

# Verbundbau - WS 2014/2015

2./3. Vorlesung / Übung

Daniel Pak

16.10.2014

23.10.2014



## Terminübersicht und Übungsinhalte

Termin	Thema	Inhalt
09.10.2014	Einführung ULS 1	Übersicht Stahlbau IV, Vorstellung der PVL, Allgemeines zum Verbundbau, Klassifizierung, Schnittgrößenermittlung
<b>16.10.2014</b>	<b>ULS 2</b>	<b>plastische Momententragfähigkeit</b>
<b>23.10.2014</b>	<b>ULS 3</b>	<b>elastische Momententragfähigkeit, Biegung und Querkraft</b>
06.11.2014	ULS 4, Verbundmittel	Verbundmittel
13.11.2014	Biegedrillknicken	Biegedrillknicken
20.11.2014	Verbundstützen 1	Einführung, Berechnungsverfahren
27.11.2014	Verbundstützen 2 Berechnung nach Elastizitätstheorie 1	Interaktion Biegung+Normalkraft
04.12.2014	Berechnung nach Elastizitätstheorie 2	Berücksichtigung zeitabhängigem Verhaltens, Gesamtquerschnittsverfahren
18.12.2014	Berechnung nach Elastizitätstheorie 3	Berücksichtigung zeitabhängigem Verhaltens, Gesamtquerschnittsverfahren
08.01.2015	Berechnung nach Elastizitätstheorie 4 Verbunddecken	Gesamtquerschnittsverfahren Einführung, Berechnungsverfahren
15.01.2015	Verbunddecken Anschlüsse im Verbundbau	Berechnungsbeispiel Entwurf von Anschlüssen
22.01.2015	Erhaltung stählerner Tragwerke	Richtlinien (Brückenbauwerke) Praxisbeispiel Eisenbahnhochbrücke Hochdonn

## Normen

- Erhältlich als Download in [www.perinorm.com](http://www.perinorm.com)  
DIN EN 1994-1-1 + NA



## Weitere Literatur

- Kuhlmann, U., Stahlbau Kalender 2010 (Verbundbau), Ernst & Sohn, Berlin 2010
- Minnert, J., Wagenknecht, G., Verbundbau-Praxis, Berechnung und Konstruktion nach Eurocode 4, Beuth Verlag, Berlin 2013

## Grenzzustand der Tragfähigkeit: Plastische Bemessung (Zusammenfassung)

### 1. Grenzzustand der Tragfähigkeit für Biegung

#### 1.1 Berechnungsannahmen

##### Allgemein:

- Lineare Dehnungsverteilung mit bilinearen Spannungs-Dehnungs-Beziehungen
- Zugdehnungen im Stahl sind unbegrenzt
- Unbeschränkte Dehnungen bei druckbeanspruchten Stahlteilen zulässig wenn Instabilitäten infolge örtlichen Beulens oder ein seitliches Ausweichen der gedrückten Untergurte im Bereich negativer Biegemomente ausgeschlossen ist
- Einfluss des Betonstahls bei positiver Momentenbelastung vernachlässigbar

**Achtung:** Mitwirkung des Betons auf Zug darf bei Tragfähigkeitsnachweisen nicht berücksichtigt werden

DIN EN 1994-1-1:2010-12, Kap. 6.2.1.2 (1)

### Querschnittsklasse 1 und 2:

- Keine Gefahr hinsichtlich örtlichen Stabilitätsversagens infolge Beulen
- Plastische Momententragfähigkeit darf angesetzt werden

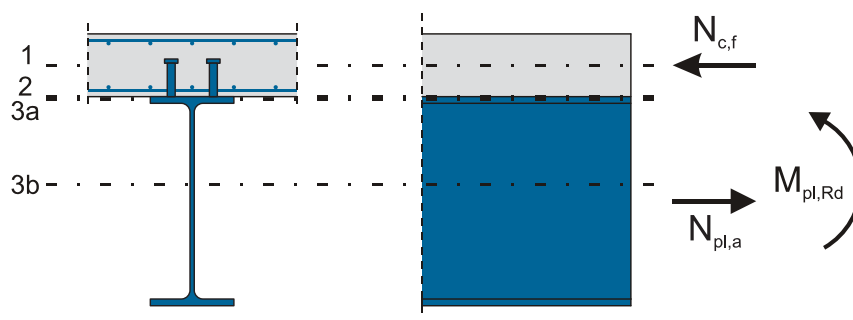
### Querschnittsklasse 3 und 4:

