Musterlösung zu Aufgabe 4.2

Konstruktion und Bemessung einer konventionellen Stützenschalung mit Dreischichtenplatten und Aussparungskörper

a) Materialien und Konstruktion der Stützenschalung, Abmessungen der Stütze, Frischbetondruck

Materialien der Stützenschalung

- Schalhaut: Dreischichtenplatte 21 mm
- Längsträger: Holzschalungsträger H 20
- Gurtungen: Säulenriegel 2 U 120
- Ankerung: Spannstab DYWIDAG ∅ 15 mm

Für den L-förmigen Querschnitt der Stütze ist ein Aussparungskörper über die volle Höhe zu konstruieren und zu bemessen. Querschnitt der Aussparung: 25 · 25 cm.

Abmessungen der Stütze

Zu schalen ist eine Stütze mit Querschnitt 50 · 50 cm und einer Höhe von H = 3,50 m (*Bild 1*).

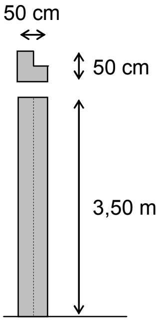


Bild 1 Abmessungen der Stütze

Konstruktion der Stützenschalung

Bevor eine konventionelle Stützenschalung bemessen werden kann, muss zunächst die Schalungskonstruktion entworfen werden. Dabei werden neben der Wahl der Materialien die Abstände der Gurtungen, senkrechten Träger sowie der Planlatten der Sparschalung vorläufig gewählt. Der Entwurf der Stützenschalung wird in *Bild 2* als Grundriss und in *Bild 3* als Querschnitt dargestellt.

Sparschalung und Schalhaut:

Wird eine Sparschalung eingesetzt, kann die Schalhaut senkrecht gespannt werden. Dies ermöglicht eine senkrechte Tragrichtung der Schalhaut und damit den Einbau von senkrechten Brettern oder Dreischichtenplatten als Schalhaut ohne horizontale Stöße.

Da Dreischichtenplatten eine ausgeprägte Haupttragrichtung in der Plattenlängsrichtung haben, ist eine Sparschalung notwendig, um die Dreischichtenplatten senkrecht in Längsrichtung, ohne viele Stöße einsetzen zu können. Ordnet man die Dreischichtenplatten horizontal an, kann auf eine Sparschalung verzichtet werden, jedoch erhält man zahlreiche horizontale Schalhautstöße, je nach Plattenbreite. Hier werden die Dreischichtenplatten senkrecht gespannt und eine Sparschalung verwendet.

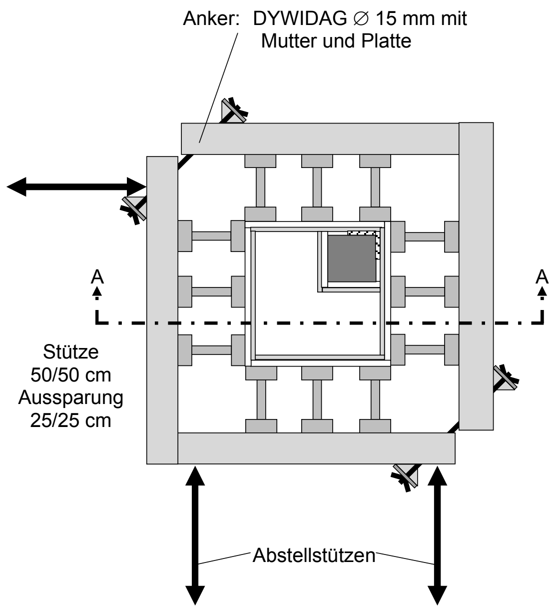


Bild 2 Grundriss: Konstruktion Stützenschalung

Frischbetondruck auf Stützenschalung

Betonmenge: $V_b = (0{,}5\text{ m} \cdot 0{,}5\text{ m} - 0{,}25\text{ m} \cdot 0{,}25\text{ m}) \cdot 3{,}5\text{ m} = 0{,}656\text{ m}^3$

Bei gleicher Betonierleistung wie in *Aufgabe 4.1* ist die Betonierdauer: T_b = 0,75 h (45 Minuten). Da die Dreischichtenplatten jedoch nicht für den sich dabei ergebenden Frischbetondruck nachgewiesen werden können, muss die Betonierleistung reduziert werden. Daher wird hier eine Betonierdauer von T_b = 0,92 h (55 Minuten) angenommen.

Betonkonsistenz: F2

Steiggeschwindigkeit *v* nach *Gleichung (2.23)*:

$$v = \frac{H}{T_b} = \frac{3{,}5\text{ m}}{0{,}92\text{ h}} = 3{,}8\text{ m/h}$$

Maximaler Frischbetondruck $\sigma_{hk,max}$ gemäß DIN 18218 für die Betonkonsistenz F2 nach *Gleichung (2.24)*:

$$\sigma_{hk,\max} = (10 \cdot v + 19) \cdot K1 = (10 \cdot 3{,}8 + 19) \cdot 1{,}0 = 57{,}0\text{ kN/m}^2$$

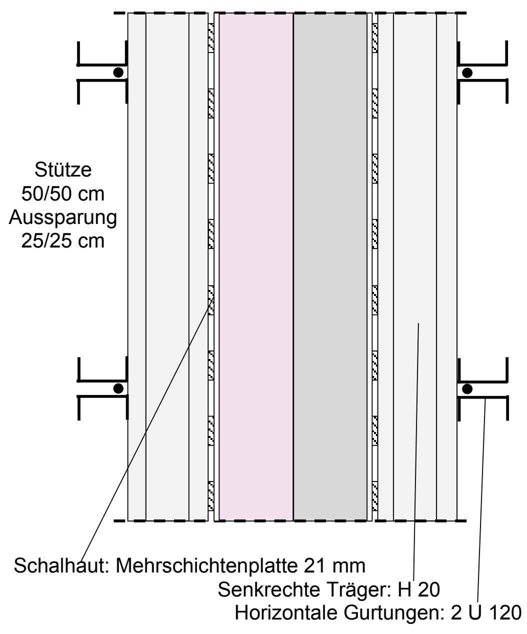


Bild 3 Querschnitt A-A: Konstruktion Stützenschalung

Für die Betonkonsistenz F2 (n = 2) werden in *Gleichung (2.24)* die Werte A_2 = 10 und B_2 = 19 aus *Tabelle 2.3* eingesetzt. Bei einem Erstarrungsende von t_E = 5 h gilt nach *Tabelle 2.4 K1* = 1,0. Bei einer Frischbetonrohwichte von γ_c = 25 kN/m³ wird der maximale Frischbetondruck auf die Schalung erreicht bei einer hydrostatischen Druckhöhe h_s von

