

Prof. Dr.-Ing. Andreas Garg

Büro:

Gonsenheimer Höhe 1
55122 Mainz
✉ a.garg@gmx.de
☎ +49 163 6830277

Dienststelle:

Hochschule Mainz
Holzstraße 36
55116 Mainz
☎ +49 6131 628 1321

Ergänzende Berechnungen

zu den

Untersuchungen zum Tragverhalten von Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen

Auftraggeber: Pakon AG
Bahnhofstraße 33
CH 8867 Niederurnen

Datum: 15.09.2021 (Rev. 0)

Rev. 0	15.09.2021	Ersterstellung der ergänzenden Berechnungen
--------	------------	---

Dieses Dokument umfasst 21 Seiten

Inhaltsverzeichnis

1. VERANLASSUNG	3
2. NORMEN, LITERATUR UND VERWENDETE UNTERLAGEN	4
3. BERECHNUNGSFORMELN FÜR QUERKRAFT	5
3.1 ALLGEMEINES	5
3.2 BAUTEILE OHNE QUERKRAFTBEWEHRUNG	5
3.3 BAUTEILE MIT QUERKRAFTBEWEHRUNG	6
3.4 SCHUBKRÄFTE IN FUGEN ZUSAMMENGESETZTER BAUTEILE	8
4. BEMESSUNGSBEISPIELE ZUR QUERKRAFTTRAGFÄHIGKEIT	9
4.1 ALLGEMEINES	9
4.2 DÜNNE PLATTE OHNE QUERKRAFTBEWEHRUNG	9
4.3 PLATTEN UND BALKEN MIT QUERKRAFTBEWEHRUNG	13
4.4 WAND MIT QUERKRAFTBEWEHRUNG	18
5. ZUSAMMENFASSUNG	21

1. Veranlassung

Die bauart Konstruktions GmbH + Co.KG hat experimentelle Untersuchungen zum Tragverhalten von Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen durchgeführt und dazu einen gleichnamigen Bericht [1] im Dezember 2006 verfasst. Zusätzlich hat die bauart Konstruktions GmbH + Co.KG im Mai 2007 einen Bericht mit Bemessungsbeispielen [2] zu Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen geschrieben.

In beiden Berichten der bauart Konstruktions GmbH + Co.KG werden Querkraftbemessungen nach DIN 1045-1:2001-07 und SIA 262:2003 angestellt. Die zwei genannten Normen sind nicht mehr gültig.

Gemäß der Beauftragung werden im vorliegenden Bericht die Bemessungsformeln für Querkraft der aktuellen Schweizer Norm SIA 262:2013 [3] dargestellt und die Querkraftbemessungen analog zum Bericht der bauart Konstruktions GmbH + Co.KG mit Bemessungsbeispielen [2] durchgeführt. Dabei werden die Bemessungen der Querkrafttragfähigkeiten teils erweitert um die Traganteile einer zusätzlich kreuzenden Fugenbewehrung wie bspw. Schubaufbiegungen.

Die beispielhaften Berechnungen der Querkrafttragfähigkeiten erfolgen für verschiedene Bauteile und unterschiedliche Bewehrungsannahmen. Sie sollen lediglich die Vorgehensweise der Berechnungen nach der aktuellen SIA 262:2013 [3], [4] aufzeigen und darüber hinaus eine erste Einschätzung der Tragfähigkeiten bieten.

2. Normen, Literatur und verwendete Unterlagen

- [1] bauart Konstruktions GmbH + Co.KG: Untersuchungen zum Tragverhalten von Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen. AZ: 05-E-009-V-Dez. 06, Lauterbach, 29.12.2006.
- [2] bauart Konstruktions GmbH + Co.KG: Bemessungsbeispiele – von Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen. AZ: 05-E-009-V-BSP 07, Lauterbach, 03.05.2007.
- [3] SIA 262: Betonbau, 2013.
- [4] SIA 262/1: Betonbau – Ergänzende Festlegungen, 2019.

3. Berechnungsformeln für Querkraft

3.1 Allgemeines

In diesem Abschnitt werden die Berechnungsformeln für Querkraft nach SIA 262:2013 [3] dargestellt. Dabei werden Bauteile mit und ohne Querkraftbewehrung unterschieden.

3.2 Bauteile ohne Querkraftbewehrung

Nach SIA 262:2013 [3], Abs. 4.3.3.1.2. und 4.3.3.1.3 darf auf die Anordnung einer Querkraftbewehrung bei dünnen Platten verzichtet werden, sofern ein ausreichend großer Querkraftwiderstand gemäß Abs. 4.3.3.2 ff. gegeben ist.

