

10 Fundamente

10.1 Unbewehrte Fundamente (Streifenfundamente)

Unbewehrte Fundamente gehören zu den wenigen Bauteilen, bei denen die Zugfestigkeit des Betons berücksichtigt werden darf. Gemäß Norm wird die Betonzugfestigkeit im Bemessungszustand bei **unbewehrten** Betonbauteilen wie folgt festgelegt:

$$f_{ctd,pl} = \alpha_{ct,pl} \cdot f_{ctk;0.05} / \gamma_C = 0,7 \cdot f_{ctk;0.05} / 1,5$$

In Bezug auf unbewehrte Fundamente lässt der EC2 jedoch wegen der Boden-Bauwerk-Reaktion mit möglichen Umlagerungen des Sohldrucks und der damit verbundenen geringen Gefahr eines spröden Versagens die geringfügig höhere Betonzugfestigkeit für **bewehrte** Bauteile zu:

$$f_{ctd} = \alpha_{ct} \cdot f_{ctk;0.05} / \gamma_C = 0,85 \cdot f_{ctk;0.05} / 1,5$$

Fundamente verteilen die hohen Druckspannungen am Wand- oder Stützenfuß in horizontaler Richtung so, dass diese durch die größere Aufstandsfläche des Fundaments soweit vermindert und sicher vom Boden aufgenommen werden können. Bei üblichen Fundamenten darf angenommen werden, dass der Fundamentkörper so steif ist, dass die „Auflast“ gleichmäßig verteilt wird und sich so eine linear-veränderliche Sohlpressung an der Fundamentsohle einstellt. Wesentlich für die Bemessung des Fundamentkörpers sind die Anteile der Sohlpressung, die sich aus der Auflast ergeben (i.d.R. N'_{Ed} in [kN] bzw. N'_{Ed} in [kN/m], da nur diese in Querrichtung verteilt werden. Das Eigengewicht des Fundamentkörpers erhöht lediglich die Sohlpressung und muss „nur“ bei den geotechnischen Nachweisen berücksichtigt werden.

Unbewehrte Fundamente werden meist für gering belastete Streifenfundamente gewählt. Bei hohen Lasten oder geringen zulässigen Bodenpressungen müssen so große Fundamenthöhen gewählt werden, dass unbewehrte Fundamente dann unwirtschaftlich werden.

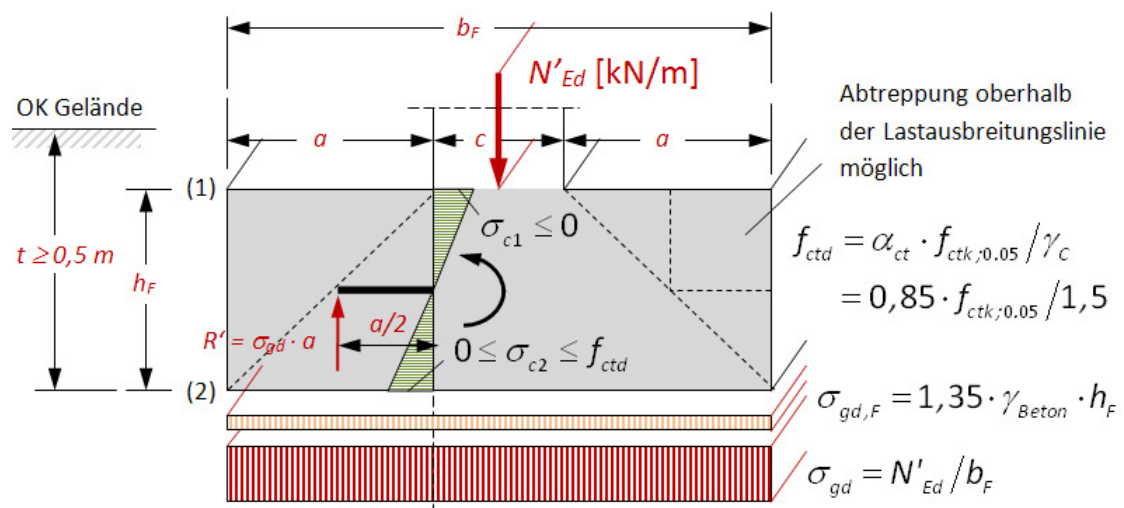


Bild 10.1: Tragverhalten unbewehrter Fundamente

Bei der Bemessung von unbewehrten Fundamenten müssen die **Biegezugspannungen vom Beton** aufgenommen werden. Bei Einhaltung der Betonzugfestigkeit lässt sich unter Annahme einer geradlinigen Spannungsverteilung die erforderliche Fundamentabmessungen h_F und b_F in Abhängigkeit zur Betonfestigkeitsklasse und der Bodenpressung infolge Auflast ermitteln.

