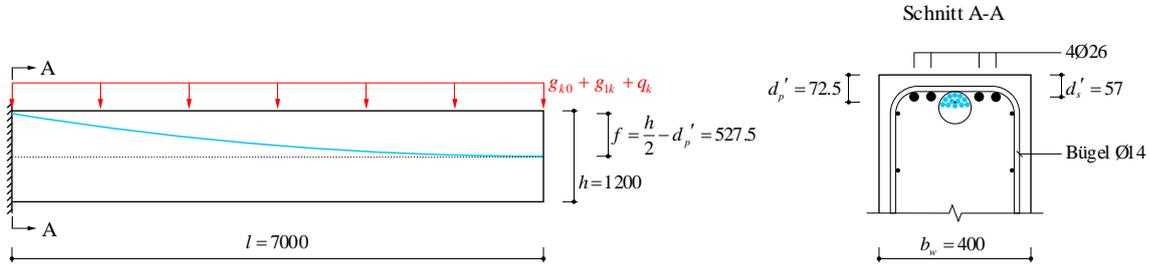


Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 1/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)

### Aufgabe 1

#### Geometrie



#### Baustoffe

Beton C30/37  $f_{cd} = 20 \text{ MPa}$   
 $E_c = 33.6 \text{ GPa}$

Betonstahl B500B  $f_{sd} = 435 \text{ MPa}$   
 $E_s = 205 \text{ GPa} \rightarrow n_s = \frac{E_s}{E_c} = 6.1$   
 $4\text{Ø}26 \rightarrow A_s = 2124 \text{ mm}^2$

Spannstahl Y1770  $f_{pk} = 1770 \text{ MPa}$   
 $E_p = 195 \text{ GPa}$   
 $A_p = 1800 \text{ mm}^2$  (12 Litzen 0.6" à 150mm)

SIA 262  
Tab. 8  
3.1.2.3.3

Tab. 9  
Fig. 16

Fig. 17

#### Einwirkungen und Schnittgrößen

Eigengewicht:  $g_{0k} = 12 \text{ kN/m}$   
Auflast:  $g_{1k} = 40 \text{ kN/m}$   
Nutzlast:  $q_k = 30 \text{ kN/m}$

$$M_k(g_{0k}, g_{1k}) = \frac{(g_{0k} + g_{1k}) \cdot l^2}{2} = 1274 \text{ kNm}$$

$$M_k(q_{tot}) = \frac{(g_{0k} + g_{1k} + q_k) \cdot l^2}{2} = 2009 \text{ kNm}$$

#### Vorspannung

System Stahlton CONA 6-12:  
 $P_0 = 0.7 \cdot f_{pk} \cdot A_p = 2230 \text{ kN}$   
 $\text{Ø}_i = 79 \text{ mm}, \text{Ø}_a = 85 \text{ mm}$   
 $\Delta s = 14 \text{ mm}$

Doku S.15

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 2/11	
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)	
<p>a) <u>Spannungen vor der Injektion im Einspannquerschnitt A-A</u></p> <p>Einwirkungen: Eigenlast und Auflast</p> <p>Annahme: Betonquerschnitt ist ungerissen</p> <p>Querschnittswerte:</p> <p>Ideeller Netto-QS: Das Spannglied wird nicht berücksichtigt und das Hüllrohr als Loch betrachtet, da kein Verbund zwischen Spannglied und Beton besteht.</p> $A_i = h \cdot b_w + A_s \cdot (n_s - 1) - \frac{\varnothing_a^2 \cdot \pi}{4} = 0.485 \text{ m}^2$ $z_{sp,i} = \frac{1}{A_i} \left( h \cdot b_w \cdot \frac{h}{2} + A_s \cdot (n_s - 1) \cdot d'_s - \frac{\varnothing_a^2 \cdot \pi}{4} \cdot (d'_p + \Delta s) \right) = 0.594 \text{ m}$ $I_i = \frac{h^3 b_w}{12} + h \cdot b_w \cdot \left( \frac{h}{2} - z_{sp,i} \right)^2 + A_s \cdot (n_s - 1) \left( z_{sp,i} - d'_s \right)^2 - \frac{\varnothing_a^2 \cdot \pi}{4} \cdot \left( z_{sp,i} - d'_p - \Delta s \right)^2 = 0.059 \text{ m}^4$ <p>Vereinfachte Rechnung mit Brutto-QS:</p> $A_{Br} = h \cdot b_w = 0.480 \text{ m}^2$ $I_{Br} = \frac{h^3 b_w}{12} = 0.058 \text{ m}^4$ <p>Spannungen:</p> $\sigma_c(z) = \frac{N}{A_i} + \frac{M}{I_i} \cdot z$ $N = -P \cdot \cos(\alpha_p)$ $M = P \cdot \cos(\alpha_p) \cdot e - M_k (g_{0k} + g_{1k})$ $\alpha_p = \arctan\left(\frac{2f}{l}\right) = 8.57^\circ$ $e = z_{sp,i} - d'_p = 0.522 \text{ m}$ $z = \begin{Bmatrix} z_{sup} \\ z_s \\ z_p \\ z_{inf} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -z_{sp,i} \\ -z_{sp,i} + d'_s \\ -z_{sp,i} + d'_p \\ h - z_{sp,i} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -0.594 \text{ m} \\ -0.537 \text{ m} \\ -0.522 \text{ m} \\ 0.606 \text{ m} \end{Bmatrix}$ $\sigma_{c,0}(z) = \begin{Bmatrix} \sigma_{c,sup,0} \\ \sigma_{cs,0} \\ \sigma_{cp,0} \\ \sigma_{c,inf,0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -3.31 \\ -3.43 \\ -3.46 \\ -5.80 \end{Bmatrix} \text{ MPa}$ <p><math>\rightarrow \sigma_{c,sup,0} = -3.31 \text{ MPa} \leq 0 \rightarrow \text{QS ungerissen, Annahme i.O.}</math></p> <p>Zur Vereinfachung könnte in erster Näherung <math>N = -P</math> und <math>M = P \cdot e - M_k</math> gesetzt werden  <math>(\cos(\alpha_p) = 0.989 \approx 1)</math>.</p>			<p>ab Trägeroberkante</p> <p>bei Hüllrohr und Betonstahl nur Steineranteil</p> <p><math>\Delta = -1\%</math></p> <p><math>\Delta = -2.8\%</math></p>