$$h_s = \frac{\sigma_{hk,\max}}{\gamma_c} = \frac{57{,}0 \text{ kN/m}^2}{25 \text{ kN/m}^3} = 2{,}28 \text{ m} < 3{,}50 \text{ m}$$

Die Verteilung des Frischbetondrucks wird nach DIN 18218 über die hydrostatische Druckhöhe h_s linear und darunter konstant angenommen.

Der charakteristische Wert der Einwirkung für die Bemessung der Stützenschalung ist damit der maximale Frischbetondruck $\sigma_{hk,max}$ mit

$$r_k = \sigma_{hk,\max} = 57{,}0 \text{ kN/m}^2$$

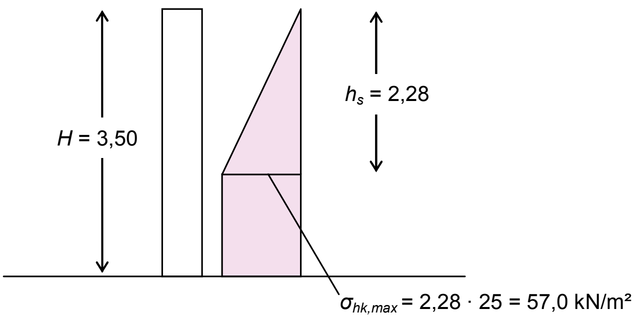


Bild 4 Betondruckverlauf

Für die Bemessung der Stützenschalung muss der maximale Frischbetondruck $\sigma_{hk,max}$ mit dem Teilsicherheitsbeiwert γ_G = 1,5 für veränderliche Lasten nach DIN 1052 „Holzbauwerke" multipliziert werden:

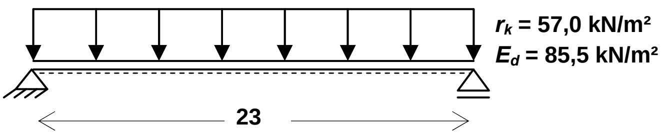
$$E_d = \sigma_{hk,\max} \cdot \gamma_F = r_k \cdot \gamma_F = 57{,}0 \text{ kN/m}^2 \cdot 1{,}5 = 85{,}5 \text{ kN/m}^2$$

---

b) Nachweis der Schalhaut

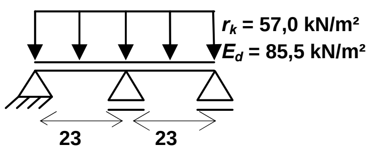
Statisches System: Einfeldträger

Der Achsabstand der Planlatten der Sparschalung wird mit ℓ = 23 *cm* angenommen. Soll mit einem größeren Abstand gerechnet werden, muss die Betoniergeschwindigkeit weiter reduziert werden (siehe Biegebemessung).



Statisches System: Zweifeldträger

für die Schubbemessung:



Prinzipiell wird der Bemessung das statische System des Einfeldträgers zugrunde gelegt, solange es auf der sicheren Seite liegt. Für die Schubbemessung ist hier jedoch der Zweifeldträger das ungünstigere und tatsächlich wirksame statische System und wird daher hier zugrunde gelegt.

Schubbemessung

Maximale Querkraft $V_{r,d}$ nach *Gleichung (2.18)*

$$V_{r,d} = 1{,}25 \cdot \frac{E_d \cdot \ell}{2} = 1{,}25 \cdot \frac{85{,}5\ \text{kN/m}^2 \cdot 0{,}23\text{m}}{2} = 12{,}29\ \text{kN/m}$$

Maximale Schubspannung τ_d mit *Gleichung (2.16)*

$$\tau_d = \frac{1{,}5 \cdot V_{r,d}}{A} = \frac{1{,}5 \cdot 12{,}29\ \text{kN/m}}{0{,}021\ \text{m} \cdot 1\ \text{m/m}} = 877{,}9\ \text{kN/m}^2$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{877{,}9\ \text{kN/m}^2}{592{,}3\ \text{kN/m}^2} = 1{,}48 > 1{,}0 \ \text{nach } \textit{Gleichung (2.15)}$$ (Nachweis nicht erfüllt)

Da die Schubspannungen zu groß sind, muss ein genauerer Nachweis geführt werden. Die Querkraft nimmt ab der Auflagerkante nicht mehr zu, sondern wird zur Auflagermitte hin kleiner (*Bild 5*). Deshalb kann hier mit der lichten Weite zwischen den Planlatten der Sparschalung als Spannweite gerechnet werden. Da die Spannweite ℓ in *Gleichung (2.18)* linear eingeht, kann die Schubspannung im Verhältnis des lichten Abstands ℓ' zum Achsmaß der Planlatten proportional abgemindert werden. Der lichte Abstand ℓ' der Planlatten berechnet sich dafür zu:

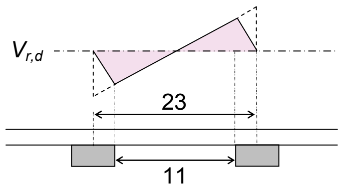


Bild 5 Querkraftverlauf

$$\ell' = 23\ \text{cm} - 12\ \text{cm} = 11\ \text{cm}$$

$$\tau_d' = 877{,}9\ \text{kN/m}^2 \cdot \frac{11\ \text{cm}}{23\ \text{cm}} = 419{,}9\ \text{kN/m}^2$$

$$\frac{\tau_d'}{f_{v,d}} = \frac{419{,}9\ \text{kN/m}^2}{592{,}3\ \text{kN/m}^2} = 0{,}71 < 1{,}0$$ (Nachweis erfüllt)