- Ermittlung der Momententragfähigkeit elastisch-elastisch unter Einhaltung der Grenzdehnungen im Betongurt bzw. in den gedrückten Stahlteilen
- Berechnung der elastischen Momententragfähigkeit unter Berücksichtigung eines effektiven Querschnitts für Klasse 4

### 1.2 plastische Momententragfähigkeit (QKL 1+2) – positive Momentenbeanspruchung

#### Allgemein:

- Jede Querschnittsfaser plastiziert ohne Begrenzung der Dehnung (siehe 1.1)
- Vollständige Verdübelung



Maximal aufnehmbare Normalkräfte im Querschnitt:

- Beton:  $N_{c,f} = 0,85 \cdot f_{cd} \cdot A_c$

- Baustahl:  $N_{pl,a} = f_{yd} \cdot A_a$

- Betonstahl:  $N_s = f_{sd} \cdot A_s$

→ Bedingung:  $\sum H = 0$

3 Fälle für die Lage der plastischen Nulllinie:

1. Plastische Nulllinie im Betongurt:
2. Plastische Nulllinie in der Verbundfuge:
3. Plastische Nulllinie im Stahlträger
  - a) Plastische Nulllinie im oberen Flansch des Stahlträgers
  - b) Plastische Nulllinie im Steg des Stahlträgers

1./2.: Plastische Nulllinie im Betongurt / in der Verbundfuge:

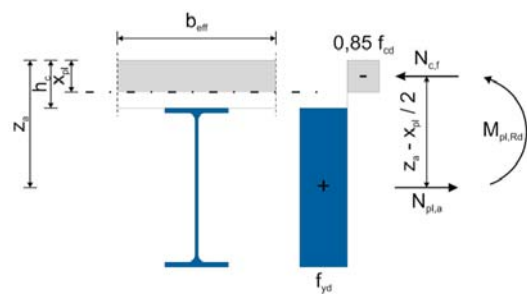


Abbildung 2-4: Positive Momentenbeanspruchung – Nulllinie liegt im Betongurt

$$x_{pl} = \frac{N_{pl,a}}{0,85 \cdot f_{cd} \cdot b_{eff}}$$

$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left( x_a - \frac{x_{pl}}{2} \right)$$

## 3.a): Plastische Nulllinie im oberen Flansch des Stahlträgers:

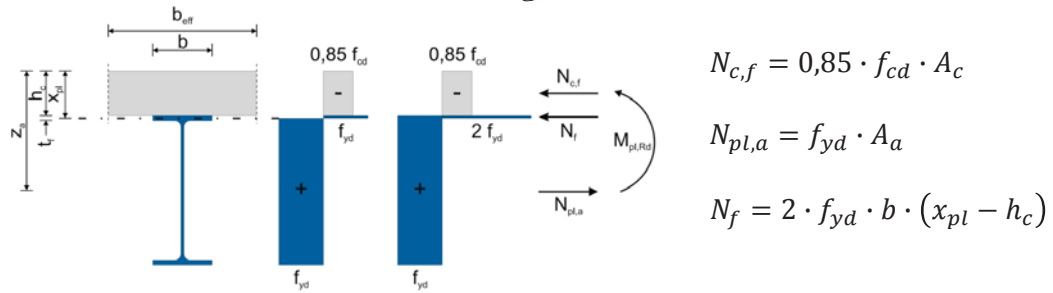


Abbildung 2-5: Positive Momentenbeanspruchung – Nulllinie liegt im oberen Flansch des Stahlträgers

$$x_{pl} = \frac{N_{pl,a} - N_{c,f}}{2 \cdot f_{yd} \cdot b} + h_c$$

$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left( x_a - \frac{h_c}{2} \right) - N_f \cdot \frac{x_{pl}}{2}$$