Mit dem Biegemoment $M' = R' \cdot \frac{a}{2} = \sigma_{gd} \cdot a \cdot \frac{a}{2} = \sigma_{gd} \cdot \frac{a^2}{2}$

und dem Widerstandsmoment $W_c' = h_F^2 / 6$

erhält man die Biegezugspannung $\sigma_{ct} = \frac{M'}{W_c'} = 3 \cdot \sigma_{gd} \cdot \frac{a^2}{h_F^2} \leq f_{ctd}$

und daraus den Bemessungsansatz: $\frac{h_F^2}{a^2} \geq 3 \cdot \frac{\sigma_{gd}}{f_{ctd}}$

Da jedoch wegen des kurzen Kragarms a die Annahme einer linearen Spannungsverteilung im Beton – wie in Bild 10.1 dargestellt – nur näherungsweise zutrifft, wird pauschal ein **Korrekturfaktor** 0,85 dem Bemessungsansatz hinzugefügt, so dass jetzt die im EC2 aufgeführte Bemessungsgleichung wie folgt angegeben werden kann:

$$\frac{h_F}{a} \geq \frac{1}{0,85} \cdot \sqrt{3 \cdot \frac{\sigma_{gd}}{f_{ctd}}} \geq 1,0$$

Zusätzlich zum Korrekturfaktor sollte die Grenze $h_F/a \geq 1,0$ eingehalten werden. Durch das Verhältnis h_F/a ist die Neigung für die Lastausbreitung festgelegt. Es ist zu erkennen, dass bei zunehmender Bodenpressung und gleicher Betonfestigkeitsklasse größere Fundamenthöhen, aber bei konstanter Bodenpressung und zunehmender Betonfestigkeitsklasse mit höherer Zugfestigkeit kleinere Fundamenthöhen erforderlich werden.

Diese Zusammenhänge sind im nebenstehenden Diagramm berücksichtigt und können als Bemessungshilfe verwendet werden.

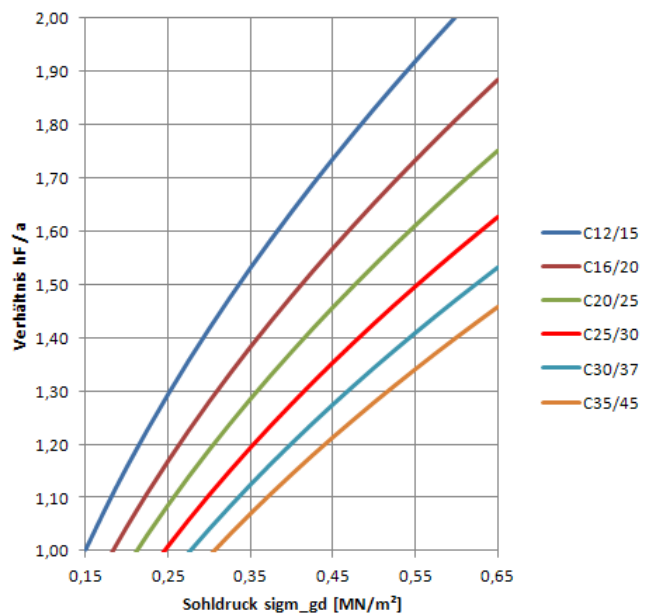


Bild 10.2: Zulässige Fundamentverhältnisse h_F/a

Fundamente dürfen unbewehrt ausgeführt werden, wenn das Verhältnis $h_F/a \geq n$ gemäß Diagramm ist. Wird das Fundament breiter ausgeführt als $b = 2 \cdot a + c$, so ist es als bewehrtes Fundament zu berechnen. Das Einlegen von konstruktiver Bewehrung ist empfehlenswert. Ohne weiteren Nachweis dürfen Fundamente mit $h_F/a \geq 2$ stets unbewehrt ausgeführt werden. Bei höheren Fundamenten kann man den Gründungkörper abtreppen. Dabei darf die theoretische Lastausbreitungslinie nicht eingeschnitten werden.

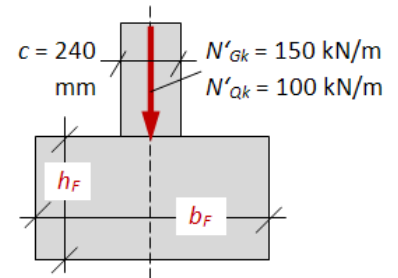
Häufig werden die unbewehrten Fundamente mit einer niedrigeren Betonfestigkeitsklasse hergestellt, als die aufgehende Stahlbetonkonstruktion. In der Anschlussfläche darf dann die **Teilflächenbelastung** den folgenden Wert nicht überschreiten:

$$N_{Ed} \leq N_{Rd,F} = c_x \cdot c_y \cdot f_{cd,F}$$

- mit $c_x ; c_y$ Abmessung der aufgehenden Stahlbetonkonstruktion in Höhe des Fundamentanschnitts
 N_{Ed} Kraft aus aufgehender Konstruktion in Höhe des Fundamentanschnitts
 $f_{cd,F}$ Bemessungswert der Betondruckfestigkeit des Fundaments

Beispiel 10.1: Bemessung eines unbewehrten Streifenfundamentes

Gegeben: Ein Streifenfundament wird durch eine Belastung aus Eigenlasten N_{Gd} und Verkehrslasten N_{Qd} beansprucht. Zur Erfüllung der bodenmechanischen Nachweise ist eine Bodenpressung von $\sigma_{Rd} = 0,300 \text{ MN/m}^2$ festgelegt. Als Beton soll ein C12/15 zum Einsatz kommen.



Gesucht: Fundamenthöhe und -breite für das unbewehrte Bauteil.