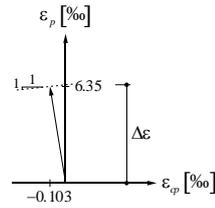
Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 3/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)

$$\sigma_{s,0} = \sigma_{cs,0} \cdot n_s = -20.9 \text{ MPa}$$

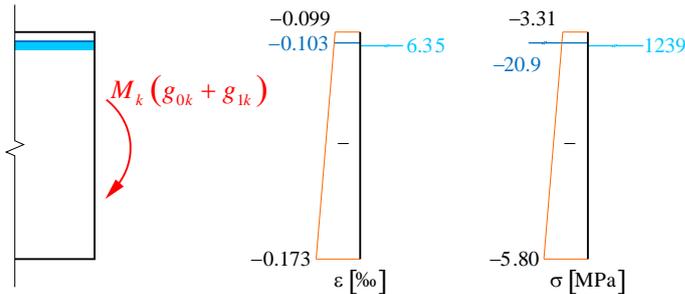
$$\sigma_{p,0} = \frac{P_0}{A_p} = 1239 \text{ MPa}$$

$$\Delta\varepsilon = \varepsilon_{p,0} - \varepsilon_{cp,0} = \frac{\sigma_{p,0}}{E_p} - \frac{\sigma_{cp,0}}{E_c} = 6.354 + 0.103 = 6.46\text{‰}$$

In erster Näherung kann  $\Delta\varepsilon \approx \varepsilon_{p,0} = 6.35\text{‰}$  gesetzt werden.



$\Delta\varepsilon$  bleibt nach Injektion konstant



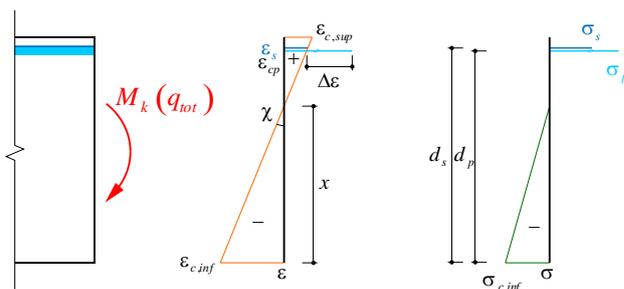
Mit Brutto-QS-Werten:

$$\sigma_{c,0}(z) = \begin{Bmatrix} \sigma_{c,sup,0} \\ \sigma_{cd,0} \\ \sigma_{cp,0} \\ \sigma_{c,inf,0} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -3.32 \\ -3.44 \\ -3.48 \\ -5.89 \end{Bmatrix} \text{ MPa}$$

Brutto-QS für erste Näherung genügend genau.

b) Spannungen nach Injektion und mit voller Gebrauchslast im Einspannquerschnitt A-A

Annahme: Beton-QS ist gerissen, linear elastisches Materialverhalten



$$d_s = h - d'_s = 1143 \text{ mm}$$

$$d_p = h - d'_p = 1128 \text{ mm}$$

Verträglichkeit:  $\chi = \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} \rightarrow \varepsilon_s = \chi(d_s - x), \varepsilon_p = \chi(d_p - x) + \Delta\varepsilon$