## 3.b): Plastische Nulllinie im Steg des Stahlträgers:

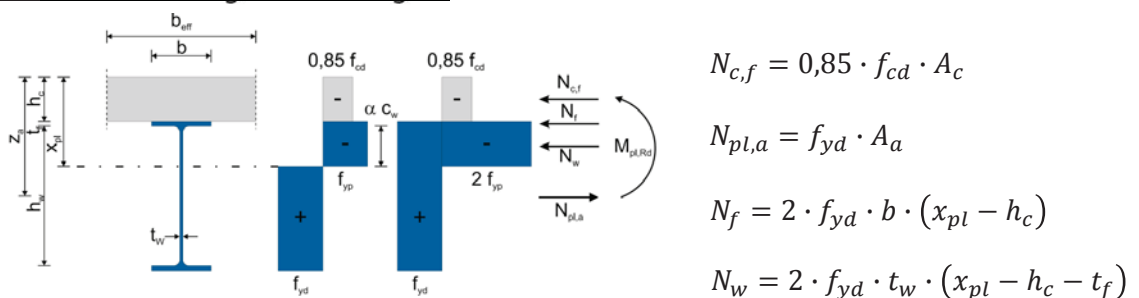


Abbildung 2-6: Positive Momentenbeanspruchung – Nulllinie liegt im Steg des Stahlträgers

$$x_{pl} = \frac{N_{pl,a} - N_{c,f} - N_f}{2 \cdot f_{yd} \cdot t_w} + h_c + t_f$$

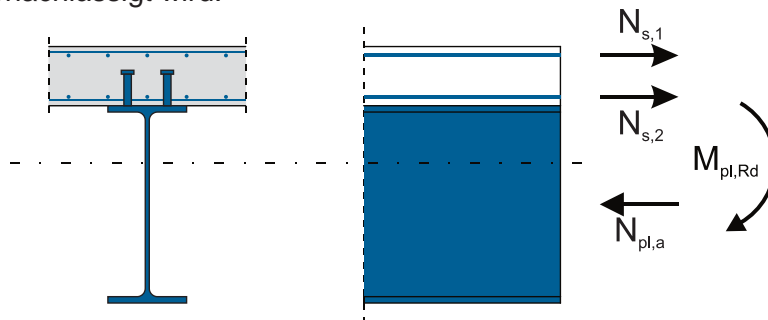
$$M_{pl,Rd} = N_{pl,a} \cdot \left( x_a - \frac{h_c}{2} \right) - N_f \cdot \frac{h_c + t_f}{2} - N_w \cdot \frac{x_{pl} + t_f}{2}$$

### 1.3 plastische Momententragfähigkeit (QKL 1+2) – negative Momentenbeanspruchung

#### Allgemein:

- Für Querschnitte der Klassen 1 und 2 darf die Momententragfähigkeit im Bereich negativer Biegemomente ebenfalls plastisch bemessen werden, wenn ein Versagen infolge Biegedrillknicken ausgeschlossen ist.
- Dabei wird der Betonstahl berücksichtigt, während die Zugtragfähigkeit des Betons vernachlässigt wird.

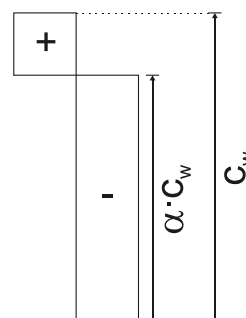
DIN EN 1994-1-  
1:2010-12, Kap.  
6.2.1.1 (4)