Bemessungslast am Wandfuß: $N'_{Ed} = (1,35 \cdot 150 + 1,50 \cdot 100) \cdot 10^{-3} = 0,3525 \text{ MN/m}$

Abschätzung der erf. Fundamentbreite (ohne Berücksichtigung des Fund.-eigengewichtes):

$$b_{F,rqd} \geq N'_{Ed} / \sigma_{Rd} = 0,3525 / 0,300 = 1,175 \text{ m}$$

$$\rightarrow \text{gewählt: } b_{F,prov} = 1,30 \text{ m} \quad \text{mit } a = (1,30 - 0,24) / 2 = 0,53 \text{ m}$$

Ablesewert h_f/a für einen C12/15 bei maximaler Sohlpressung ($\sigma_{Rd} = 0,300 \text{ MN/m}^2$):

$$\rightarrow (h_f/a)_{rqd} = 1,41 \geq 1,0 \quad \rightarrow \quad h_{f,rqd} = 1,41 \cdot 0,53 = 0,75 \text{ m} \quad \rightarrow \quad h_{f,prov} = 0,75 \text{ m}$$

Geotechn. Nachweis: $\sigma_{gd} = N'_{Ed} / b_{f,prov} + 1,35 \cdot \gamma_{\text{Beton}} \cdot h_{f,prov}$ (Beton ohne Bewehrung)
 $= 0,3525 / 1,3 + 1,35 \cdot 0,023 \cdot 0,75 = 0,2944 \text{ MN/m}^2 \leq 0,300 \text{ MN/m}^2 \quad \checkmark$

Nachweis für unbew. Fundament:

Ablesewert h_f/a für einen C12/15 bei tatsächl. Sohlpressung ($\sigma_{Ed} = 0,2944 \text{ MN/m}^2$):

$$\rightarrow (h_f/a)_{rqd} = 1,40 \leq 1,41 \quad \rightarrow \text{Verhältnis } h_f/a \text{ für unbew. Fundament ausreichend } \checkmark$$

Nachweis Teilflächenbelastung: ($f_{cd,C12/15} = 6,8 \text{ MN/m}^2$)

$$N'_{Rd,F} = 0,24 \cdot 6,8 = 1,632 \text{ MN/m} \geq 0,3525 \text{ MN} = N'_{Ed} \rightarrow \text{Betondruckspng. eingehalten } \checkmark$$

10.2 Bewehrte Fundamente

10.2.1 Bewehrte Streifenfundamente unter zentrischer Belastung

Bewehrte Fundamente können deutlich dünner ausgeführt werden als unbewehrte, da sie über Biegung abtragen. Bewehrte Streifenfundamente haben ein Tragverhalten wie gedrungene Kragplatten. Es lässt sich anschaulich mit einem **Stabwerksmodell** beschreiben (Bild 10.3). Zur Aufnahme des Horizontal-schubs werden Stahleinlagen an der Unterseite des Fundaments erforderlich. Sie wirken wie ein **Zugband** und sind deshalb über die gesamte Fundamentbreite durchzuführen. Am Ende der Bewehrungsstäbe sind diese z.B. durch Winkelhaken zu verankern.

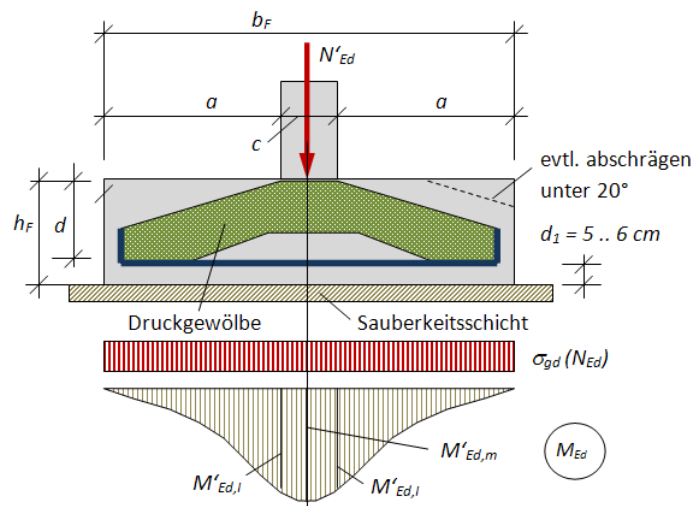


Bild 10.3: Tragverhalten von bewehrten Streifenfundamenten

Unter der Annahme einer konstanten Verteilung der Bodenpressung über die Fundamentbreite erfolgt deren Biegebemessung. Hierbei ist zu unterscheiden zwischen Fundamenten

- unter Wänden aus Mauerwerk (kein monolithischer Anschluss):

Hier ist das **ausgerundete Moment** zu ermitteln mit
$$M'_{Ed,m} = N'_{Ed} \cdot \frac{b-c}{8} \quad (\text{kNm/m})$$

- unter einer biegesteif angeschlossenen Stahlbetonwand (monolithischer Anschluss);

Hier ist das **Moment am Anschnitt** maßgebend und zu ermitteln mit
$$M'_{Ed,i \text{ bzw. II}} = N'_{Ed} \cdot \frac{(b-c)^2}{8 \cdot b} \quad (\text{kNm/m})$$

Als Bemessungsverfahren kann z.B. das bekannte ω - oder das k_d -Verfahren gewählt werden. Die Nutzhöhe ist mit $d \leq h_F - 5 \text{ cm}$ möglichst so zu wählen, dass keine Querkraftbewehrung erforderlich ist. Hierzu ist der Nachweis der Querkraftbeanspruchung im Abstand d von der Vorderkante der aufgehenden Wand zu führen.