Bemessungswert der Schubspannung für Dreischichtenplatten (Fichte)

$$f_{v,d} = f_{v,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,d} = 1.100\ \text{kN/m}^2 \cdot \frac{0{,}7}{1{,}3}$$

$$f_{v,d} = 592{,}3\ \text{kN/m}^2$$

mit $f_{v,k}$ = 1.100 kN/m² nach DIN 1052 für Sperrholz der Biegefestigkeitsklasse F25/10 parallel zur Faserrichtung der Deckfurniere. Herstellerangaben über die Schubfestigkeit von Dreischichtenplatten liegen nicht vor.

Biegebemessung

Maximales Moment $M_{r,d}$

$$M_{r,d} = \frac{E_d \cdot \ell^2}{8} = \frac{85{,}5\ \text{kN/m}^2 \cdot 0{,}23^2\ \text{m}^2}{8} = 0{,}57\ \text{kNm/m}$$

Vorhandene Spannung $\sigma_{m,d}$ nach *Gleichung (2.13):*

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{r,d}}{W_n} = \frac{0{,}57\ \text{kNm/m} \cdot 6}{0{,}021^2\ \text{m}^2 \cdot 1\ \text{m/m}} = 7.692{,}1\ \text{kN/m}^2$$

Für eine Dreischichtenplatte 3-S-Platte (Fichte) mit der Nenndicke von 21 mm nach *Tabelle 2.7* gilt zul $\sigma_{15\%}$ = 5,9 N/mm² = 5.900 kN/m². Der Bemessungswert ergibt sich dann aus den *Gleichungen (2.30) und (2.32)* zu:

$$f_{m,d} = 0{,}875 \cdot \text{zul}\ \sigma_{15\%} \cdot \gamma_F$$

$$f_{m,d} = 0{,}875 \cdot 5.900\ \text{kN/m}^2 \cdot 1{,}5 = 7.743{,}8\ \text{kN/m}^2$$

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_m \cdot f_{m,d}} = \frac{7.692{,}1\ \text{kN/m}^2}{1{,}0 \cdot 7.743{,}8\ \text{kN/m}^2} = 0{,}99 < 1{,}0 \quad \text{nach } \textit{Gleichung (2.12)}:$$

mit k_m = 1,0.

Kippbeiwert k_m

Für den Kippbeiwert gilt k_m = 1,0, wenn die Ersatzstablänge $\ell_{ef} < 140 \cdot b^2/h$ ist. Auf eine Ermittlung der Ersatzstablänge ℓ_{ef} nach DIN 1052 wird verzichtet. Sie wird näherungsweise zu $\ell_{ef} \approx \ell$ angenommen. Entsprechend ihrer Größenordnung erfüllt sie bei Schalungskonstruktionen in der Regel die obige Bedingung. Für eine Schaltafel der Breite b = 100 cm mit der Spannweite ℓ =24 cm gilt: $\ell_{ef} < 140 \cdot 1{,}0^2/0{,}021 = 6.666{,}67$ m; $\ell_{ef} \approx \ell = 0{,}24$ m < 6.666,67 m.

Berechnung der Durchbiegung *w*

Nach *Gleichung (2.17)* wird die Durchbiegung *w* mit der charakteristischen Einwirkung ohne Teilsicherheitsbeiwert berechnet.

$$w = \frac{5 \cdot r_k \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

Für eine Dreischichtenplatte 3-S-Platte (Fichte) mit der Nenndicke von 21 mm nach *Tabelle 2.7* gilt E_{mean} = 8.000 N/mm² = 0,8 · 10^7 kN/m². Für eine Holzfeuchtigkeit von 20 % ergibt sich der Bemessungswert dann aus *Gleichung (2.33)* zu:

$$E_{20\%} = 0{,}9167 \cdot E_{mean}$$

$$E_{20\%} = 0{,}9167 \cdot 0{,}8 \cdot 10^7\ \text{kN/m}^2 = 0{,}733 \cdot 10^7\ \text{kN/m}^2$$

$$w = \frac{5 \cdot 57{,}0\ \text{kN/m}^2 \cdot 0{,}23^4\ \text{m}^4 \cdot 12}{384 \cdot 0{,}733 \cdot 10^7\ \text{kN/m}^2 \cdot 0{,}021^3\ \text{m}^3 \cdot 1\ \text{m/m}}$$

$$w = 0{,}0004\ \text{m} = 0{,}4\ \text{mm}$$

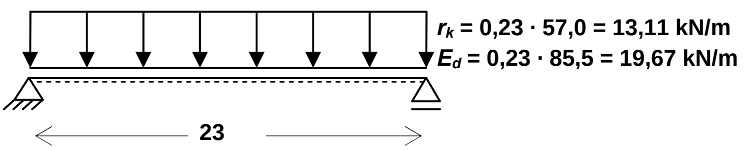
Die Ebenheitstoleranzen nach DIN 18202 werden für die Gesamtkonstruktion nachgewiesen.

---

c) Nachweis der Sparschalung

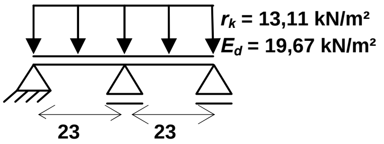
Statisches System: Einfeldträger

Der Abstand der Längsträger beträgt 23 cm.



Statisches System: Zweifeldträger

für die Schubbemessung:



Für die Schubbemessung ist hier der Zweifeldträger das ungünstigere statische System.