#### Maximal aufnehmbare Normalkräfte im Querschnitt:

- Beton:
- Baustahl:  $N_{pl,a} = f_{yd} \cdot A_a$ 
  - im Flansch:  $N_f = 2 \cdot f_{yd} \cdot b \cdot t_f$
  - im Steg:  $N_w = 2 \cdot f_{yd} \cdot (x_{pl} - h_c - t_f) \cdot t_w$
- Betonstahl:  $N_{s,i} = f_{sd} \cdot A_{S,i}$
- Wert  $\alpha$  zur Klassifizierung des Steges:

$$\alpha = 1 - \left( \frac{N_{pl,a} - \sum N_{s,i} - N_f}{2 \cdot f_{yd} \cdot t_w \cdot c_w} \right)$$



## Beispiel 2: plastische Momententragfähigkeit

### positive Momentenbeanspruchung

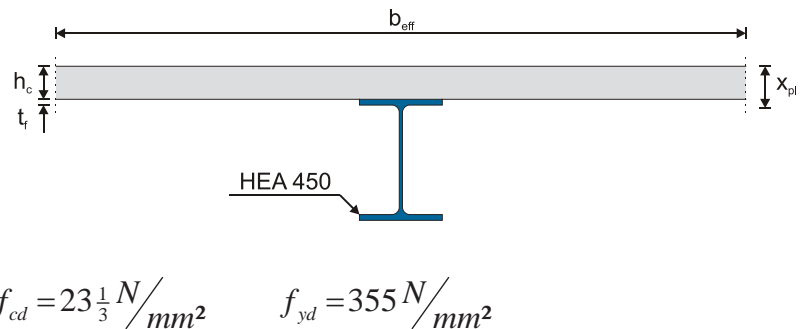
$$b_{eff} =$$

$$h_c =$$

$$t_f =$$

$$A_c =$$

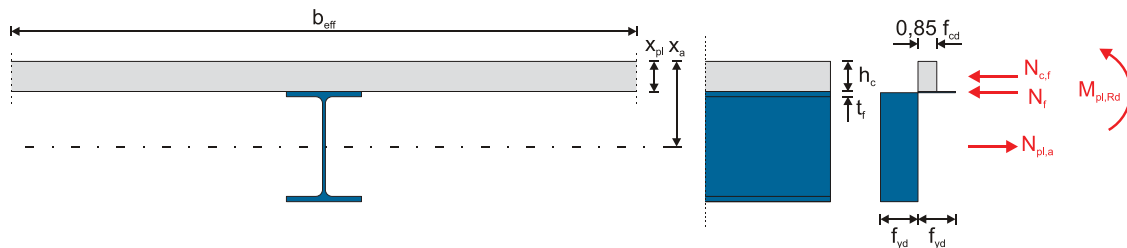
$$A_a =$$



**Ziel:** Ermittlung der plastischen Momententragfähigkeit des Verbundträgers unter positiver Momentenbeanspruchung

### Berechnung der plastischen Nulllinie

## Berechnung des plastischen Momentes



Nachweis:  $M_{pl,Rd} > M_{Ed}$

## Beispiel 3: plastische Momententragfähigkeit negative Momentenbeanspruchung

$$h_a =$$

$$b =$$

$$t_f =$$

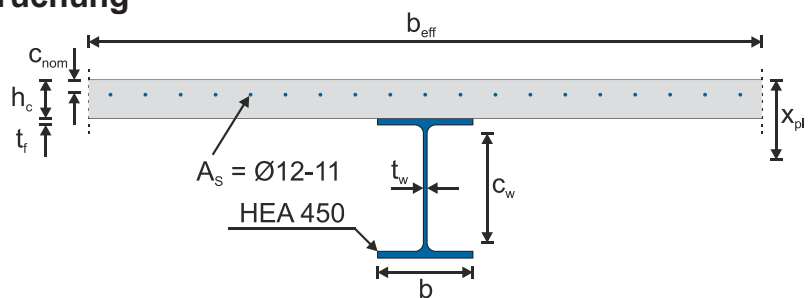
$$t_w =$$

$$c_w =$$

$$A_a =$$

$$A_s = \pi \cdot \frac{d_s^2}{4} \cdot \frac{b_{eff}}{s} =$$

**Ziel:** Ermittlung der plastischen Momententragfähigkeit des Verbundträgers unter negativer Momentenbeanspruchung



$$b_{eff} =$$

$$h_c =$$

$$c_{nom} =$$

$$A_c =$$

$$f_{yd} = 355 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{sd} = 435 \text{ N/mm}^2$$