Der Querkraftwiderstand von Platten ohne Querkraftbewehrung beträgt:

$$v_{Rd} = k_d \cdot \tau_{cd} \cdot d_v \quad (35)$$

mit

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g} \quad (36)$$

$$k_g = \frac{48}{16 + D_{max}} \quad (37)$$

Die Beiwert k_d zur Bestimmung des Querkraftwiderstands von Platten ist neben der statischen Höhe d und dem Größtkorn der Gesteinskörnung D_{max} von der nominalen Dehnung der Zugbewehrung ε_v abhängig. Bleibt die Biegezugbewehrung im elastischen Zustand, so darf die Dehnung ε_v wie folgt berechnet werden:

$$\varepsilon_v = \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \frac{m_d}{m_{Rd}} \quad (38)$$

Für den Fall, dass plastische Verformungen der Biegezugbewehrung nicht ausgeschlossen werden können, gilt:

$$\varepsilon_v = 1,5 \cdot \frac{f_{sd}}{E_s} \quad (39)$$

Wird die Biegezugbewehrung nahe dem Nachweisschnitt abgestuft oder liegen abweichende Winkel zwischen Hauptbewehrung und Hauptrichtung der Querkraft vor, so muss die Dehnung der Zugbewehrung ε_v gemäß SIA 262:2013 [3] Abs. 4.3.3.2.3 oder 4.3.3.2.4 vergrößert werden. Normalkräfte in Platten sind nach Abs. 4.3.3.2.5 zu berücksichtigen.

Der Bemessungswert der Schubspannungsgrenze beträgt:

$$\tau_{cd} = \frac{0,3 \cdot \eta_t \cdot \sqrt{f_{ck}}}{\gamma_c} \quad (3)$$

Der Beiwert η_t berücksichtigt den Einfluss der Einwirkungsdauer auf die Betonfestigkeit. Dieser Faktor kann im Allgemeinen und auch hier zu $\eta_t = 1,0$ gesetzt werden. Lediglich für den äußerst ungewöhnlichen Fall, dass die ständigen Lasten auf Bemessungsniveau mehr als 90% der Gesamtauswirkungen verursachen, ist ein reduzierter Beiwert $\eta_t = 0,85$ anzusetzen. Der Teilsicherheitsbeiwert ist $\gamma_c = 1,5$. Damit ergeben sich die Bemessungswerte für Normalbeton mit $\eta_t = 1,0$ nach Tabelle 8 der SIA 262:2013 [3] zu:

Beton	C12/15	C16/20	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50	C45/55	C50/60
f_{cd} [N/mm ²]	8,0	10,5	13,5	16,5	20,0	22,0	24,0	26,0	28,0
τ_{cd} [N/mm ²]	0,70	0,80	0,90	1,00	1,10	1,20	1,25	1,35	1,40

Der Faktor d_v ist die wirksame statische Höhe für die Aufnahme der Querkraft, die i.d.R. der statischen Höhe d entspricht. Eine wirksame statische Höhe d_v muss nur dann errechnet werden, wenn einbetonierte Leitungen, Leitungsbündel oder Platteneinlagen vorkommen, deren Breite oder Höhe größer als $d/6$ sind.

3.3 Bauteile mit Querkraftbewehrung

Nach SIA 262:2013 [3], Abs. 4.3.3.1.2. ist die Anordnung einer Querkraftbewehrung erforderlich für dicke Platten und Schalen sowie für Bauteile, die bedeutenden aufgezwungenen Verformungen oder nur ungenügend genau quantifizierbaren Einwirkungen ausgesetzt sind.

Der Widerstand einer vertikalen Querkraftbewehrung beträgt:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot \cot\alpha \quad (43)$$

Der Widerstand einer geneigten Querkraftbewehrung beträgt:

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot (\cot\alpha + \cot\beta) \cdot \sin\beta \quad (44)$$

Der innere Hebelarm z darf näherungsweise zu $0,9 \cdot d$ angenommen werden.

Zudem sind die Druckstrebentragfähigkeit bzw. die Stegabmessungen zu überprüfen. Für Träger mit vertikaler Querkraftbewehrung ist der Tragwiderstand begrenzt auf

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha \quad (45)$$

und für Träger mit geneigter Querkraftbewehrung auf

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot (\cos\alpha + \cot\beta \cdot \sin\alpha) \cdot \sin\alpha \quad (46)$$

Der Reduktionsbeiwert k_c darf in erster Näherung angenommen werden zu

- $k_c = 1,0$ für ungestörte einachsige Druckspannungszustände
- $k_c = 0,8$ für Druckfelder mit Rissen parallel zur Druckrichtung und senkrecht dazu eingelegter Zugbewehrung
- $k_c = 0,55$ für Druckfelder mit schief zur Druckrichtung verlaufender Bewehrung (z.B. Trägerstege)
- $k_c = 0,4$ für Druckfelder mit schief zur Druckrichtung verlaufender Bewehrung und plastischen Verformungen

Der Winkel α bezeichnet die Druckfeldneigung und der Winkel β die Neigung der Querkraftbewehrung gegenüber der Trägerachse.

Die Druckfeldneigung darf in erster Näherung frei gewählt werden zu

$$\alpha_{min} \leq \alpha \leq 45^\circ \quad (40)$$

wobei die minimale Druckfeldneigung α_{min} beträgt

- $\alpha_{min} = 30^\circ$ im Normalfall
- $\alpha_{min} = 25^\circ$ mit bedeutender Drucknormalkraft im Steg
- $\alpha_{min} = 40^\circ$ mit Zugnormalkraft im Steg oder bei plastischen Gurtverformungen

3.4 Schubkräfte in Fugen zusammengesetzter Bauteile

Für den Nachweis der Tragsicherheit von Fugen sind die Bemessungswerte f_{cd} mit $k_c = 0,5$ und f_{sd} mit $k_f = 0,8$ zu reduzieren.