Schubbemessung

Maximale Querkraft $V_{r,d}$ nach *Gleichung (2.18)*

$$V_{r,d} = 1{,}25 \cdot \frac{E_d \cdot \ell}{2} = 1{,}25 \cdot \frac{19{,}67\ \text{kN/m}^2 \cdot 0{,}23\ \text{m}}{2} = 2{,}83\ \text{kN}$$

Maximale Schubspannung τ_d mit *Gleichung (2.16)*

$$\tau_d = \frac{1{,}5 \cdot V_{r,d}}{A} = \frac{1{,}5 \cdot 2{,}83\ \text{kN}}{0{,}12\ \text{m} \cdot 0{,}03\ \text{m}} = 1.178{,}2\ \text{kN/m}^2$$

$$\frac{\tau_d}{f_{v,d}} = \frac{1.178{,}2\ \text{kN/m}^2}{1.076{,}9\ \text{kN/m}^2} = 1{,}09 > 1{,}0 \qquad \text{(Nachweis nicht erfüllt)}$$

Da die Schubspannungen zu groß sind, muss ein genauerer Nachweis geführt werden. Die Querkraft nimmt ab der Auflagerkante nicht mehr zu, sondern wird zur Auflagermitte hin kleiner (*Bild 6*). Deshalb kann hier mit der lichten Weite zwischen den Holzschalungsträgern als Spannweite gerechnet werden. Da die Spannweite ℓ in *Gleichung (2.18)* linear eingeht, kann die Schubspannung im Verhältnis des lichten Abstands ℓ' zum Achsmaß der senkrechten Träger proportional abgemindert werden. Der lichte Abstand ℓ' der Holzschalungsträger berechnet sich dafür zu:

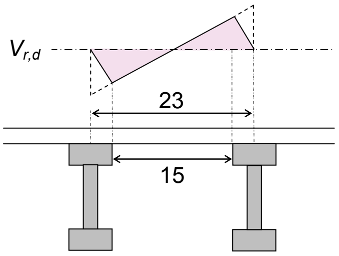


Bild 6 Querkraftverlauf

$$\ell' = 23\ \text{cm} - 8\ \text{cm} = 15\ \text{cm}$$

$$\tau_d' = 1.178{,}2\ \text{kN/m}^2 \cdot \frac{16\ \text{cm}}{24\ \text{cm}} = 785{,}5\ \text{kN/m}^2$$

$$\frac{\tau_d'}{f_{v,d}} = \frac{785{,}5\ \text{kN/m}^2}{1.076{,}9\ \text{kN/m}^2} = 0{,}73 < 1{,}0 \qquad \text{(Nachweis erfüllt)}$$

Bemessungswert der Schubspannung

$$f_{v,d} = f_{v,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$f_{v,d} = 2.000\ \text{kN/m}^2 \cdot \frac{0{,}7}{1{,}3}$$

$$f_{v,d} = 1.076{,}9\ \text{kN/m}^2$$

Biegebemessung

Maximales Moment $M_{r,d}$

$$M_{r,d} = \frac{E_d \cdot \ell^2}{8} = \frac{19{,}67 \text{ kN/m} \cdot 0{,}23^2 \text{ m}^2}{8} = 0{,}13 \text{ kNm}$$

Vorhandene Spannung $\sigma_{m,d}$ nach *Gleichung (2.13)*

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_d}{W_n} = \frac{0{,}13 \text{ kNm} \cdot 6}{0{,}03^2 \text{ m}^2 \cdot 0{,}12 \text{ m}} = 7.226{,}0 \text{ kN/m}^2$$

für Festigkeitsklasse NH, C 24, Vollholz

$$\frac{\sigma_{m,d}}{k_m \cdot f_{m,d}} = \frac{7.226{,}0 \text{ kN/m}^2}{1{,}0 \cdot 12.923{,}1 \text{ kN/m}^2} = 0{,}56 < 1{,}0$$

mit Kippbeiwert k_m = 1,0

Kippbeiwert k_m

Für den Kippbeiwert gilt k_m = 1,0, wenn die Ersatzstablänge ℓ_{ef} < 140 · b^2/h ist. Auf eine Ermittlung der Ersatzstablänge ℓ_{ef} nach DIN 1052 wird verzichtet. Sie wird näherungsweise zu $\ell_{ef} \approx \ell$ angenommen. Entsprechend ihrer Größenordnung erfüllt sie für die Planlatten der Stützenschalung die obige Bedingung:

Für eine Planlatte 3/12 cm mit der Spannweite ℓ = 23 cm gilt: ℓ_{ef} < 140 · 0,12²/0,03 = 67,2 m; $\ell_{ef} \approx$ l = 0,23 m < 67,2 m.

Bemessungswert der Biegespannung

$$f_{m,d} = f_{m,k} \cdot \frac{k_{mod}}{\gamma_M}$$

$$f_{m,d} = 24.000 \text{ kN/m}^2 \cdot \frac{0{,}7}{1{,}3}$$

$$f_{m,d} = 12.923{,}1 \text{ kN/m}^2$$

Berechnung der Durchbiegung *w*

Nach *Gleichung (2.17)* wird die Durchbiegung *w* mit der charakteristischen Einwirkung ohne Teilsicherheitsbeiwert berechnet.

$$w = \frac{5 \cdot r_k \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$w = \frac{5 \cdot 13{,}11 \text{ kN/m} \cdot 0{,}23^4 \text{ m}^4 \cdot 12}{384 \cdot 1{,}1 \cdot 10^7 \text{ kN/m}^2 \cdot 0{,}03^3 \text{ m}^3 \cdot 0{,}12 \text{ m}} = 0{,}0002 \text{ m} = 0{,}2 \text{ mm}$$

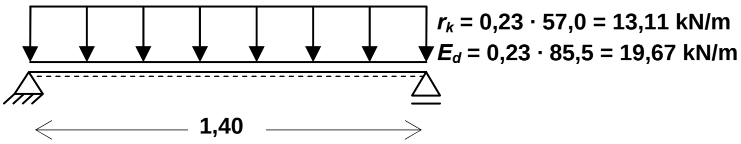
mit $E_{0,mean}$ = 1,1 · 10^7 kN/m² für NH, C 24, parallel zur Faser (DIN 1052).