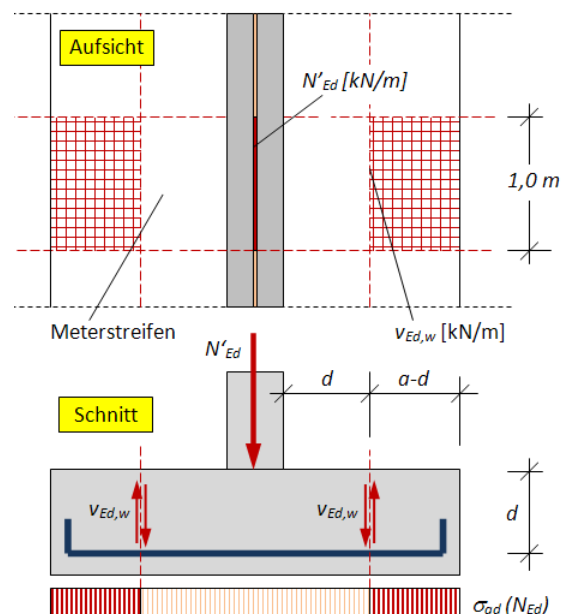


Bild 10.4: Nachweis der Querkraftbewehrung

Der Nachweis ist dann in gewohnter Weise zu führen:

$$v_{Ed,w} \leq v_{Rd,c}$$

mit $v_{Ed,w}$ als Bemessungswert in [MN/m]: $v_{Ed,w} = \sigma_{gd} \cdot (a - d) = \frac{N'_{Ed}}{b_f} \cdot (a - d) \geq 0$

und $v_{Rd,c}$ als Querkrafttragwiderstand ohne Querkraftbewehrung (vgl. Kap. 4.3.1):

$$v_{Rd,c} = \left[C_{Rdc} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot d \geq v_{Rd,c,min}$$

Die darin enthaltenen Parameter sind:

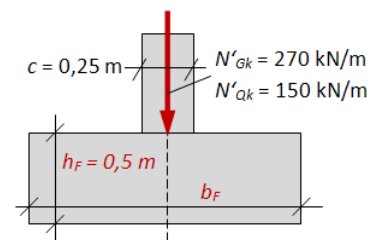
- $C_{Rd,c} = 0,15 / \gamma_c$ (in der Regel gilt $\gamma_c = 1,5$)
- $k = 1 + (200 / d)^{0,5} \leq 2,0$ mit d in [mm]
- d = Nutzhöhe (Abstand zwischen Achse der Biegezugbewehrung bis zum Druckrand)
- $\sigma_{cp} = N_{Ed} / A_c$ mit Längskraft N_{Ed} infolge von Last oder Vorspannung (Druck positiv !!)
- $\rho_l = a_{sl} / d \leq 0,02$ Längsbewehrungsgrad

Da in der Regel Normalbeton verwendet wird, ist $C_{Rd,c} = 0,1$. Eine Betonlängskraft ist nicht vorhanden, somit ist die Spannung σ_{cd} mit Null zu berücksichtigen. Alles wird auf einen Fundamentabschnitt von 1,0 m Breite bezogen. Damit vereinfacht sich der Bemessungswert für die aufnehmbare Querkraft ohne Schubbewehrung wie folgt

$$v_{Rd,c} = 0,1 \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot d \geq v_{min} \cdot d$$

Beispiel 10.2: Bemessung eines bewehrten Streifenfundaments unter Stahlbetonwand

Gegeben: Ein Streifenfundament wird durch eine Belastung aus Eigenlasten N_{Gk} und Verkehrslasten N_{Qk} beansprucht. Zur Erfüllung der bodenmechanischen Nachweise ist ein Bemessungswert der Bodenpressung von $\sigma_{Rd} = 0,300 \text{ MN/m}^2$ festgelegt. Als Beton wird ein C20/25 gewählt.



Gesucht: Fundamentbreite und die erforderliche Bewehrung

Bemessungslast am Wandfuß: $N'_{Ed} = (1,35 \cdot 270 + 1,50 \cdot 150) \cdot 10^{-3} = \underline{0,590 \text{ MN/m}}$

Erf. Fundamentbreite (Sohlspannung inf. Fund.-Eigengewicht kann sofort abgezogen werden):

$$b_{f,rqd} \geq N'_{Ed} / (\sigma_{Rd} - 1,35 \cdot 0,025 \cdot h_f) = 0,590 / (0,300 - 1,35 \cdot 0,025 \cdot 0,5) = \underline{2,085 \text{ m}}$$

→ gewählt: $b_{f,prov} = \underline{2,10 \text{ m}}$ mit $a = (2,10 - 0,25) / 2 = \underline{0,925 \text{ m}}$

Ablesewert h_f/a für einen C20/25 bei maximaler Sohlspannung ($\sigma_{Rd} = 0,300 \text{ MN/m}^2$):

$$\rightarrow (h_f/a)_{rqd} = 1,2 \geq 1,0 \rightarrow h_{f,rqd,unb.} = 1,2 \cdot 0,925 = \underline{1,11 \text{ m}} \geq h_{f,prov} = 0,50 \text{ m} \rightarrow \text{bew. Fund.}$$