Der Bemessungswert der Schubfestigkeit der Fuge beträgt

$$\tau_{cd,red} = k_{c\tau} \cdot \tau_{cd} - k_{c\sigma} \cdot \sigma_d \leq 0,15 \cdot f_{cd} \quad (53)$$

mit den Beiwerten $k_{c\tau}$ und $k_{c\sigma}$ nach Tabelle 11 der SIA 262:2013 [3].

Oberflächenbeschaffenheit der Fuge	$k_{c\tau}$	$k_{c\sigma}$
sehr glatt (Stahl-, Kunststoff- oder spezielle Holzschalungen)	0,025	0,5
glatt (Betonoberfläche ohne Nachbehandlung)	0,35	0,6
rau (stark aufgeraute Oberfläche)	0,45	0,7
formschlüssig (min. 10 mm tiefe, passgenaue Schubnocken)	0,5	0,9

Die Normalspannung σ_d kann nach SIA 262:2013 [3], Abs. 4.3.4.3.2 aus einer äußeren Einwirkung oder einem inneren Gleichgewichtszustand (Druckfeld in Kombination mit Zugbändern) errechnet werden. In den nachfolgenden Berechnungsbeispielen wird die Normalspannung in der Fuge aus der angenommenen Querkraft v_{Ed} bzw. V_{Ed} und dem Neigungswinkel α der Druckstrebe ermittelt mit

$$\sigma_d = \frac{v_{Ed} \cdot \cot \alpha}{z} \quad \text{bzw.} \quad \sigma_d = \frac{V_{Ed} \cdot \cot \alpha}{z \cdot b}$$

Die im Bauteil vorhandene Zugbewehrung, die für das gedachte Fachwerkmodell erforderlich ist, wird entsprechend nicht zusätzlich in Ansatz gebracht.

Eine zusätzliche, die Fuge kreuzende Bewehrung A_s wie bspw. Schubaufbiegungen (zusätzliche Bewehrung, die nicht für die Biegung bzw. das gedachte Fachwerkmodell benötigt wird) kann hingegen zusätzlich in Ansatz gebracht werden. Dieser zusätzliche Traganteil kann unter Berücksichtigung des Neigungswinkels β der fugenkreuzenden Bewehrung errechnet werden zu:

$$\tau_{cd,s} = \frac{A_s}{b \cdot z} \cdot k_f \cdot f_{sd} \cdot (k_{c\sigma} \cdot \cos \beta + \sin \beta)$$

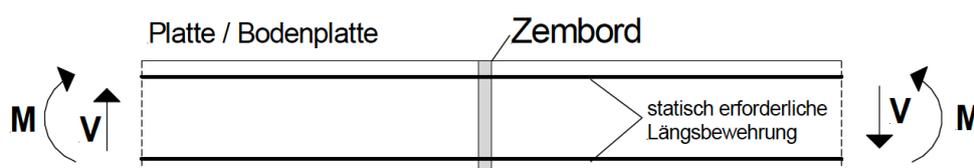
4. Bemessungsbeispiele zur Querkrafttragfähigkeit

4.1 Allgemeines

In Anlehnung an den Bericht „Bemessungsbeispiele von Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen“ [2] werden nachfolgend Beispielberechnungen zur Querkrafttragfähigkeit verschiedener Bauteile mit und ohne Querkraftbewehrung durchgeführt. Neben einer dünnen Platte werden zusätzlich Balken und Wände bemessen. Die Querkrafttragfähigkeit wird einmal für das monolithische Bauteil berechnet [a)] und ein zweites Mal für die Arbeitsfuge mit den Zembord-Abschalelementen [b)]. Die Querkrafttragfähigkeiten mit und ohne Arbeitsfuge werden jeweils verglichen. Für den Fall, dass die Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord-Abschalelementen allein nicht ausreicht, wird eine weiterführende Berechnung [c)] mit einer zusätzlichen, fugenkreuzenden Bewehrung durch das Zembord-Abschalelement angestellt, welche die Traglaststeigerung der fugenkreuzenden Bewehrung verdeutlicht.

4.2 Dünne Platte ohne Querkraftbewehrung

Es wird das Beispiel aus dem Bericht „Bemessungsbeispiele von Arbeitsfugen unter Verwendung von Zembord-Abschalelementen“ [2] aufgegriffen und für die aktuelle SIA 262:2013 [3] neu berechnet.