Die Ebenheitstoleranzen nach DIN 18202 werden für die Gesamtkonstruktion nachgewiesen.

---

d) Nachweis der senkrechten Träger

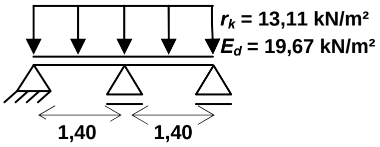
Statisches System: Einfeldträger



Der Gurtungsabstand beträgt 140 cm. Es wird der mittlere Träger betrachtet.

Statisches System: Zweifeldträger

für die Schubbemessung:



Für die Schubbemessung ist hier der Zweifeldträger das ungünstigere statische System.

Schubbemessung

Maximale Querkraft $V_{r,d}$ nach *Gleichung (2.18)*

$$V_{r,d} = 1{,}25 \cdot \frac{E_d \cdot \ell}{2} = 1{,}25 \cdot \frac{19{,}67\ \text{kN/m} \cdot 1{,}40\ \text{m}}{2} = 17{,}21\ \text{kN}$$

Der Bemessungswert nach *Tabelle 2.17* für Holzschalungsträger H 20 beträgt V_d = 16,5 kNm

$$\frac{V_{r,d}}{V_d} = \frac{17{,}21\ \text{kN}}{16{,}5\ \text{kN}} = 1{,}04 > 1{,}0 \qquad \text{(Nachweis nicht erfüllt)}$$

Da die Schubspannungen zu groß sind, muss ein genauerer Nachweis geführt werden. Die Querkraft nimmt ab der Auflagerkante nicht mehr zu, sondern wird zur Auflagermitte hin kleiner (*Bild 6*). Deshalb kann hier mit der lichten Weite zwischen den Gurtungen als Spannweite gerechnet werden. Da die Spannweite ℓ in *Gleichung (2.18)* linear eingeht, kann die Schubspannung im Verhältnis des lichten Abstands ℓ‘ zum Achsmaß der senkrechten Träger proportional abgemindert werden. Der lichte Abstand ℓ‘ der Holzschalungsträger berechnet sich dafür zu:

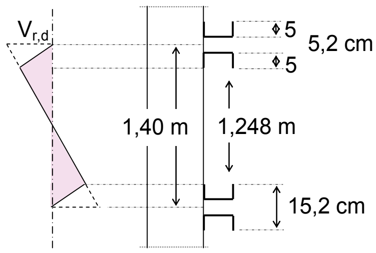


Bild 7 Querkraftverlauf

$$\ell' = 1{,}40\ \text{m} - 0{,}152\ \text{m} = 1{,}248\ \text{m}$$

$$V_{r,d}' = 17{,}21\ \text{kN} \cdot \frac{1{,}248\ \text{m}}{1{,}40\ \text{m}} = 15{,}34\ \text{kN}$$

$$\frac{V_{r,d}}{V_d} = \frac{15{,}34\ \text{kN}}{16{,}5\ \text{kN}} = 0{,}93 < 1{,}0 \qquad \text{(Nachweis erfüllt)}$$

Tabelle 1 Bemessungswerte für Holzschalungsträger H 20 (*Tabellen 2.15 und 2.17*)

Bemessungswerte	Zulässige Lasten
V_d = 16,5 kN	zul Q = 11 kN
M_d = 7,5 kNm	zul M = 5 kNm
$E \cdot I$ = 450 kNm²	

Biegebemessung

Maximales Moment $M_{r,d}$

$$M_{r,d} = \frac{E_d \cdot \ell^2}{8} = \frac{19{,}67\ \text{kN/m} \cdot 1{,}40^2\ \text{m}^2}{8} = 4{,}82\ \text{kNm}$$

Nach *Tabelle 2.17* beträgt damit der Bemessungswert des Moments für Holzschalungsträger H 20 M_d = 7,5 kNm.

$$\frac{M_{r,d}}{M_d} = \frac{4{,}82\ \text{kNm}}{7{,}5\ \text{kNm}} = 0{,}64 < 1{,}0$$

Berechnung der Durchbiegung

Nach *Gleichung (2.17)* wird die Durchbiegung w mit der charakteristischen Einwirkung ohne Teilsicherheitsbeiwert berechnet.

$$w = \frac{5 \cdot r_k \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

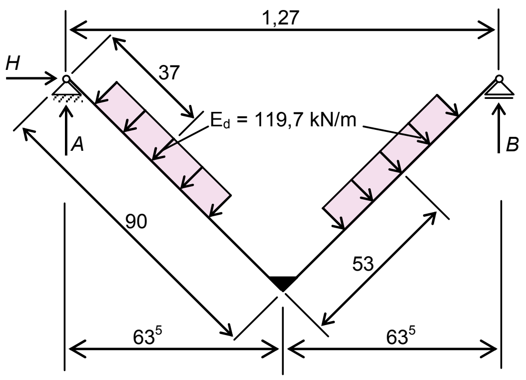
Nach *Tabelle 2.17* gilt für Holzschalungsträger H 20 $E \cdot I$ = 450 kNm².

$$w = \frac{5 \cdot 13{,}11\ \text{kN/m} \cdot 1{,}40^4\ \text{m}^4}{384 \cdot 450\ \text{kNm}^2} = 0{,}0015\ \text{m} = 1{,}5\ \text{mm}$$

e) Nachweis der Gurtungen

Statisches System: Einfeldträger

Der Säulenriegel hat einen rechtwinkligen Grundriss mit biegesteifer Ecke. Der Ankerabstand beträgt 1,27 m. Die Einzellasten werden vereinfacht als Streckenlast angenommen.



r_k = 1,4 · 57,0 = 79,8 kN/m
E_d = 1,4 · 85,5 = 119,7 kN/m

Bild 8 Statisches System: Grundriss Säulenriegel

Für die Auflagerkräfte der Spannanker A und B gilt

$$A + B = \frac{2}{\sqrt{2}} \cdot 119{,}7\ \text{kN/m} \cdot 0{,}5\ \text{m} = 84{,}64\ \text{kN}$$

$$A = B = 42{,}32\ \text{kN}$$

Die maximale Querkraft $V_{r,d}$ an den Auflagern des Säulenriegels bei den Ankerstellen ergibt sich zu

$$V_{r,d} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot 42{,}32\ \text{kN} = 29{,}93\ \text{kN}$$

Die Auflagerkraft H ist bei der gegebenen Belastung H = 0.