Geotechn. Nachweis: $\sigma_{gd} = N'_{Ed} / b_{f,prov} + 1,35 \cdot \gamma_{\text{Beton}} \cdot h_{f,prov}$ (Betongewicht mit Bewehrung)
 $= 0,590 / 2,1 + 1,35 \cdot 0,025 \cdot 0,5 = \underline{0,298 \text{ MN/m}^2} \leq 0,300 \text{ MN/m}^2 \checkmark$

Maßgeb. Bemessungsmoment (am Anschnitt):

$$M'_{Ed} = M'_{Eds} = N'_{Ed} \cdot (b_F - c)^2 / (8 \cdot b_F) = 0,590 \cdot (2,10 - 0,25)^2 / (8 \cdot 2,1) = \underline{0,1202 \text{ MNm/m}}$$

Bemessung des bewehrten Fundaments:

$$d = 0,50 - 0,06 = 0,44 \text{ m (ohne genauere Rechnung)}$$

$$\mu_{Eds} = 0,1202 / 0,44^2 / 11,3 = 0,055 \rightarrow \omega_I = 0,0568 \text{ (interpoliert)}$$

$$a_{s,rqd} = 0,0568 \cdot (100 \cdot 44) / 38,4 = \underline{6,5 \text{ cm}^2/\text{m}}$$

gewählt: in Querrichtung: $\varnothing 12$; $s = 150 \text{ mm}$ $\rightarrow a_{s,prov} = \underline{7,54 \text{ cm}^2/\text{m}} \geq 6,5 \text{ cm}^2/\text{m}$ ✓

in Längsrichtung: $\varnothing 8$; $s = 250 \text{ mm}$ $\rightarrow a_{s,prov} = \underline{2,01 \text{ cm}^2/\text{m}}$ (konstr.)

Querkraftnachweis:

$$v_{Ed,w} = 0,590 / 2,1 \cdot (0,925 - 0,44) = \underline{0,131 \text{ MN/m}}$$

$$k = 1 + (200/d)^{0,5} = 1 + (200/440)^{0,5} = 1,67$$

$$\rho_l = 7,54 / (100 \cdot 44) = 0,00171 \leq 0,02$$

$$v_{Rd,c} = 0,1 \cdot 1,67 \cdot (100 \cdot 0,00171 \cdot 20,0)^{1/3} \cdot 0,44 = \underline{0,111 \text{ MN/m}} \geq v_{Rd,min}$$

$$v_{Rd,min} = v_{min} \cdot d = (0,0525 / \gamma_c) \cdot k^{1,5} \cdot f_{ck}^{0,5} \cdot d = (0,0525 / 1,5) \cdot 1,67^{1,5} \cdot 20^{0,5} \cdot 0,44 = \underline{0,149 \text{ MN/m}}$$

Nachweis: $v_{Ed,w} = \underline{0,131 \text{ MN/m}} \leq 0,149 \text{ MN/m} = v_{Rd,c} = v_{Rd,min}$ ✓

Teilflächenbelastung: - ohne Nachweis erfüllt -

10.2.2 Bewehrte Einzelfundamente unter zentrischer Belastung

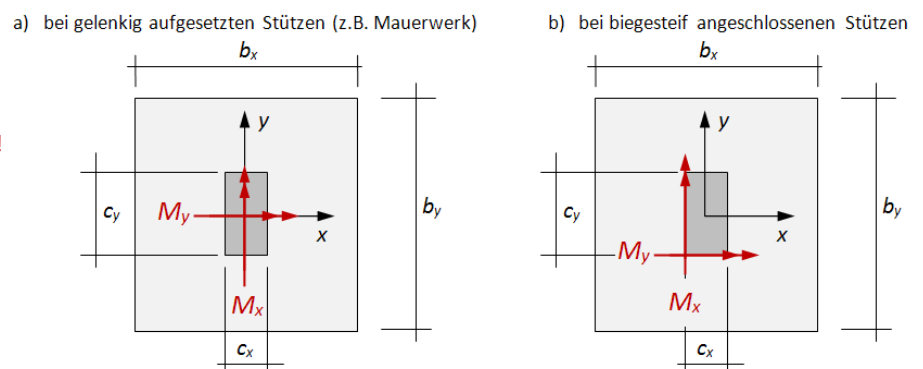
Einzelfundamente werden i.d.R. mit quadratischem oder rechteckigem Querschnitt hergestellt. Die Fundamentdicke sollte so gewählt werden, dass

- möglichst keine Schubbewehrung erforderlich ist;
- die anschließende Stützenbewehrung unter Beachtung ihrer erforderlichen Verankerungslänge untergebracht werden kann

Das statische System für ein Einzelfundament entspricht dem einer **elastisch gebetteten Platte** mit mittiger Einzellast. Für die praktische Biegebemessung werden die Schnittgrößen in der Platte nicht nach der Plattentheorie, d.h. Hauptmomente in radialer und tangentialer Richtung, ermittelt, sondern durch eine Näherung wie folgt berechnet:

Merke: Index x bzw. y des Biegemoments weist auf Richtung der erforderlichen Bewehrung hin!