Parameter:

Plattendicke $h = 200$ mm; Betonfestigkeitsklasse C25/30; Betondeckung $c_v = 30$ mm; Durchmesser der Biegezugbewehrung 10 mm; keine Platteneinlagen $d_v = d$

Fall 1: Bemessung im Momentennullpunkt mit $M_{Ed} = 0$ und $N_{Ed} = 0$

a) maximale Querkrafttragfähigkeit des monolithischen Bauteils

$$v_{Rd} = k_d \cdot \tau_{cd} \cdot d_v$$

mit

$$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8}$$

$$d_v = d = 200 - 30 - 10 = 160 \text{ mm} \quad (\text{hier: } d_m = \text{mittlere stat. Höhe})$$

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g} = 1,0$$

$$\text{mit } \varepsilon_v = 0 \text{ aus } m_d = 0$$

$$\rightarrow v_{Rd} = 1,0 \cdot 1,0 \cdot 160 = 160 \text{ N/mm}$$

b) minimale Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord

$$\tau_{cd,red} = k_{c\tau} \cdot \tau_{cd} - k_{c\sigma} \cdot \sigma_d \leq 0,15 \cdot f_{cd}$$

mit

$$k_{c\tau} = 0,5 \quad \text{und} \quad k_{c\sigma} = 0,9 \quad \text{gemäß den Bauteilversuchen nach [1]}$$

$$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8}$$

$$\sigma_d = \frac{v_{ED} \cdot \cot \alpha}{z}$$

mit

$$v_{ED} = v_{RD} = 160 \text{ N/mm} \quad (\text{max. Querkrafttragfähigkeit monolithisch, s.o.})$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 160 = 144 \text{ mm}$$

für die max. Druckfeldneigung $\alpha = 45^\circ$ gilt: $\cot \alpha = 1,0$ (maßgebend)

für die min. Druckfeldneigung $\alpha = 30^\circ$ gilt: $\cot \alpha = 1,73$

$$\sigma_d = \frac{v_{ED} \cdot \cot \alpha}{z} = \frac{160 \cdot 1,0}{144} = -1,11 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Druckspannungen negativ})$$

$$\rightarrow \tau_{cd,red} = 0,5 \cdot 1,0 - 0,9 \cdot (-1,11) = 1,5 \text{ N/mm}^2 \leq 0,15 \cdot 16,5 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow v_{RD,Fuge} = \tau_{cd,red} \cdot z = 1,5 \cdot 144 = 216 \text{ N/mm} > v_{RD} = 160 \text{ N/mm}$$

Für die bemessene dünne Platte ist im Momentennullpunkt die minimale Querkrafttragfähigkeit der Fuge mit dem Zembord-Abschalelement größer als die maximale Querkrafttragfähigkeit der monolithischen dünnen Platte ohne Querkraftbewehrung. Folglich ist hier die Plattentragfähigkeit maßgebend und nicht die Tragfähigkeit der Zembord-Fuge.

Fall 2: Bemessung unter Biegung mit $M_{Ed} = M_{Rd}$ und $N_{Ed} = 0$

a) maximale Querkrafttragfähigkeit des monolithischen Bauteils

$$v_{Rd} = k_d \cdot \tau_{cd} \cdot d_v$$

mit

$$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8}$$

$$d_v = d = 200 - 30 - 10 = 160 \text{ mm} \quad (\text{hier: } d_m = \text{mittlere stat. Höhe})$$

$$k_d = \frac{1}{1 + \varepsilon_v \cdot d \cdot k_g}$$

mit

$$\varepsilon_v = \frac{f_{sd}}{E_s} \cdot \frac{m_d}{m_{Rd}} = \frac{435}{200.000} \cdot 1 = 2,18 \text{ ‰}$$

$$k_g = \frac{48}{16 + D_{max}}$$

$$\text{für } D_{max} = 32 \text{ mm} \quad \rightarrow k_g = \frac{48}{16+32} = 1,0 \quad (\text{maßgebend})$$

$$\text{für } D_{max} = 16 \text{ mm} \quad \rightarrow k_g = \frac{48}{16+16} = 1,5$$

$$\rightarrow k_d = \frac{1}{1 + 2,18 \text{ ‰} \cdot 160 \cdot 1,0} = 0,74$$

$$\rightarrow v_{Rd} = 0,74 \cdot 1,0 \cdot 160 = 119 \text{ N/mm}$$

b) minimale Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord

$$\tau_{cd,red} = k_{c\tau} \cdot \tau_{cd} - k_{c\sigma} \cdot \sigma_d \leq 0,15 \cdot f_{cd}$$

mit

$k_{c\tau} = 0,5$ und $k_{c\sigma} = 0,9$ gemäß den Bauteilversuchen nach [1]

$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2$ für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8

$$\sigma_d = \frac{v_{ED} \cdot \cot \alpha}{z}$$

mit

$v_{ED} = v_{RD} = 119 \text{ N/mm}$ (max. Querkrafttragfähigkeit monolithisch, s.o.)