Das maximale Moment $M_{r,d}$ in der biegesteifen Ecke des Säulenriegels ergibt sich zu

$$M_{r,d} = -42{,}32 \text{ kN} \cdot 0{,}637 \text{ m} + 119{,}7 \text{ kN/m} \cdot 0{,}5 \text{ m} \cdot 0{,}53 \text{ m} = 4{,}76 \text{ kNm}$$

Schubbemessung

Schubspannung τ_d für Stahlprofile (*Gleichung 5.4*)

$$\tau_d = \frac{V_{r,d} \cdot S_y}{I_y \cdot t}$$

Die maximale Schubspannung τ_d für Stahlprofile ergibt sich nach *Gleichung (5.4)* berechnet zu:

$$\tau_d = \frac{V_{r,d} \cdot S_y}{I_y \cdot t} = \frac{29{,}93 \text{ kN} \cdot 2 \cdot 36{,}3 \text{ cm}^3}{2 \cdot 364 \text{ cm}^4 \cdot 2 \cdot 0{,}9 \text{ cm}}$$

$$\tau_d = 1{,}6582 \text{ kN/cm}^2 = 16.582 \text{ kN/m}^2 = 16{,}582 \text{ N/mm}^2$$

Stahlprofile S 235 (St 37) für Gurtungen in Wandschalungen:

2 U120:

$I_y = 2 \cdot 364 \text{ cm}^4$, $W_y = 2 \cdot 60{,}7 \text{ cm}^3$, $S_y = 2 \cdot 36{,}3 \text{ cm}^3$, $t = 2 \cdot 9$ mm, $E \cdot I_y = 1.528{,}8 \text{ kNm}^2$

Für Stahl S 235 entsprechend St 37 gilt die Streckgrenze $f_{y,k} = 240 \text{ N/mm}^2$. Die Grenznormalspannung ist:

$$\sigma_{R,d} = f_{y,d} = \frac{f_{y,k}}{\gamma_M} = \frac{240 \text{ N/mm}^2}{1{,}1} = 218{,}2 \text{ N/mm}^2$$

mit $\gamma_M = 1{,}1$. Die Grenzschubspannung ist:

$$\tau_{R,d} = \frac{f_{y,d}}{\sqrt{3}} = \frac{218{,}2 \text{ N/mm}^2}{\sqrt{3}} = 126{,}0 \text{ N/mm}^2$$

$$\frac{\tau_d}{\tau_{R,d}} = \frac{16.582 \text{ kN/m}^2}{126.000 \text{ kN/m}^2} = 0{,}13 < 1{,}0$$

Biegebemessung

Biegespannung $\sigma_{r,d}$ für Stahlprofile (*Gleichung 5.5*)

$$\sigma_{y,d} = \frac{M_{r,d}}{W_y}$$

Vergleichsspannung σ_V für Stahlprofile (*Gleichung 5.6*)

$$\sigma_V = \sqrt{\sigma_{y,d}{}^2 + \tau_d{}^2}$$

Die vorhandene Biegespannung $\sigma_{y,d}$ für Stahlprofile wird berechnet nach *Gleichung (5.5)* zu:

$$\sigma_{y,d} = \frac{M_{r,d}}{W_y} = \frac{4{,}76 \text{ kNm}}{2 \cdot 60{,}7 \text{ cm}^3} = 39.666{,}7 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{\sigma_{y,d}}{\sigma_{R,d}} = \frac{39.666{,}7 \text{ kN/m}^2}{218.200 \text{ kN/m}^2} = 0{,}18 < 1{,}0$$

Die Vergleichsspannung σ_V ergibt sich nach *Gleichung (5.6)* aus

$$\sigma_V = \sqrt{39.666{,}7^2 + 16.582^2} = 42.993{,}1 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{\sigma_V}{\sigma_{R,d}} = \frac{42.993{,}1\ \mathrm{kN/m^2}}{218.200\ \mathrm{kN/m^2}} = 0{,}20 < 1{,}0$$

Berechnung der Durchbiegung

Die Durchbiegung *w* wird vereinfachend nach *Gleichung (2.17)* mit der charakteristischen Einwirkung ohne Teilsicherheitsbeiwert für einen Schenkel des Säulenriegels mit Länge ℓ = 90 cm berechnet. Dabei wird die Belastung vereinfachend auf die volle Schenkellänge angenommen. Da die tatsächliche Lasteinwirkungslänge mit nur 50 cm kürzer ist, wird die tatsächliche Durchbiegung noch geringer. Auf eine genauere Berechnung wird hier verzichtet.

$$w = \frac{5 \cdot r_k \cdot \ell^4}{384 \cdot E \cdot I}$$

$$w = \frac{5 \cdot 79{,}80\ \mathrm{kN/m} \cdot 0{,}90^4\ \mathrm{m}^4}{384 \cdot 1.528{,}8\ \mathrm{kNm}^2} = 0{,}00045\ \mathrm{m} = 0{,}45\ \mathrm{mm}$$

f) Nachweis der Ebenheitstoleranzen

Die Summe der Durchbiegungen Σw entsprechend *Gleichung (2.28)* ergibt sich zu:

$$\Sigma w = 0{,}4\ \mathrm{mm} + 0{,}2\ \mathrm{mm} + 1{,}5\ \mathrm{mm} + 0{,}45\ \mathrm{mm} = 2{,}55\ \mathrm{mm}$$

Der Messpunktabstand *m* wird aus dem Abstand ℓ_1 zwischen biegesteifer Ecke und der Ankerstelle der Gurtungen und dem Gurtungsabstand ℓ_2 mit *Gleichung (2.27)* berechnet:

$$m = \sqrt{0{,}9^2 + 1{,}4^2} = 1{,}66\ \mathrm{m} > 1{,}5\ \mathrm{m}$$

Nach *Tabelle 2.6* wird für den Messpunktabstand *m* = 1,5 m < 1,66 m ein zulässiges Stichmaß

$$\text{zul } s = 4\ \mathrm{mm} > 2{,}55\ \mathrm{mm} = \Sigma\, w$$

für Zeile 7 gefordert. Damit sind die Ebenheitstoleranzen nach DIN 18202 erfüllt. Die geforderten Werte in den Zeilen 5 und 6 sind damit auch eingehalten.