### Berechnung der Normalkräfte

### Berechnung der plastischen Nulllinie

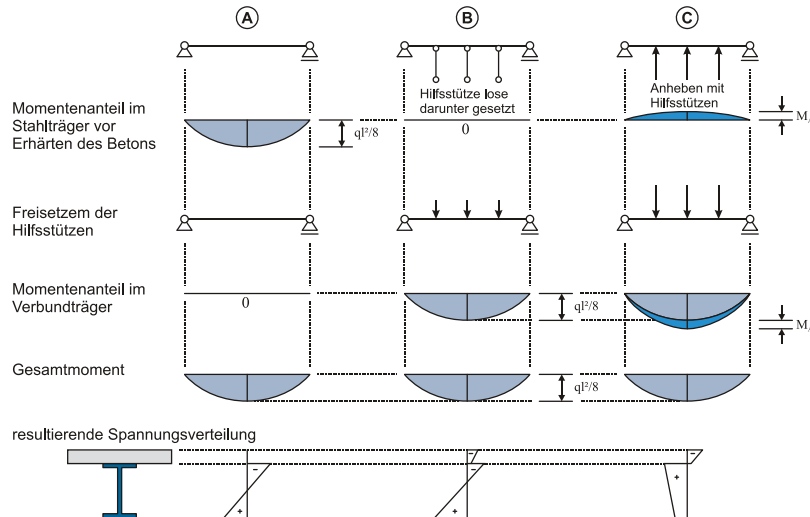
### Berechnung des plastischen Momentes

- Bezugslinie: obere Randfaser des Betons

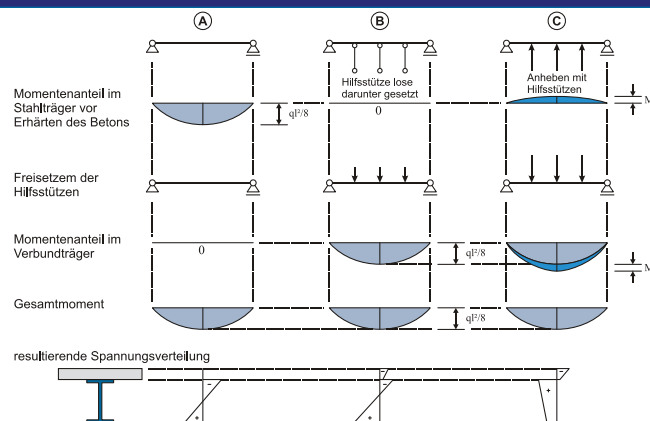
## 2. Elastische Momententragfähigkeit (Querschnittsklassen 3 und 4)

### 2.1 Einfluss der Belastungsgeschichte

- Die Randspannungen sind im Stahlträger und im Betongurt auf die jeweiligen Bemessungswerte der Festigkeiten zu beschränken
- Die Einflüsse aus Kriechen sowie die Belastungsgeschichte sind dabei zu erfassen



## Grenzzustand der Tragfähigkeit: Elastische Bemessung



**Träger A:** Eigengewicht wird vom Stahlquerschnitt aufgenommen. Erst die Ausbau- und Verkehrslasten wirken nach dem Erhärten des Betons auf den Verbundträger.

**Träger B:** Alle Lasten inkl. Eigengewicht wirken auf den Verbundquerschnitt.

**Träger C:** Vor dem Betonieren werden die Hilfsstützen angedrückt; der Stahlträger dadurch vorgespannt.

## 2.2 Berechnung des elastischen Grenztragemomentes (QKL 3) (Eigengewichtsverbund)

## 2.2 Berechnung des elastischen Grenztragemomentes (QKL 3) (EG auf Stahlträger)

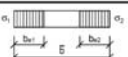

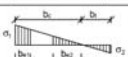
## 2.3 Berechnung des elastischen Grenztragemomentes (QKL 4)

Bei Querschnitten der Klasse 4 ist zusätzlich das Beulen zu berücksichtigen und die effektiven Widerstandsgrößen (vgl. Stahlbau III) sind zu berechnen.