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 160 = 144 \text{ mm}$$

für die max. Druckfeldneigung $\alpha = 45^\circ$ gilt: $\cot \alpha = 1,0$ (maßgebend)

für die min. Druckfeldneigung $\alpha = 30^\circ$ gilt: $\cot \alpha = 1,73$

$$\sigma_d = \frac{v_{ED} \cdot \cot \alpha}{z} = \frac{119 \cdot 1,0}{144} = -0,82 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Druckspannungen negativ})$$

$$\rightarrow \tau_{cd,red} = 0,5 \cdot 1,0 - 0,9 \cdot (-0,82) = 1,24 \text{ N/mm}^2 \leq 0,15 \cdot 16,5 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$v_{RD,Fuge} = \tau_{cd,red} \cdot z = 1,24 \cdot 144 = 179 \text{ N/mm} > v_{RD} = 119 \text{ N/mm}$$

Für die bemessene dünne Platte ist auch bei maximaler Biegung die minimale Querkrafttragfähigkeit der Fuge mit dem Zembord-Abschalelement größer als die maximale Querkrafttragfähigkeit der monolithischen dünnen Platte ohne Querkraftbewehrung. Folglich ist auch hier die Plattentragfähigkeit maßgebend und nicht die Tragfähigkeit der Zembord-Fuge.

4.3 Platten und Balken mit Querkraftbewehrung

Es werden beispielhaft die Querkrafttragfähigkeiten einer Platte und eines Balkens mit Querkraftbewehrung errechnet.

4.3.1 Bemessung einer Platte mit $N_{Ed} = 0$

Parameter:

Platte $b/h = 1000/250$ mm; senkrechte Querkraftbewehrung Bügel $\varnothing 8$ mm / 150 mm / 250 mm; Betonfestigkeitsklasse C25/30; Betondeckung $c_v = 30$ mm; Durchmesser der Biegezugbewehrung 20 mm; keine Platteneinlagen

a) maximale Querkrafttragfähigkeit der monolithischen Platte mit $\beta = 90^\circ$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot \cot \alpha$$

mit Bügeln $\varnothing 8$ mm / 150 mm / 250 mm

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{50,2}{150 \cdot 250} * 1000 = 1,34 \frac{mm^2}{mm} = 13,4 \frac{cm^2}{m}$$

$$d = 250 - 30 - 10 - \frac{20}{2} = 200 \text{ mm}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 200 = 180 \text{ mm}$$

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

$$\alpha = \alpha_{min} = 30^\circ \text{ (maßgebend)} \quad \cot \alpha = 1,73$$

$$\rightarrow V_{Rd,s} = 1,34 \cdot 180 \cdot 435 \cdot 1,73 = 182 \text{ kN}$$

b) minimale Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord

$$\tau_{cd,red} = k_{c\tau} \cdot \tau_{cd} - k_{c\sigma} \cdot \sigma_d \leq 0,15 \cdot f_{cd}$$

mit

$$k_{c\tau} = 0,5 \text{ und } k_{c\sigma} = 0,9 \text{ gemäß den Bauteilversuchen nach [1]}$$

$$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8}$$

$$\sigma_d = \frac{V_{ED} \cdot \cot \alpha}{z \cdot b}$$

mit

$$V_{ED} = V_{RD,s} = 182 \text{ kN} \quad (\text{max. Querkrafttragfähigkeit monolithisch, s.o.})$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 200 = 180 \text{ mm}$$

$$b = 1000 \text{ mm}$$

$$\alpha = 30^\circ ; \cot\alpha = 1,73 \quad (\text{wie oben bei monolithischer Platte})$$

$$\sigma_d = \frac{V_{ED} \cdot \cot\alpha}{z \cdot b} = \frac{182000 \cdot 1,73}{180 \cdot 1000} = -1,75 \text{ N/mm}^2 \quad (\text{Druckspannungen negativ})$$

$$\rightarrow \tau_{cd,red} = 0,5 \cdot 1,0 - 0,9 \cdot (-1,75) = 2,07 \text{ N/mm}^2 \leq 0,15 \cdot 16,5 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{RD,Fuge} = \tau_{cd,red} \cdot z \cdot b = 2,07 \cdot 180 \cdot 1000 = 372 \text{ kN} > V_{RD,s} = 182 \text{ kN}$$

Berechnung der Druckstreben­tragfähigkeit:

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

mit $k_c = 0,5$ als Beiwert zur Bestimmung der Betonfestigkeit für den Nachweis der Tragfähigkeit von Fugen

$$V_{Rd,c} = 1000 \cdot 180 \cdot 0,5 \cdot 16,5 \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ = 643 \text{ kN} > V_{Rd,Fuge}$$

Für die bemessene Platte ist die minimale Querkrafttragfähigkeit der Fuge mit dem Zembord-Abschalelement größer als die maximale Querkrafttragfähigkeit der monolithischen Platte mit vorgegebener Querkraftbewehrung.