Materialverhalten:  $\sigma_{c,inf} = E_c \cdot \varepsilon_{c,inf}$

$$\sigma_s = \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} (d_s - x) E_s$$

$$\sigma_p = \left( \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} (d_p - x) + \Delta\varepsilon \right) E_p$$

linear elastisch

Gleichgewicht:  $\sum N = 0: \sigma_p A_p + \sigma_s A_s + \sigma_{c,inf} \cdot b \cdot \frac{x}{2} = 0$  (I)

$\sum M = 0: \sigma_p A_p \left( d_p - \frac{x}{3} \right) + \sigma_s A_s \left( d_s - \frac{x}{3} \right) = M_k (q_{tot})$  (II)

(I):  $\left( \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} (d_p - x) + \Delta\varepsilon \right) E_p A_p + \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} (d_s - x) E_s A_s + \varepsilon_{c,inf} \cdot E_c \cdot b \cdot \frac{x}{2} = 0$

(II):  $\left( \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} (d_p - x) + \Delta\varepsilon \right) E_p A_p \left( d_p - \frac{x}{3} \right) + \frac{|\varepsilon_{c,inf}|}{x} (d_s - x) E_s A_s \left( d_s - \frac{x}{3} \right) = M_k (q_{tot})$

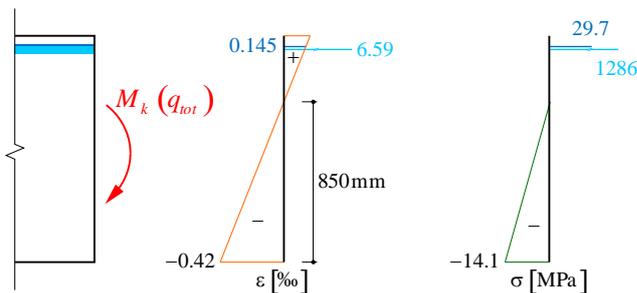
→ Zwei Gleichungen mit zwei Unbekannten →  $\varepsilon_{c,inf}, x$