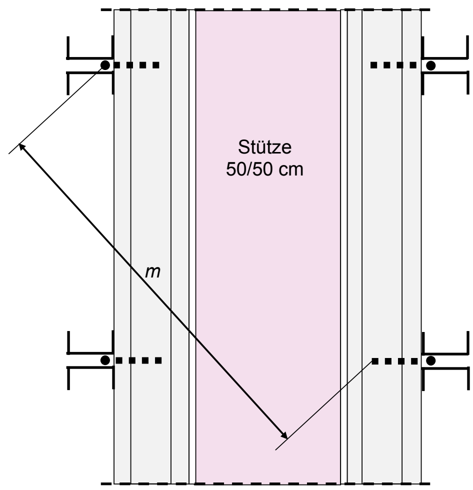


Bild 9 Messpunktabstand *m*

g) Nachweis der Ankerkraft

Die Ankerkraft entspricht den Auflagerkräften *A* und *B* des Säulenriegels.

$$F_N = A = B = 42{,}32 \text{ kN} < 135{,}0 \text{ kN} = N_{d,Anker}$$

für einen Spannstab DYWIDAG Ø 15,0 mm nach *Tabelle 2.23*.

---

h) Nachweis der Holzpressung

Knoten: Senkrechte Träger auf horizontaler Gurtung

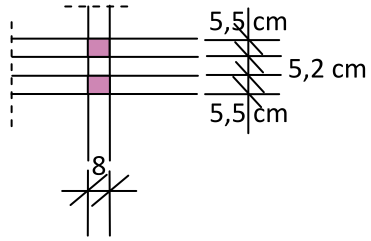


Bild 10 Auflagerfläche Träger – Gurtung

Die senkrechten Träger haben auf der horizontalen Gurtung eine Auflagerfläche von (*Bild 7*):

$$A_d = 2 \cdot 0{,}055 \cdot 0{,}08 = 0{,}0088 \text{ m}^2$$

Die zu übertragende Kraft $F_{c,90,d}$ an dieser Stelle entspricht der Summe der Querkräfte von beiden Seiten im senkrechten Träger:

$$F_{c,90,d} = 2 \cdot 17{,}21 \text{ kN} = 34{,}42 \text{ kN}$$

Vorhandene Querdruckspannung $\sigma_{c,90,d}$:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_d} = \frac{34{,}42 \text{ kN}}{0{,}0088 \text{ m}^2} = 3.911{,}4 \text{ kN/m}^2$$

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} = \frac{3.911{,}4 \text{ kN/m}^2}{3.600{,}0 \text{ kN/m}^2} = 1{,}09 > 1{,}0 \qquad \text{(Nachweis nicht erfüllt)}$$

mit dem Bemessungswert der Querdruckfestigkeit (Pressung quer zur Faser) für die Festigkeitsklasse C 24 von $f_{c,90,d}$ = 3,6 N/mm² nach *Abschnitt 2.7*.

Querdrucknachweis:

Nach DIN 1052 darf bei Auflager- und Schwellendruck der Einhängeeffekt in Faserrichtung berücksichtigt werden. Dies geschieht durch rechnerische Verlängerung der Kantenlänge um jeweils 30 mm. Statt der Auflagerfläche A_d wird die wirksame Querdruckfläche A_{ef} berechnet nach *Gleichung (4.1)* für *ü* ≥ 30 mm zu:

$$A_{ef} = b \cdot (\ell + 2 \cdot 30 \text{ mm}) \le 3 \cdot \ell \cdot b$$

Wirksame Querdruckfläche

b Breite der Querdruckfläche

ℓ tatsächliche Aufstandslänge in Faserrichtung des Holzes

ü rechnerischer Überstand von der Querdruckfläche in Faserrichtung, *ü* ≤ 30 mm und *ü* ≤ *ℓ*

Der lichte Abstand ℓ_1 zwischen den beiden U-Profilen der Gurtungen als Querdruckflächen der Einzellasten beträgt

$$\ell_1 \approx 5{,}2\ \text{cm} < 2 \cdot h = 2 \cdot 4\ \text{cm} = 8\ \text{cm}$$

bei einer Flanschhöhe der Holzschalungsträger von 4 cm. Da es sich bei den Holzschalungsträgern um einen zusammengesetzten Querschnitt handelt, wird hier nur die Höhe des Trägerflansches angesetzt. Der Querdruckbeiwert $k_{c,90}$ nach *Tabelle 4.2* ist damit

$$k_{c,90} = 1{,}0\ .$$

Die Pressfläche für das gesamte Auflager ergibt sich für *ü* ≥ 30 mm nach *Gleichung (4.1)* zu:

$$A_{ef} = 2 \cdot b \cdot (\ell + 2 \cdot 30\ \text{mm}) = 2 \cdot 0{,}08\ \text{m} \cdot (0{,}055\ \text{m} + 2 \cdot 0{,}03\ \text{m})$$

$$A_{ef} = 0{,}0184\ \text{m}^2 \leq 2 \cdot 3 \cdot \ell \cdot b = 2 \cdot 3 \cdot 0{,}055\ \text{m} \cdot 0{,}08\ \text{m} = 0{,}0264\ \text{m}^2$$

