC 3-1-2 geführt.

## 3. Nachweise

### 3.1. Querschnittsklassifizierung

#### 3.1.1. Lastkombination 1 $\Rightarrow$ Querschnittsklasse 1

Nr	c mm	t mm	c/t	$\epsilon$	$\sigma_1$ N/mm <sup>2</sup>	$\sigma_2$ N/mm <sup>2</sup>	Tab 5.2	$\alpha$	$\psi$	$k_\sigma$	Klasse
1	77.5	15.0	5.17	0.850	183.57	183.57	Eins. 1/1	---	---	---	1
2	77.5	15.0	5.17	0.850	183.57	183.57	Eins. 1/1	---	---	---	1
3	134.0	9.0	14.89	0.850	161.20	43.66	Beids. 3/1	1.000	---	---	1
4	77.5	15.0	5.17	0.850	21.29	21.29	Eins. 1/1	---	---	---	1
5	77.5	15.0	5.17	0.850	21.29	21.29	Eins. 1/1	---	---	---	1

Druckspannungen haben entsprechend EC 3 ein positives Vorzeichen.

Die Querschnittsklassifizierung im Brandfall erfolgt nach EC 3-1-2, 4.2.2.

Die Nachweise erfolgen in der kleinstmöglichen Querschnittsklasse 1:  $U_{c/t} = 0.675 < 1$  **ok**

Zunächst wird die minimale Querschnittsklasse unter Brandschutzbedingungen bestimmt.

Die Ausnutzung  $U_{c/t} = (\text{vorh } c/t) / (\text{erf } c/t) = 0.675$  wird protokolliert.

### 3.2. Biegedrillknicken

#### 3.2.1. Biegeknicken für Normalkraft

$$I_p = 7700 \text{ cm}^4, I_T = 60 \text{ cm}^4, i_p^2 = 9859 \text{ mm}^2, c^2 = 4747 \text{ mm}^2, i_m^2 = 9859 \text{ mm}^2$$

Biegeknicken um die y-Achse:

$$i_y = 85.4 \text{ mm}, \beta_z = 0.50 (\perp z\text{-Achse}), L_{cr,z} = 1.500 \text{ m}, \lambda_1 = 80.284$$

$$\lambda_y = 0.219, \text{ y-Knicklinie 'Brand'} \Rightarrow \alpha_y = 0.65, \Phi_y = 0.595, \chi_y = 0.871, N_{by,Rd} = 1012.69 \text{ kN}$$

Biegeknicken um die z-Achse:

$$i_z = 50.6 \text{ mm}, \beta_y = 0.50 (\perp y\text{-Achse}), L_{cr,y} = 1.500 \text{ m}, \lambda_1 = 80.284$$

$$\lambda_z = 0.369, \text{ z-Knicklinie 'Brand'} \Rightarrow \alpha_z = 0.65, \Phi_z = 0.688, \chi_z = 0.788, N_{bz,Rd} = 916.49 \text{ kN}$$

##### 3.2.1.1. Ausnutzungen

Lk	N <sub>d</sub> kN	U <sub>y</sub>	U <sub>z</sub>
1	800.00	0.790	0.873

Anschließend wird der Biegeknicknachweis für beide Richtungen geführt. Die Knicklänge entspricht bei eingespannten Stützen  $L_{cr,z} = L_{cr,y} = 0.5 \cdot L = 1,5 \text{ m}$ . Die berechneten Ausnutzungen sind Zwischenergebnisse und müssen nicht nachgewiesen werden.

#### 3.2.2. Biegedrillknicken für Biegung um die y-Achse

$$c^2 = 4747 \text{ mm}^2, \text{ Knicklinie 'Brand'} \Rightarrow \alpha_{LT} = 0.65, N_{cr} = 8531.05 \text{ kN}$$

##### 3.2.2.1. Ausnutzungen

$$\text{Brandfall: } M_{Ed} = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot M_{Ed}$$

Lk	Klasse	M <sub>cr</sub> kNm	$\lambda_{LT}$	f	$\Phi_{LT}$	$\chi_{LT}$ m	$\chi_{LT,mod}$ m	M <sub>Ed</sub> kNm	M <sub>b,Rd</sub> kNm	U
1	1 $\Rightarrow W_{p1,y}$	1501.52	0.253	1.000	0.614	0.852	0.852	50.00	81.58	0.613

#### 3.2.3. Interaktionsnachweis nur mit Gl. (4.21a,c)

Lk	Gl.	$\mu_y$	$k_y$	$\mu_{LT}$	$k_{LT}$	U
1	(4.21a)	0.800	0.368	---	---	0.982

$$\max U = 0.982 < 1 \text{ ok}$$

Da die Stütze seitlich (d.h. in z-Richtung) gehalten ist, wird nur die Interaktionsgleichung (4.21a für Querschnittsklasse 1) ausgewertet.