(I)+(II):  $x = 850 \text{ mm}, \varepsilon_{c,inf} = -0.42\text{‰}$

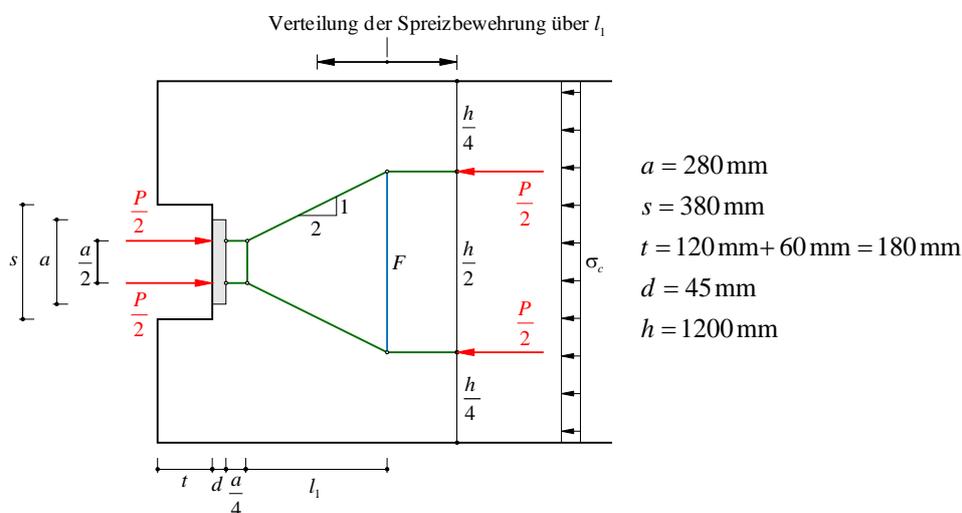
$\sigma_{c,inf} = -14.1 \text{ MPa}$

$\sigma_s = 29.7 \text{ MPa}$

$\sigma_p = 1286 \text{ MPa}$



c) Dimensionierung des Festverankerungsbereiches

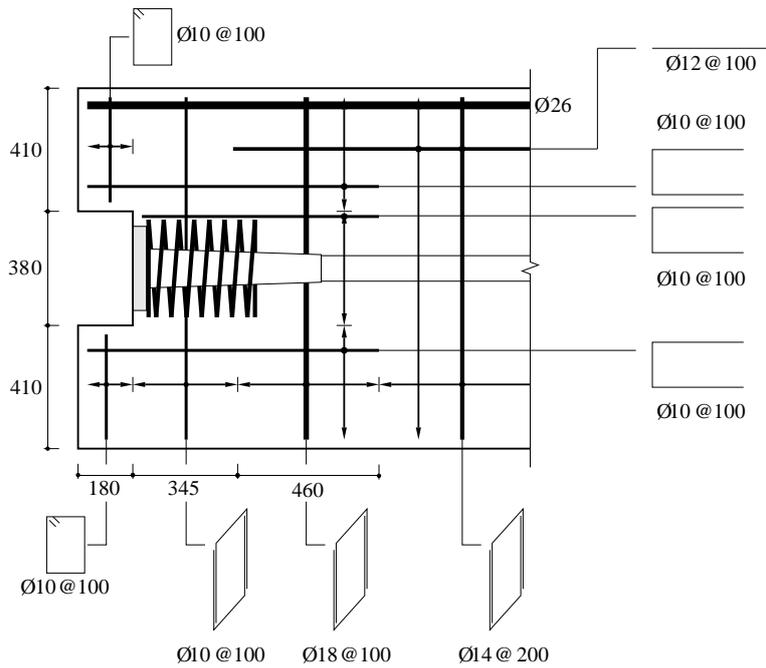


$\sigma_c = \frac{P}{A_c}, F = \frac{P}{2} \cdot \frac{1}{2} = \frac{P}{4}, l_1 = 2 \left( \frac{h}{4} - \frac{a}{4} \right) = 460 \text{ mm}$

Wahl:  
Ankerkopf  
Typ BP  
  
Doku S.19  
  
Detailing for  
Post-  
Tensioning  
S.16/17

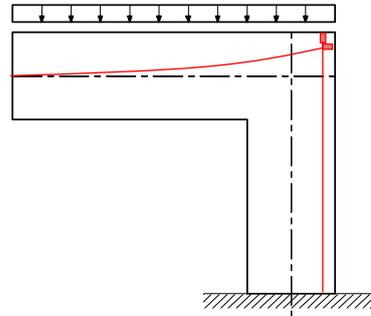
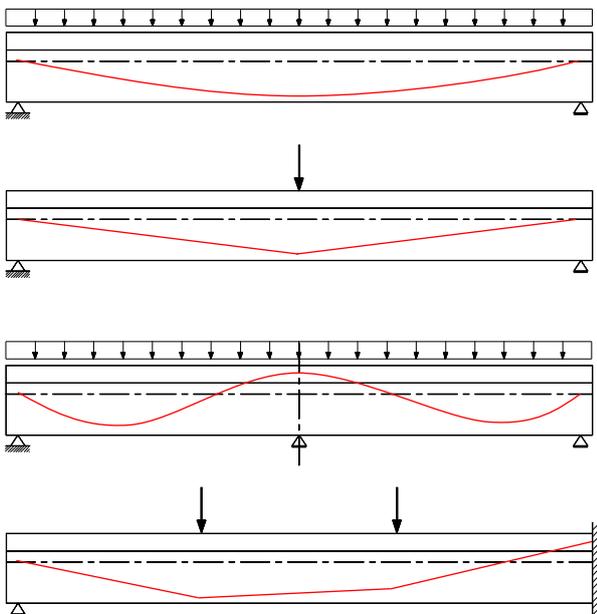
Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 5/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)
<p>Vorgehen gemäss SIA 262, 4.1.5.5.2:</p> $P_d = \gamma_d \cdot P_k = 3345 \text{ kN}$ $\gamma_d = 1.5$ $P_k = P_0$ $F = \frac{P_d}{4} = 836 \text{ kN}$ $a_{s,erf} = \frac{F}{l_1 \cdot f_{sd}} = 4178 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ <p>Vorgehen gemäss Empfehlung VSL:</p> $P = P_0 = 2230 \text{ kN}$ $\sigma_{s,adm} = 250 \text{ MPa}$ $F = \frac{P}{4} = 558 \text{ kN}$ $a_{s,erf} = \frac{F}{l_1 \cdot \sigma_{s,adm}} = 4852 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ <p>→ Wahl: Ø18 @ 100, 2-schnittig <math>\left( a_s = 5080 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right)</math></p> <p>Zur Risssicherung in den Eckbereichen ist eine verteilte Mindestbewehrung von 0.3% des Betonquerschnitts sowie konzentriert 2% von <math>P</math> anzuordnen:</p> $a_{s,min} = 0.3\% \cdot A_c = 0.3\% \cdot h \cdot b_w = 1440 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$ <p>Wahl: Ø10 @ 100, 2-schnittig <math>\left( a_s = 1570 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}} \right)</math></p> $\frac{2\% \cdot P}{\sigma_{s,adm}} = 178 \text{ mm}^2 \approx 2\text{Ø10}$ <p>Die Bemessung der Spreizbewehrung nach SIA 262 entspricht einer Bemessung auf Niveau Tragsicherheit, diejenige nach VSL eher einer solchen auf Niveau Gebrauchstauglichkeit, da damit einer schönen Rissverteilung Rechnung getragen wird.</p>		<p>Detailing for Post- Tensioning S.18</p> <p>Detailing for Post- Tensioning S.16</p>

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 6/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)



Die minimalen Abbiegeradien der Bügel (in Abhängigkeit des Durchmessers) sind zu beachten. Die konzentrierte Bewehrung an den Rändern ist in der Bewehrungsskizze nicht eingezeichnet. Es können dieselben Bewehrungspositionen wie für die verteilte Mindestbewehrung verwendet werden.