4.3.2 Bemessung eines Balkens mit $N_{Ed} = 0$

Parameter:

Balken $b/h = 250/400$ mm; senkrechte Querkraftbewehrung Bügel $\varnothing 10$ mm / 150 mm; Betonfestigkeitsklasse C25/30; Betondeckung $c_v = 30$ mm; Durchmesser der Biegezugbewehrung 20 mm; keine Balkeneinlagen

a) maximale Querkrafttragfähigkeit des monolithischen Balkens mit $\beta = 90^\circ$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot \cot \alpha$$

mit 2-schnittigen Bügeln $\varnothing 10$ mm / 150 mm

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{2 \cdot 78,5}{150} = 1,05 \frac{mm^2}{mm} = 10,5 \frac{cm^2}{m}$$

$$d = 400 - 30 - 10 - \frac{20}{2} = 350 \text{ mm}$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 350 = 315 \text{ mm}$$

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

$$\alpha = \alpha_{min} = 30^\circ \text{ (maßgebend)} \quad \cot \alpha = 1,73$$

$$\rightarrow V_{Rd,s} = 1,05 \cdot 315 \cdot 435 \cdot 1,73 = 249 \text{ kN}$$

b) minimale Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord

$$\tau_{cd,red} = k_{c\tau} \cdot \tau_{cd} - k_{c\sigma} \cdot \sigma_d \leq 0,15 \cdot f_{cd}$$

mit

$$k_{c\tau} = 0,5 \text{ und } k_{c\sigma} = 0,9 \text{ gemäß den Bauteilversuchen nach [1]}$$

$$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8}$$

$$\sigma_d = \frac{V_{ED} \cdot \cot \alpha}{z \cdot b}$$

mit

$$V_{ED} = V_{Rd,s} = 249 \text{ kN} \quad (\text{max. Querkrafttragfähigkeit monolithisch, s.o.})$$

$$z = 0,9 \cdot d = 0,9 \cdot 350 = 315 \text{ mm}$$

$$b = 250 \text{ mm}$$

$$\alpha = 30^\circ ; \cot\alpha = 1,73 \text{ (wie oben bei monolithischem Balken)}$$

$$\sigma_d = \frac{V_{ED} \cdot \cot\alpha}{z \cdot b} = \frac{249000 \cdot 1,73}{315 \cdot 250} = -5,47 \text{ N/mm}^2 \text{ (Druckspannungen negativ)}$$

$$\rightarrow \tau_{cd,red} = 0,5 \cdot 1,0 - 0,9 \cdot (-5,47) = 5,42 \text{ N/mm}^2 \leq 0,15 \cdot 16,5 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{RD,Fuge} = \tau_{cd,red} \cdot z \cdot b = 2,5 \cdot 315 \cdot 250 = 197 \text{ kN} < V_{RD,s} = 249 \text{ kN}$$

Berechnung der Druckstreben­tragfähigkeit:

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

mit $k_c = 0,5$ als Beiwert zur Bestimmung der Betonfestigkeit für den Nachweis der Tragfähigkeit von Fugen

$$V_{Rd,c} = 250 \cdot 315 \cdot 0,5 \cdot 16,5 \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ = 281 \text{ kN} > V_{Rd,s}$$

Für den bemessenen Balken ist die maximale Querkrafttragfähigkeit des monolithischen Balkens mit vorgegebener Querkraftbewehrung größer als die minimale Querkrafttragfähigkeit der Fuge mit dem Zembord-Abschalelement. Folglich muss eine fugenkreuzende Querkraftbewehrung eingelegt werden, welche die Tragfähigkeit der Zembord-Fuge erhöht, vgl. [1].

c) Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord und fugenkreuzenden Schub­aufbiegungen

Es werden fugenkreuzende Schub­aufbiegungen von 2 Ø10 mm mit einem Kreuzungswinkel von $\beta = 45^\circ$ zur Erhöhung der Fugentragfähigkeit eingebaut. Bei Aktivierung dieser Bewehrung entsteht eine anteilig ansetzbare Zugkraft und eine zusätzliche Reibkraft.

$$\tau_{cd,s} = \frac{A_s}{b \cdot z} \cdot k_f \cdot f_{sd} \cdot (k_{cs} \cdot \cos\beta + \sin\beta)$$

mit

$$A_s = 2 \cdot 78,5 = 157 \text{ mm}^2$$

$$b = 250 \text{ mm} ; z = 315 \text{ mm}$$

$k_f = 0,8$ Beiwert zur Abminderung der Fließgrenze von fugenkreuzendem Betonstahl

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

$$\beta = 45^\circ ; \sin\beta = \cos\beta = 0,707$$

$$\rightarrow \tau_{cd,s} = \frac{157}{250 \cdot 315} \cdot 0,8 \cdot 435 \cdot (0,9 \cdot 0,707 + 0,707) = 0,93 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow V_{Rd,s} = \tau_{cd,s} \cdot z \cdot b = 0,93 \cdot 315 \cdot 250 = 73 \text{ kN}$$

Die Gesamttragfähigkeit der Fuge errechnet sich somit zu:

$$V_{Rd,Fuge,ges} = V_{Rd,Fuge} + V_{Rd,s} = 197 + 73 = 270 \text{ kN} > V_{Rd} = 249 \text{ kN}$$

Berechnung der Druckstreben­tragfähigkeit:

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot (\cos\alpha + \cot\beta \cdot \sin\alpha) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rd,c} = 250 \cdot 315 \cdot 0,5 \cdot 16,5 \cdot (\cos 30^\circ + \cot 45^\circ \cdot \sin 30^\circ) \cdot \sin 30^\circ = 444 \text{ kN} > V_{Rd}$$

Das Berechnungsbeispiel zeigt, dass fugenkreuzende Schub­aufbiegungen von 2 $\emptyset 10$ mm mit einem Kreuzungswinkel von $\beta = 45^\circ$ eine deutliche Erhöhung der Fugentragfähigkeit bewirken, womit die maximale Querkrafttragfähigkeit des monolithischen Balkens mit vorgegebener Querkraftbewehrung übertroffen wird.