Bild 10.5: Schnitte für Nachweisführung



a) bei gelenkig aufgesetzten Stützen (z.B. Mauerwerk) → ausgerundetes Gesamtmoment

$$M_{Ed,y} = N_{Ed} \cdot \frac{b_y - c_y}{8} \quad ; \quad M_{Ed,x} = N_{Ed} \cdot \frac{b_x - c_x}{8}$$

b) bei biegesteif angeschlossenen Stahlbetonstützen → Gesamtmoment am jeweiligen Anschnitt

$$M_{Ed,y} = N_{Ed} \cdot \frac{(b_y - c_y)^2}{8 \cdot b_y} \quad ; \quad M_{Ed,x} = N_{Ed} \cdot \frac{(b_x - c_x)^2}{8 \cdot b_x}$$

Diese **Gesamtbiegemomente** sind über die jeweilige Fundamentbreite b_x bzw. b_y ungleichmäßig verteilt. Die Biegebeanspruchung der Fundamentplatte ist in der Nähe der Stütze deutlich höher als an den Außenrändern. Die Verteilung der Momente wird durch Faktoren berücksichtigt, die vom Verhältnis c_x/b_x bzw. c_y/b_y abhängig sind. Die Fundamentbreite wird in acht gleiche Streifen unterteilt, für die in der folgenden Tabelle die entsprechenden Faktoren festgelegt sind (Bild 10.6).

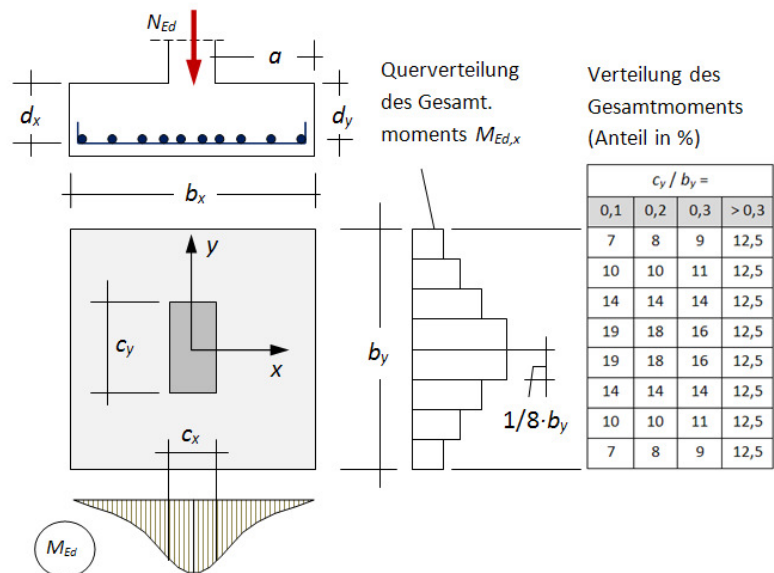


Bild 10.6: Biegemomente in der Fundamentplatte

Die Bemessung erfolgt mit Hilfe eines üblichen Biegebemessungsverfahrens für jeden Achtelstreifen. Näherungsweise darf der maximal beanspruchte Streifen in Fundamentmitte betrachtet werden und die hierfür ermittelte Bewehrung auf die Gesamtbewehrung hochgerechnet werden. Geht man beispielsweise von dem ungünstigsten Fall c_x/b_x bzw. $c_y/b_y = 0,1$ aus, so ergibt sich für die Bewehrung in

• x-Richtung: $\mu_{Eds,x} = \frac{0,19 \cdot M_{Ed,x}}{\frac{1}{8} \cdot b_y \cdot d_x^2 \cdot f_{cd}} \rightarrow \max \omega_{1,x}$

$$\Sigma A_{s,rqd,x} = \frac{\max \omega_{1,x} \cdot \frac{1}{8} \cdot b_y \cdot d_x}{0,19 \cdot f_{yd} / f_{cd}}$$

Diese Bewehrung wird dann über die Fundamentbreite b_y möglichst entsprechend den Prozentsätzen der obigen Tabelle in Abhängigkeit vom Parameter c_y/b_y verteilt.

• y-Richtung: $\mu_{Eds,y} = \frac{0,19 \cdot M_{Ed,y}}{\frac{1}{8} \cdot b_x \cdot d_y^2 \cdot f_{cd}} \rightarrow \max \omega_{1,y}$

$$\Sigma A_{s,rqd,y} = \frac{\max \omega_{1,y} \cdot \frac{1}{8} \cdot b_x \cdot d_y}{0,19 \cdot f_{yd} / f_{cd}}$$

Diese Bewehrung wird dann über die Breite b_x entsprechend den Prozentsätzen in Abhängigkeit von c_x/b_x verteilt.

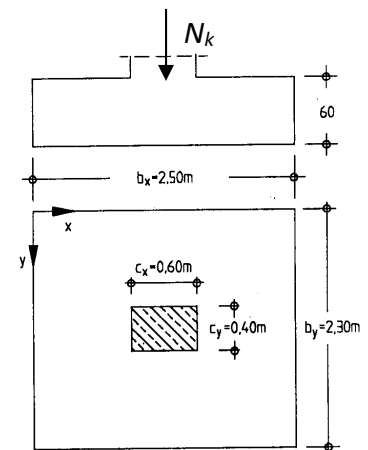
Die so ermittelte Bewehrung soll ohne Abstufung bis zum jeweiligen Rand geführt werden (Versatzmaß, Sprengwerkwirkung) und hier sorgfältig verankert werden. Zur Aufnahme der Querkzugspannungen im Verankerungsbereich wird eine konstruktive Querbewehrung erforderlich.