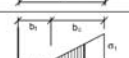


## Grenzzustand der Tragfähigkeit: Elastische Bemessung

DIN EN 1993-1-5:2010-12, Tab. 4.1 & 4.2

**Tabelle 4.1:** zweiseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)	Wirksame Breite $h_{eff}$
	$\psi = 1$ : $h_{eff} = \rho \cdot h$ $h_{e1} = 0,5 h_{eff}$ $h_{e2} = 0,5 h_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$ : $h_{eff} = \rho \cdot h$ $h_{e1} = \frac{2}{5 - \psi} h_{eff}$ $h_{e2} = h_{eff} - h_{e1}$
	$\psi < 0$ : $h_{eff} = \rho \cdot h_c = \rho \cdot h(1 - \psi)$ $h_{e1} = 0,4 h_{eff}$ $h_{e2} = 0,6 h_{eff}$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1 $-1 > \psi > -3$
Beulwert $k_\sigma$	4,0 $8,2 / (1,05 + \psi)$ 7,81 $7,81 - 6,29 \psi + 9,78 \psi^2$ 23,9 $5,98 (1 - \psi)^2$

**Tabelle 4.2:** einseitig gestützte druckbeanspruchte Querschnittsteile

Spannungsverteilung (Druck positiv)	Wirksame Breite $h_{eff}$
	$1 > \psi \geq 0$ : $h_{eff} = \rho \cdot c$
	$\psi < 0$ : $h_{eff} = \rho \cdot h_c = \rho \cdot c(1 - \psi)$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1   0   -1 $1 \geq \psi \geq -3$
Beulwert $k_\sigma$	0,43   0,57   0,85 $0,57 - 0,21 \psi + 0,07 \psi^2$
	$1 > \psi \geq 0$ : $h_{eff} = \rho \cdot c$
	$\psi < 0$ : $h_{eff} = \rho \cdot h_c = \rho \cdot c(1 - \psi)$
$\psi = \sigma_2 / \sigma_1$	1 $1 > \psi > 0$ 0 $0 > \psi > -1$ -1
Beulwert $k_\sigma$	0,43 $0,578 / (\psi + 0,34)$ 1,70 $1,7 - 5 \psi + 17,1 \psi^2$ 23,8

### Beispiel 4: elastische Momententragfähigkeit

Beanspruchung gemäß Skizze:

$$M_{a,Ed} = 3300 \text{ kNm}$$

$$M_{c,Ed} = 5700 \text{ kNm}$$

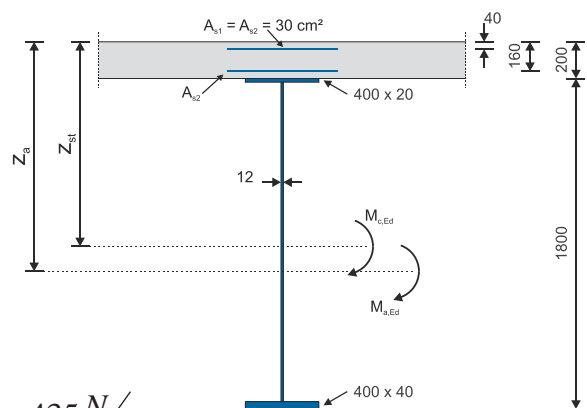
Betonstahl S 500:

$$f_{sk} = 500 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_s = 1,15 \quad f_{sd} = \frac{f_{sk}}{\gamma_s} = 435 \text{ N/mm}^2$$

Baustahl S 355:

$$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M0} = 1,0 \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ N/mm}^2$$

**Ziel:** Ermittlung der elastischen Momententragfähigkeit des Verbundträgers unter negativer Momentenbeanspruchung



### Querschnittswerte des Baustahlquerschnittes

## Querschnittswerte des Gesamtstahlquerschnittes

## Randspannungen im Steg

- Spannungen infolge  $M_{a,Ed} = -3300 \text{ kNm}$ :