Für die Holzpressung gilt damit eine rechnerische Querdruckspannung $\sigma_{c,90,d}$ nach *Gleichung (4.3)* von:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_{ef}} = \frac{34{,}42\ \text{kN}}{0{,}0184\ \text{m}^2} = 1.870{,}7\ \text{kN/m}^2$$

Der Querdrucknachweis wird dann mit *Gleichung (4.4)* geführt

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{k_{c,90} \cdot f_{c,90,d}} = \frac{1.870{,}7\ \text{kN/m}^2}{1{,}0 \cdot 3.600\ \text{kN/m}^2} = 0{,}52 \leq 1{,}0 \qquad \text{(Nachweis erfüllt)}$$

i) Gurtungsabstände

Abschließend sind aufgrund des Konstruktionsentwurfs und der vorangegangenen Berechnungen die Gurtungsabstände über die gesamte Höhe der Stützenschalung endgültig festzulegen (*Bild 8*). Die Schalung wurde für einen maximalen Gurtungsabstand von ℓ = 1,40 m bemessen. Der Schalungsüberstand von der untersten Gurtung nach unten sollte 40 cm nicht überschreiten. Der Schalungsüberstand von der obersten Gurtung nach oben kann größer sein, da der Schalungsdruck nach oben hin abnimmt.

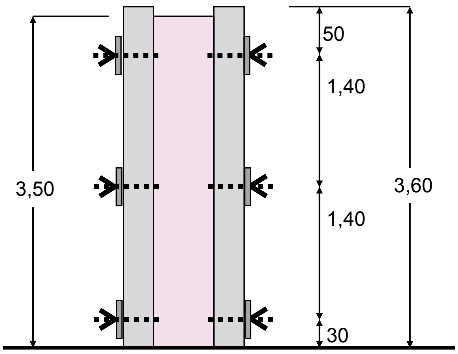


Bild 11 Gurtungsabstände

Die Schalungshöhe sollte hier zu 3,55 bis 3,60 m gewählt werden, also etwa 5 bis 10 cm höher als die Betonstütze. Notwendig ist ein geringer Überstand der Schalung und insbesondere der Schalhaut gegenüber dem Konstruktionsmaß der Stütze, um Toleranzen ausgleichen zu können und um die Arbeitsfuge zwischen Stütze und Decke oder Unterzug sauber ausführen zu können.

Für das Betonieren der Stütze ist außerdem das vorherige Anbringen von Dreikantleisten oder Trapezleisten an der Schalung erforderlich, um einerseits eine saubere Ausführung der Arbeitsfuge zu gewährleisten und um andererseits beim Betonieren einen optischen Anhalt für die geforderte genaue Betonierhöhe zu haben.

j) Bemessung des Aussparungskörpers

Nachweis der Schalhaut und der Sparschalung

Die horizontalen Knaggen sind mittig in Höhe der Sparschalung anzuordnen. Der Achsabstand der horizontalen Knaggen ist damit gleich dem Achsabstand $\ell = 23\ cm$ der Planlatten der Sparschalung. Beim Einsatz von senkrecht angeordneten Dreischichtenplatten ohne Sparschalung ist der Schubnachweis für einen Achsabstand der horizontalen Knaggen von $\ell = 23\ cm$ nicht erfolgreich. Daher bedarf es auch beim Aussparungskörper einer Sparschalung aus Planlatten 3/12 cm. Mit dem Nachweis der Schalhaut der Stützenschalung gilt damit auch die Schalhaut des Aussparungskörpers als nachgewiesen. Da die Sparschalung somit lediglich als Auflager für die Schalhaut anzusehen ist, ist ein Nachweis der Spareschalung nicht erforderlich. Es bleibt der Nachweis der Holzpressung der horizontalen Knaggen auf den senkrechten Auflagerleisten.

Nachweis der Holzpressung

Knoten: Horizontale Knaggen auf senkrechten Leisten

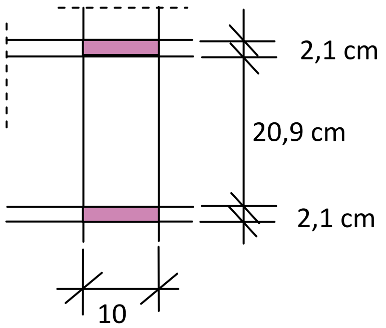


Bild 12 Auflagerfläche horizontale Knagge – senkrechte Leiste

Betrachtet wird eine Seite der Knagge. Die horizontalen Knaggen haben auf den vertikalen Leisten eine Auflagerfläche von (*Bild 12*):

$$A_d = 0{,}021\,\mathrm{m} \cdot 0{,}1\,\mathrm{m} = 0{,}0021\,\mathrm{m}^2$$

Die zu übertragende Kraft $F_{c,90,d}$ an dieser Stelle entspricht dem Frischbetondruck aus der Lasteinzugsbreite der Knagge und deren Breite.

$$F_{c,90,d} = 85{,}5\ \mathrm{kN/m^2} \cdot 0{,}23\ \mathrm{m} \cdot 0{,}25\ \mathrm{m} = 4{,}92\ \mathrm{kN}$$

Vorhandene Querdruckspannung $\sigma_{c,90,d}$:

$$\sigma_{c,90,d} = \frac{F_{c,90,d}}{A_d} = \frac{4{,}92\ \mathrm{kN}}{0{,}0021\,\mathrm{m}^2} = 2.341{,}1\,\mathrm{kN/m^2}$$

$$\frac{\sigma_{c,90,d}}{f_{c,90,d}} = \frac{2.341{,}1\,\mathrm{kN/m^2}}{3.600{,}0\ \mathrm{kN/m^2}} = 0{,}65 < 1{,}0$$

mit dem Bemessungswert der Querdruckfestigkeit (Pressung quer zur Faser) für die Festigkeitsklasse C 24 von $f_{c,90,d} = 3{,}6\ \mathrm{N/mm^2}$ nach *Abschnitt 2.7*.