Es ist für jeden Einzelfall zu prüfen, ob eine so weitgehende Anpassung der Bewehrung an die Momentenverteilung baupraktisch sinnvoll ist. Bei einer Verwendung von Baustahlmatten ist eine solche Anpassung kaum durchführbar.

Beispiel 10.3: Bemessung eines bewehrten Einzelfundaments

Gegeben: Ein Einzelfundament für eine mittig belastete Stahlbetonstütze ist zu entwerfen und zu bemessen. Das Fundament befindet sich nicht in betonangreifenden Boden. Das Fundament ist durch die Stütze wie folgt belastet:

Eigenlast: $N_{gk} = 1000 \text{ kN}$
 Veränderliche Lasten: $N_{qk} = 500 \text{ kN}$
 Baustoffe: C 30/37 mit $f_{cd} = 17,0 \text{ N/mm}^2$



Gesucht: Bewehrung für das bewehrte Einzelfundament

Bemessungslast am Stützenfuß: $N_{Ed} = 1,35 \cdot 1000 + 1,50 \cdot 500 = \underline{2100,0 \text{ kN}}$

Bemessungsmomente am jeweiligen Anschnitt:

$$M_{Ed,x} = N_{Ed} \cdot (b_x - c_x)^2 / (8 \cdot b_x) = 2100 \cdot (2,50 - 0,6)^2 / (8 \cdot 2,50) = \underline{379,1 \text{ kNm}}$$

$$M_{Ed,y} = N_{Ed} \cdot (b_y - c_y)^2 / (8 \cdot b_y) = 2100 \cdot (2,30 - 0,4)^2 / (8 \cdot 2,30) = \underline{412,0 \text{ kNm}}$$

Betondeckung (Stabstahl $\varnothing 16$):

$$\begin{aligned} \text{Umweltklasse XC2} &\rightarrow c_{min} = \max \{c_{min,b}; c_{min,dur} + \Delta c_{dur,\gamma}; 10 \text{ mm}\} = 20 \text{ mm} \\ \Delta c_{dev} &= 15 + 20 = 35 \text{ mm (inkl. zusätz. Erhöhung um 20 mm)} \\ c_{nom} &= 20 + 35 = 55 \text{ mm} \end{aligned}$$

Nutzhöhen (Stabstahl $\varnothing 16$):

$$\begin{aligned} d_x &= 600 - 55 - 16/2 = 537 \text{ mm (1. Lage wegen } M_{Ed,x}/b_y > M_{Ed,y}/b_x) \\ d_y &= 537 - 16 = 521 \text{ mm (2. Lage)} \end{aligned}$$

Biegebemessung für x-Richtung:

$$\begin{aligned} c_y/b_y &= 0,40 / 2,30 = 0,17 \cong 0,20 \rightarrow M_{Eds,x} = 0,18 \cdot 379,1 = \underline{68,2 \text{ kNm}} \\ \mu_{Eds} &= 0,0682 / (2,30/8 \cdot 0,537^2 \cdot 17) = 0,0484 \rightarrow \omega_{1,x} = 0,050 \text{ (interpoliert)} \\ A_{s,x} &= (0,050 \cdot 2,30/8 \cdot 0,537 / 25,6) \cdot 10^4 = 3,02 \text{ cm}^2 \text{ (im mittleren Achtelstreifen)} \\ A_{s,x,tot} &= 3,02 / 0,18 = \underline{16,8 \text{ cm}^2} \text{ (Näherungsansatz für Gesamtbewehrung über 2,3 m)} \end{aligned}$$

Biegebemessung für y-Richtung:

$$c_x/b_x = 0,60 / 2,50 = 0,24 \cong 0,25 \quad ; \quad \rightarrow \quad M_{Eds,y} = 0,17 \cdot 412,1 = \underline{70,1 \text{ kNm}}$$

$$\mu_{Eds} = 0,0701 / (2,50/8 \cdot 0,521^2 \cdot 17) = 0,0486 \quad \rightarrow \quad \omega_{1,y} = 0,050 \text{ (interpoliert)}$$

$$A_{s,y} = (0,050 \cdot 2,50/8 \cdot 0,521 / 25,6) \cdot 10^4 = 3,18 \text{ cm}^2 \text{ (im mittleren Achtelstreifen)}$$

$$A_{s,y,tot} = 3,18 / 0,17 = \underline{18,7 \text{ cm}^2} \text{ (Näherungsansatz für Gesamtbewehrung über 2,5 m)}$$

Mindestbewehrung:

$$f_{ctm} = 2,9 \text{ MN/m}^2$$

$$W = 2,50 \cdot 0,60^2 / 6 = 0,15 \text{ m}^3 \text{ (nachgewiesen für längere Fundamentseite)}$$

$$M_{cr} = 2,9 \cdot 0,15 \cdot 10^3 = 435 \text{ kNm}$$

$$z = 0,9 \cdot 0,537 = 0,48 \text{ m}$$

$$A_{s,min} = M_{cr} / (z \cdot f_{yk}) = 435 / (0,48 \cdot 50) = \underline{18,1 \text{ cm}^2}$$