Beim Einbau der Schub­aufbiegungen ist darauf zu achten, dass diese infolge der vorliegenden Richtung der Querkräfte auf Zug beansprucht werden. Der Einbauwinkel β nach SIA 262:2013 [3] sollte zwischen 0° und 45° liegen, was einer senkrechten Kreuzung der Fuge bis hin zu einer Neigung von max. 45° entspricht.

4.4 Wand mit Querkraftbewehrung

Bemessung einer Wand mit $N_{Ed} = 0$

Parameter:

Wand $b/h = 200/3000$ mm; Bewehrung beidseits kreuzweise $\varnothing 8$ mm / 150 mm (\cong Q 335); Betonfestigkeitsklasse C25/30; Betondeckung $c_v = 30$ mm; keine Wandeinlagen

a) maximale Querkrafttragfähigkeit der monolithischen Wand mit $\beta = 90^\circ$

$$V_{Rd,s} = \frac{A_{sw}}{s} \cdot z \cdot f_{sd} \cdot \cot \alpha$$

mit beidseits vertikaler Bewehrung $\varnothing 8$ mm / 150 mm

$$\frac{A_{sw}}{s} = \frac{2 \cdot 50,2}{150} = 0,670 \frac{\text{mm}^2}{\text{mm}} = 6,7 \frac{\text{cm}^2}{\text{m}}$$

$$d \approx 2800 \text{ mm}$$

$$z \approx 0,5 \cdot d = 0,5 \cdot 2800 = 1400 \text{ mm} \quad (\text{möglicher Hebelarm für wandartige Träger})$$

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

$$\alpha = \alpha_{min} = 30^\circ \quad (\text{maßgebend}) \quad \cot \alpha = 1,73$$

$$\rightarrow V_{Rd,s} = 0,670 \cdot 1400 \cdot 435 \cdot 1,73 = 706 \text{ kN}$$

b) minimale Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord

$$\tau_{cd,red} = k_{c\tau} \cdot \tau_{cd} - k_{c\sigma} \cdot \sigma_d \leq 0,15 \cdot f_{cd}$$

mit

$$k_{c\tau} = 0,5 \quad \text{und} \quad k_{c\sigma} = 0,9 \quad \text{gemäß den Bauteilversuchen nach [1]}$$

$$\tau_{cd} = 1,00 \text{ N/mm}^2 \quad \text{für C25/30, vgl. SIA 262:2013 [3], Tabelle 8}$$

$$\sigma_d = \frac{V_{ED} \cdot \cot \alpha}{z \cdot b}$$

mit

$$V_{ED} = V_{Rd,s} = 706 \text{ kN} \quad (\text{max. Querkrafttragfähigkeit monolithisch, s.o.})$$

$$z \approx 1400 \text{ mm} \quad (\text{möglicher Hebelarm für wandartige Träger})$$

$$b = 200 \text{ mm}$$

$$\alpha = 30^\circ ; \cot\alpha = 1,73 \text{ (wie oben bei monolithischer Wand)}$$

$$\sigma_d = \frac{V_{ED} \cdot \cot\alpha}{z \cdot b} = \frac{706000 \cdot 1,73}{1400 \cdot 200} = -4,36 \text{ N/mm}^2 \text{ (Druckspannungen negativ)}$$

$$\rightarrow \tau_{cd,red} = 0,5 \cdot 1,0 - 0,9 \cdot (-4,36) = 4,43 \text{ N/mm}^2 \leq 0,15 \cdot 16,5 = 2,5 \text{ N/mm}^2$$

$$V_{RD,Fuge} = \tau_{cd,red} \cdot z \cdot b = 2,5 \cdot 1400 \cdot 200 = 700 \text{ kN} \approx V_{RD,s} = 706 \text{ kN}$$

Berechnung der Druckstreben­tragfähigkeit:

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot \sin\alpha \cdot \cos\alpha$$

mit $k_c = 0,5$ als Beiwert zur Bestimmung der Betonfestigkeit für den Nachweis der Tragfähigkeit von Fugen

$$V_{Rd,c} = 200 \cdot 1400 \cdot 0,5 \cdot 16,5 \cdot \sin 30^\circ \cdot \cos 30^\circ = 1000 \text{ kN} > V_{Rd,s}$$

Für die bemessene Wand ist die minimale Querkrafttragfähigkeit der Fuge mit dem Zembord-Abschalelement in etwa so groß wie die maximale Querkrafttragfähigkeit der monolithischen Wand mit einer vorgegebenen Netzbewehrung Q 335 beidseits. Mit dem Einbau einer fugen­kreuzenden Querkraftbewehrung kann die Tragfähigkeit der Zembord-Fuge weiter erhöht werden, vgl. [1].