### Aufgabe 2



Es sind die minimalen Radien bei den Umlenkungen einzuhalten sowie genügend Platz für die Ankerköpfe zu berücksichtigen.

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 7/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)

### Aufgabe 3

Der Querkraftverlauf infolge der verteilten äusseren Last  $q$  ist in Abbildung 1 dargestellt. Vereinfachend wird der Nachweis bei der maximalen Querkraft am Mittelaugler geführt. Grundsätzlich muss jedoch bei vorgespannten Trägern der massgebende Querschnitt nicht zwingend bei der maximalen Querkraft auftreten, da die Kabelgeometrie einen signifikanten Einfluss hat. Der Nachweis wird hier vereinfachend direkt beim Mittelaugler und nicht im Abstand  $z \cot \alpha$  davon entfernt geführt. Die Schnittkräfte für einen Zweifeldträger können zum Beispiel aus der C4-Tabelle entnommen werden.

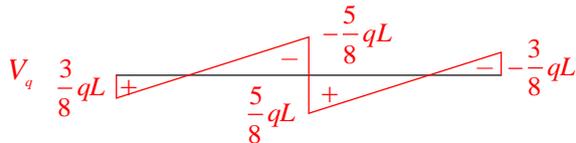


Abb. 1: Querkraftverlauf infolge der äusseren Last  $q$ .

Der Nachweis wird für eine Querkraft aus äusserer Belastung  $V_q = \frac{5}{8} qL$  geführt. Die Betondruckfeldneigung  $\alpha$  wird zu  $40^\circ$  gewählt.

Der Schubwiderstand des Trägers ohne Betrachtung der Vorspannung entspricht dem Minimum des Schubwiderstandes der Bügelbewehrung resp. des Schubwiderstandes des Druckspannungsfeldes im Steg:

$$V_{Rd,w} = \min \{ V_{Rd,c}, V_{Rd,s} \} = 353 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,s} = a_{sw} f_{sd} z \cot \alpha = 353 \text{ kN}$$

$$V_{Rd,c} = k_c f_{cd} z \sin \alpha \cos \alpha = 1408 \text{ kN}$$

$$a_{sw} = 1047 \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$$

#### a) Behandlung als Eigenspannungszustand

Bei der Behandlung als Eigenspannungszustand wird das gesamte Tragwerk betrachtet. Die Vorspannung erzeugt am Gesamtsystem keine Schnittkräfte, sondern aufgezwungene Dehnungen  $\epsilon_0$  und Krümmungen  $\chi_0$ . Im Fall von statisch unbestimmt gelagerten Systemen, sind die daraus entstehenden Verformungen allgemein nicht mit der Lagerung verträglich. Dadurch entstehen Zwangsschnittgrössen am Gesamtsystem, welche mithilfe der Kraftmethode bestimmt werden können.

$$\chi_0 = \frac{M_0}{EI}$$

Bei der Anwendung der Kraftmethode wird, wie üblich, angenommen, dass die Schubverformungen gegenüber den Durchbiegungen vernachlässigbar klein sind. Als überzählige Grösse wird eine vertikale Kraft am Ort des Mittelauglers gewählt. Die Krümmung infolge des auf den vom Spannglied befreiten Träger wirkenden Teil des Eigenspannungszustands kann mithilfe des in Abbildung 2 dargestellten Systems berechnet werden.