- Spannungen infolge  $M_{c,Ed} = -5700 \text{ kNm}$ :

### Klassifizierung des Querschnittes

- Flansch

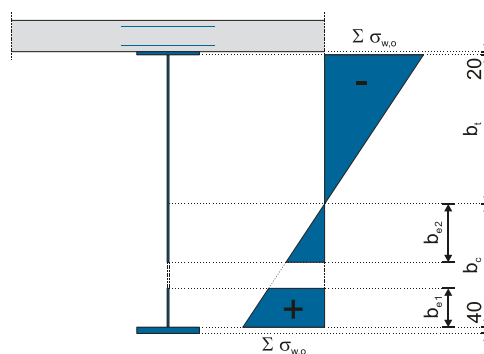
## Klassifizierung des Querschnittes

- Steg



## effektiver Stegquerschnitt

- effektiver Stegquerschnitt



Querschnittswerte des effektiven Baustahlquerschnittes

Querschnittswerte des effektiven Gesamtstahlquerschnittes

### Maßgebende Randspannungen im Stahlträger und in der Bewehrung

- Spannungen infolge  $M_{a,Ed} = -3300 \text{ kNm}$ :

- Spannungen infolge  $M_{c,Ed} = -5700 \text{ kNm}$ :

- Resultierende Spannungen im Flansch:

### **Nachweise:**

Baustahl:

Betonstahl:

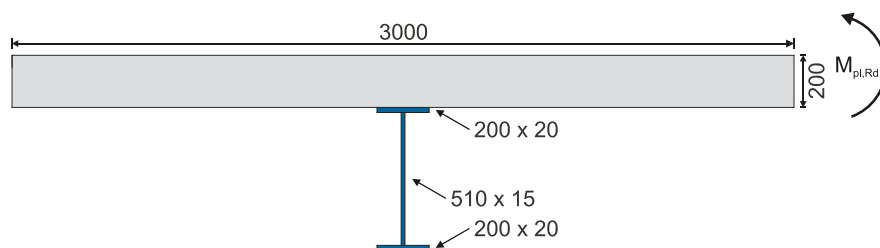
Beton:

### **3. Grenzzustand der Tragfähigkeit für Biegung und Querkraft**

#### **3.1 Reine Querkraftbeanspruchung**

#### **3.2 Interaktion: Biegung und Querkraft**

### Beispiel 5: M-V-Interaktion im ULS



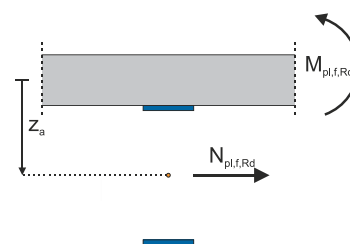
$$f_{ck} = 35 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_C = 1,5 \quad f_{cd} = \frac{f_{ck}}{\gamma_C} = 23 \frac{1}{3} \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yk} = 355 \text{ N/mm}^2 \quad \gamma_{M0} = 1,0 \quad f_{yd} = \frac{f_{yk}}{\gamma_{M0}} = 355 \text{ N/mm}^2$$

Einwirkung: plastisches Widerstandsmoment  $M_{pl,Rd} = 2179,5 \text{ kNm}$   
(ohne Berücksichtigung der Querkraft)

**Ziel:** M-V-Interaktionsdiagramm und  $M_{Rd}(V_{Ed} = 0,75 V_{pl,Rd})$

### Ermittlung des plastischen Momentes $M_{pl,f,Rd}$



### Ermittlung der plastischen Querkrafttragfähigkeit $V_{pl,Rd}$

- Klassifizierung des Steges

DIN EN 1993-1-1:2010-12,  
Tab. 5.2

- Querkrafttragfähigkeit  $V_{pl,Rd}$

### Ermittlung des Grenztragmomentes $M_{Rd}$ für $V_{Ed} = 0,75 V_{pl,Rd}$

## Zeichnen des M-V-Interaktionsdiagramms