c) Querkrafttragfähigkeit der Arbeitsfuge mit Zembord und fugen­kreuzenden Schub­aufbiegungen

Es werden fugen­kreuzende Schub­aufbiegungen von 2x 3 Ø8 mm mit einem Kreuzungswinkel von $\beta = 45^\circ$ zur Erhöhung der Fugentragfähigkeit eingebaut. Bei Aktivierung dieser Bewehrung entsteht eine anteilig ansetzbare Zugkraft und eine zusätzliche Reibkraft.

$$\tau_{cd,s} = \frac{A_s}{b \cdot z} \cdot k_f \cdot f_{sd} \cdot (k_{c\sigma} \cdot \cos\beta + \sin\beta)$$

mit

$$A_s = 2 \cdot 3 \cdot 50,2 = 301 \text{ mm}^2$$

$$b = 200 \text{ mm} ; z = 1400 \text{ mm}$$

$k_f = 0,8$ Beiwert zur Abminderung der Fließgrenze von fugenkreuzendem Betonstahl

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

$$\beta = 45^\circ ; \sin\beta = \cos\beta = 0,707$$

$$\rightarrow \tau_{cd,s} = \frac{301}{200 \cdot 1400} \cdot 0,8 \cdot 435 \cdot (0,9 \cdot 0,707 + 0,707) = 0,50 \text{ N/mm}^2$$

$$\rightarrow V_{Rd,s} = \tau_{cd,s} \cdot z \cdot b = 0,50 \cdot 1400 \cdot 200 = 140 \text{ kN}$$

Die Gesamttragfähigkeit der Fuge errechnet sich somit zu:

$$V_{Rd,Fuge,ges} = V_{Rd,Fuge} + V_{Rd,s} = 700 + 140 = 840 \text{ kN} > V_{Rd} = 706 \text{ kN}$$

Berechnung der Druckstreben­tragfähigkeit:

$$V_{Rd,c} = b_w \cdot z \cdot k_c \cdot f_{cd} \cdot (\cos\alpha + \cot\beta \cdot \sin\alpha) \cdot \sin\alpha$$

$$V_{Rd,c} = 200 \cdot 1400 \cdot 0,5 \cdot 16,5 \cdot (\cos 30^\circ + \cot 45^\circ \cdot \sin 30^\circ) \cdot \sin 30^\circ = 1578 \text{ kN} > V_{Rd}$$

Das Berechnungs­beispiel zeigt, dass fugenkreuzende Schub­aufbiegungen 2x 3 Ø8 mm mit einem Kreuzungswinkel von $\beta = 45^\circ$ eine Erhöhung der Fugentragfähigkeit von 20 % bewirken, womit die maximale Querkrafttragfähigkeit des monolithischen Balkens mit vorgegebener Querkraftbewehrung deutlich übertroffen wird.

Beim Einbau der Schub­aufbiegungen ist darauf zu achten, dass diese infolge der vorliegenden Richtung der Querkräfte auf Zug beansprucht werden. Der Einbauwinkel β nach SIA 262:2013 [3] sollte zwischen 0° und 45° liegen, was einer senkrechten Kreuzung der Fuge bis hin zu einer Neigung von max. 45° entspricht.

5. Zusammenfassung

Im vorliegenden Dokument werden analog zu den Berichten der bauart Konstruktions GmbH + Co.KG [1], [2] ergänzende Berechnungen nach SIA 262:2013 [3], [4] angestellt. Es werden zuerst die Berechnungsformeln der aktuell gültigen SIA 262:2013 [3] angegeben. Mit diesen Formeln werden sodann verschiedene Bauteile wie Platten, Balken und Wände beispielhaft bemessen. Die Querkrafttragfähigkeiten des monolithischen Bauteils mit oder ohne Querkraftbewehrung werden verglichen mit der Fugentragfähigkeit des Bauteils bei Verwendung von Zembord-Abschalelementen. Dabei wird gemäß dem Bericht [1] der bauart Konstruktions GmbH + Co.KG eine verzahnte Fuge angesetzt.

Die durchgeführten Berechnungen zeigen, dass bei Platten mit und ohne Querkraftbewehrung sowie bei Wänden hohe Fugentragfähigkeiten mit den Zembord-Abschalelementen gegeben sind, welche die Querkrafttragfähigkeiten der Bauteile oftmals übersteigen. Bei Balken und hoch bewehrten Wänden hingegen genügt die Fugentragfähigkeit oftmals nicht, hier muss eine fugenkrenzende Querkraftbewehrung durch das Zembord-Abschalelement zur Erhöhung der Querkrafttragfähigkeit vorgesehen werden, vgl. [1].

Ob die Fugentragfähigkeit gegenüber der Bauteiltragfähigkeit auf Querkraft maßgebend wird, ist im Einzelfall jeweils zu prüfen.

Mainz, den 15.09.2021


Prof. Dr.-Ing. Andreas Garg