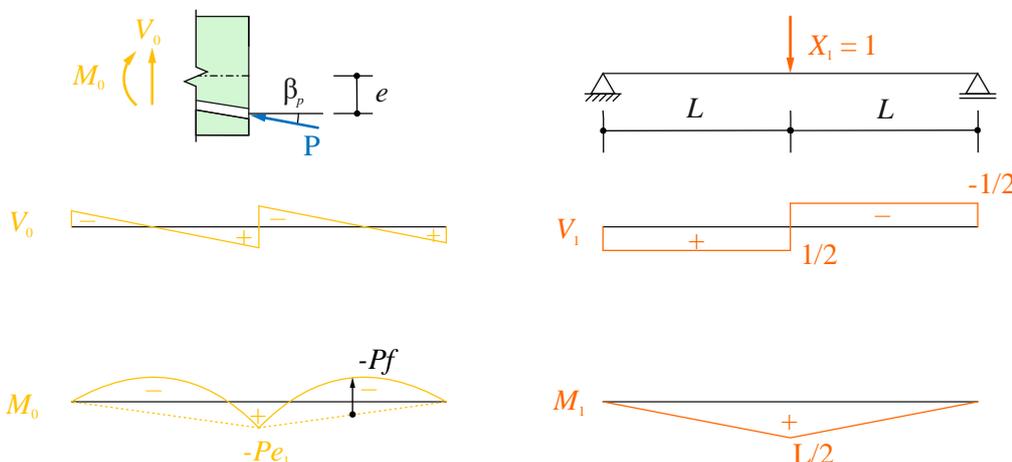


Abb. 2: Kraftmethode zur Bestimmung der Zwangsschnittgrössen..

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 8/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)

Die aufgrund der Zwängung am statisch bestimmten Grundsystem auftretende Verschiebung bei  $x = L$  beträgt:

$$\delta_{10} = \int_0^{2L} \chi_0 M_1 dx = 2 \cdot \left( \frac{1 - Pe_1}{3} \frac{L}{EI} \cdot \frac{L}{2} + \frac{1 - Pf}{3} \frac{L}{EI} \cdot \frac{L}{2} \right) = \frac{-P(e_1 + f)L^2}{3EI}$$

Die Verschiebung infolge einer Einzelkraft  $X_1 = 1$  ist:

$$\delta_{11} = \int_0^{2L} \frac{M_1^2}{EI} dx = 2 \cdot \frac{1}{3} \frac{(L/2)^2}{EI} L = \frac{L^3}{6EI}$$

Am statisch unbestimmten System ist eine vertikale Verschiebung durch das Mittelauflager verhindert. Daraus ergibt sich die Bedingung:

$$\delta_1 = \delta_{10} + X_1 \delta_{11} = 0 \Leftrightarrow X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{2P(e_1 + f)}{L}$$

Das Zwangsmoment wird durch die Zwängung am Mittelauflager generiert und beträgt also

$$M_{ps} = X_1 M_1$$

Gleichzeitig wirkt eine Zwangsquerkraft  $V_{ps} = X_1 V_1 = \pm \frac{P(e_1 + f)}{L}$

Einwirkung bei Behandlung als Eigenspannungszustand:

$$V_d = V_q + V_{ps} = \frac{5}{8} qL - \frac{P(e_1 + f)}{L} = 482 \text{ kN}$$

Der Schubwiderstand des Trägers setzt sich aus der vertikalen Komponente der diagonalen Druckkraft im Steg und der vertikalen Komponente der Vorspannkraft zusammen. Die Vorspannung wirkt „auf der Widerstandsseite“.

$$V_{Rd} = V_{Rd,w} + P \sin \beta_p = 635 \text{ kN} > 482 \text{ kN} = V_d$$

$$\beta_p = 235 \text{ mrad}$$

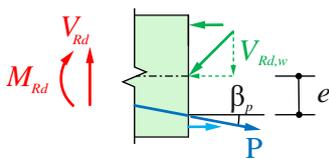


Abb. 3: Schubwiderstand mit Vorspannung „auf der Widerstandsseite“.

Dabei wird der Winkel  $\beta_p$  als Funktion der Pfeilhöhe und der Exzentrizität am Mittelauflager ausgedrückt (siehe Abbildung 4). Dabei wird, wie üblich, die Annahme getroffen, dass das Spannglied nur kleine Umlenkungen erfährt und  $\sin \beta_p \approx \beta_p$  gilt.

$$\sin \beta_p \approx \beta_p = \beta_{pD} + \beta_{pP} = \frac{-e_1}{L} + \frac{2f}{L/2} = \frac{-e_1}{L} + \frac{4f}{L} = 235 \text{ mrad}$$

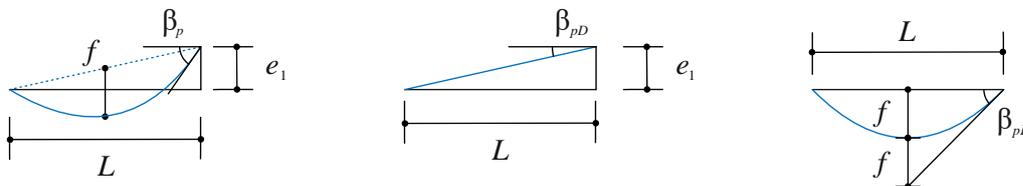


Abb. 4: Bestimmung des Winkels des Spannglieds zur Horizontalen am Mittelauflager.

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 9/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)

b) Behandlung als Anker- und Umlenkräfte

Bei der Behandlung als Anker- und Umlenkräfte wird die Vorspannung als Anker- und Umlenkräfte betrachtet, welche auf das vom Spannglied befreite Tragwerk wirken. Daraus resultieren Schnittgrößen infolge Vorspannung, welche die Zwangsschnittgrößen bereits enthalten. Eine explizite Bestimmung der Zwangsschnittgrößen ist in diesem Fall also nicht nötig. Das betrachtete statische System ist in Abbildung 5 dargestellt.

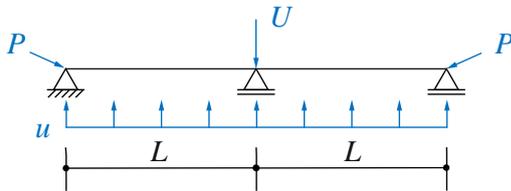


Abb. 5: Anker- und Umlenkräfte infolge Vorspannung „auf der Lastseite“.

Da es sich um ein statisch unbestimmtes System handelt, können die Schnittkräfte zum Beispiel mithilfe der Kraftmethode bestimmt werden. Im Gegensatz zur Behandlung als Eigenspannungszustand wird die Kraftmethode hier nicht angewendet um Zwangsschnittgrößen zu bestimmen, sondern um eine unbekannte Lagerkraft zu ermitteln.

Bei einfachen statischen Systemen, wie im vorliegenden Beispiel ein Zweifeldträger unter gleichmässig verteilter Last ( $P$  und  $U$  wirken direkt am Lager und haben keinen Einfluss auf die Schnittgrößen), können die Schnittgrößen auch direkt aus einem Tabellenwerk abgelesen werden. In diesem Fall ist die Behandlung als Anker- und Umlenkräfte für den Querkraftnachweis effizienter, da auf die Bestimmung der Zwangsschnittgrößen verzichtet werden kann. Die Anwendung der Kraftmethode entfällt demnach. Zu Übungszwecken wird die Kraftmethode hier trotzdem aufgezeigt:

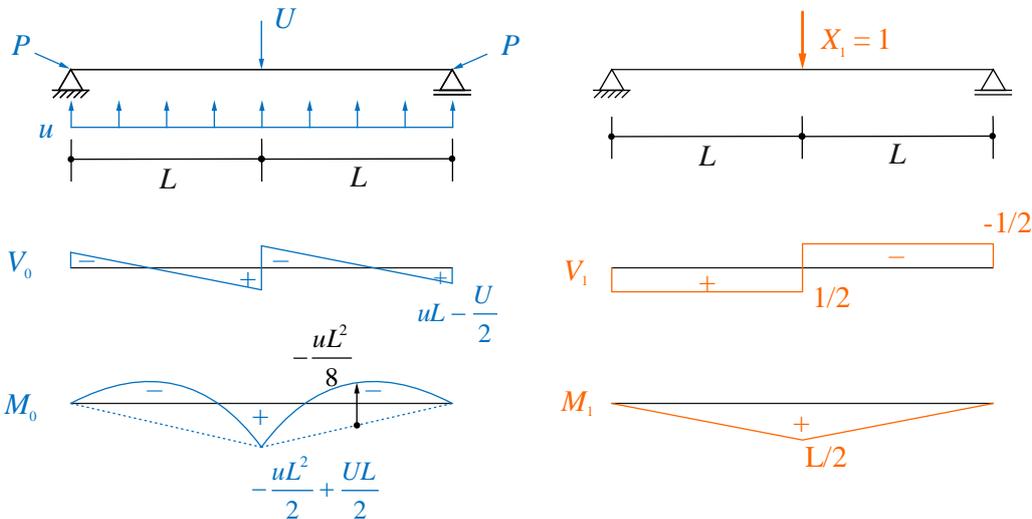


Abb. 6: Anwendung der Kraftmethode zur Bestimmung der Lagerkraft des mittleren Auflagers.

Die aufgrund der Umlenkräfte am statisch bestimmten Grundsystem auftretende Verschiebung bei  $x = L$  beträgt:

$$\delta_{10} = \int_0^{2L} \frac{M_0 M_1}{EI} dx = 2 \cdot \left( \frac{1}{3} \left( -\frac{uL^2}{2} + \frac{UL}{2} \right) \frac{L}{2} \frac{L}{EI} + \frac{1}{3} \left( -\frac{uL^2}{8} \right) \frac{L}{2} \frac{L}{EI} \right) = -\frac{5uL^4}{24EI} + \frac{UL^3}{6EI}$$

Die Verschiebung infolge einer Einzelkraft  $X_1 = 1$  ist:

$$\delta_{11} = \int_0^{2L} \frac{M_1^2}{EI} dx = 2 \cdot \frac{1}{3} \frac{(L/2)^2}{EI} L = \frac{L^3}{6EI}$$

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 10/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)

Am statisch unbestimmten System ist eine vertikale Verschiebung durch das Mittelauger verhindert. Daraus ergibt sich die Bedingung:

$$\delta_1 = \delta_{10} + X_1 \delta_{11} = 0 \Leftrightarrow X_1 = -\frac{\delta_{10}}{\delta_{11}} = \frac{5}{4} uL - U$$

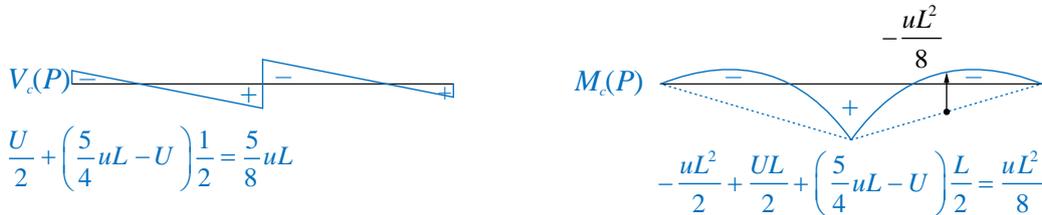


Abb. 7: Schnittgrößen infolge Vorspannung am vom Spannlied befreiten Tragwerk.

- Wie in der oberen Bemerkung bereits angedeutet fällt die Umlenkraft  $U$  über dem Auflager aus den Schnittkraftverläufen infolge Vorspannung heraus (siehe Abbildung 6)
- Im vorliegenden Beispiel wäre es bei der Anwendung der Kraftmethode einfacher ein Gelenk über dem mittleren Auflager einzuführen, da die Umlenkraft dann nicht in die Berechnungen einfließt. Das System mit entferntem Mittelauger wurde hier verwendet, damit man es besser mit Teil a) vergleichen kann.

Die Umlenkraft beträgt:  $u = \frac{8Pf}{L^2} = 48 \frac{\text{kN}}{\text{m}}$

Die Einwirkung setzt sich bei der Behandlung als Anker- und Umlenkkräfte aus der Querkraft am vom Spannlied befreiten Tragwerk und der Querkraft aus äusserer Belastung zusammen:

$$V_d = V_q + V_c(P) = \frac{5}{8} qL - \frac{5}{8} uL = 200 \text{ kN}$$

Da die Spannkraft bereits auf der Lastseite angesetzt wurde, darf nur der Widerstand des Trägers ohne Berücksichtigung der Vorspannung angesetzt werden:

$$V_{Rd} = V_{Rd,w} = 353 \text{ kN} > 200 \text{ kN} = V_d$$

c) Vergleich

Behandlung als Eigenspannungszustand:

$$\frac{5}{8} qL - \frac{P(e_1 + f)}{L} \leq V_{Rd,w} + P \sin \beta_p$$

Behandlung als Anker- und Umlenkkräfte:

$$\frac{5}{8} qL - \frac{5}{8} uL \leq V_{Rd,w}$$

Damit die beiden Nachweise äquivalent sind muss folgende Bedingung erfüllt sein:

$$\frac{5}{8} qL - \frac{P(e_1 + f)}{L} - V_{Rd,w} - P \sin \beta_p \stackrel{?}{=} \frac{5}{8} qL - \frac{5}{8} uL - V_{Rd,w} \Leftrightarrow \frac{P(e_1 + f)}{L} + P \sin \beta_p \stackrel{?}{=} \frac{5}{8} uL$$

In einem ersten Schritt kann  $u = \frac{8Pf}{L^2}$  eingesetzt werden

$$\frac{P(e_1 + f)}{L} + P \sin \beta_p \stackrel{?}{=} \frac{5}{8} \frac{8Pf}{L^2} L \Leftrightarrow \frac{Pe_1}{L} + P \sin \beta_p \stackrel{?}{=} \frac{4Pf}{L}$$

Stahlbeton II	Frühjahrssemester	Seite 11/11
Hausübung 3	Musterlösung	fm / 27.03.2021 amr/10.03.2023(rev.)
<p>Als nächstes wird der Winkel <math>\beta_p</math> als Funktion der Pfeilhöhe und der Exzentrizität am Mittelaufleger ausgedrückt.</p> $\sin \beta_p \approx \beta_p = \frac{-e_1}{L} + \frac{4f}{L} \quad (\text{siehe Abbildung 4})$ <p>Es ergibt sich:</p> $\frac{Pe_1}{L} + P \left( \frac{-e_1}{L} + \frac{4f}{L} \right) = \frac{4Pf}{L} \rightarrow \text{i.O.}$ <p>Somit wurde gezeigt, dass beide Berechnungsmethoden zum selben Resultat führen.</p>		