Wahl der Bewehrung (Bewehrung wird nicht gestaffelt):

- in x-Richtung: in Feldmitte (ca. 0,5·2,30 m): 5 Ø 16, s = 250 mm
in den äußeren Streifen (ca. 0,25·2,30 m): 2 Ø 16, s = 300 mm

$$A_{s,x,prov} = 10,1 + 2 \cdot 4,02 = \underline{18,05 \text{ cm}^2} \geq 16,8 \text{ cm}^2$$

- in y-Richtung: in Feldmitte (ca. 0,5·2,50 m): 6 Ø 16, s = 250 mm
in den äußeren Streifen (ca. 0,25·2,50 m): 2 Ø 16, s = 300 mm

$$A_{s,y,prov} = 12,1 + 2 \cdot 4,02 = \underline{20,14 \text{ cm}^2} \geq 18,7 \text{ cm}^2$$

Hinweis: Zur Sicherstellung der Querkrafttragfähigkeit (Durchstanzproblem) ist ein zusätzlicher Nachweis für ein Mindestmoment gemäß EC2, NA 6.54.1 erforderlich. Die hierfür notwendige Bewehrungsmenge in den mittleren Fundamentstreifen kann die oben errechnete Bewehrung übersteigen (vgl. auch Bemessungsprogramme). Auf den Nachweis der Querkrafttragfähigkeit (**Nachweis auf Durchstanzen**) wird im nachfolgenden Kapitel eingegangen.

10.3 Durchstanzen

10.3.1 Allgemeines

Versuche an dünnen Platten haben gezeigt, dass unter hohen konzentrierten Lasten ein kegelstumpfförmiger Betonkörper aus der Platte herausgebrochen wird. Dieses Versagen der Tragfähigkeit wird als Durchstanzen bezeichnet. Beim Durchstanzen handelt es sich um einen **Sonderfall der Querkraftbeanspruchung** von plattenförmigen Bauteilen.

Aus den Versuchen geht hervor, dass der Durchstanzkegel im Allgemeinen eine Neigung von 30° bis 35° aufweist, bei gedrunghenen Platten auch steiler bis ca. 45°. Die Gefahr des Durchstanzens besteht genauso bei Einzelfundamenten oder Gründungsplatten mit hohen Stützenlasten.

Bei geringer Beanspruchung erfolgt die Lastabtragung von Querkraft und Biegemoment zunächst radial. In gleicher Richtung entstehen dabei über der Stütze (bzw. unter der Stütze bei Fundamentplatten) radialverlaufende Biegerisse. Diese Rissbildung führt zu einer Veränderung der Steifigkeit und somit zu einer

Umlagerung der Biegemomente in tangentialer Richtung. Bei weiterer Laststeigerung entstehen daher zusätzlich tangentiale bzw. ringförmig um die Stütze verlaufende Risse, aus denen sich unter 30° bis 45° geneigte Schubrisse entwickeln. Dieses führt zu einer starken Einschnürung der Druckzone am Stützenrand. Bei Platten ohne Schubbewehrung wird die Querkraft dann im Wesentlichen von der eingeschnürten Druckzone und dem dabei gebildeten Druckring aufgenommen. Die Tragfähigkeit wird mit dem **Versagen des Druckringes** überschritten. Es kommt dann zu dem typischen Abschervvorgang.

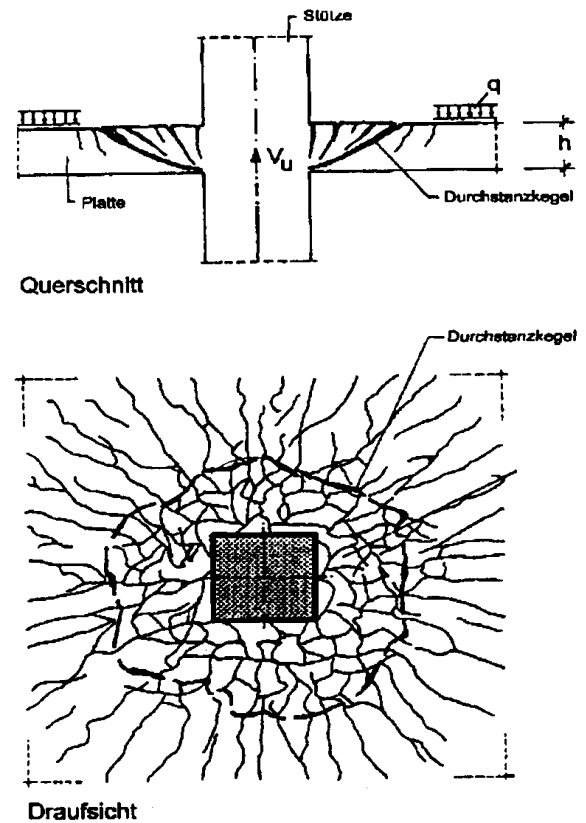


Bild 10.7: Rissbild beim Durchstanzen über einer Innenstütze im Versagenszustand

Nach EC2 gelten für das Durchstanzen die Grundsätze des Tragfähigkeitsnachweises für Querkraft, jedoch mit Ergänzungen. Grundsätzlich ist nachzuweisen, dass die einwirkende Querkraft V_{Ed} den Tragwiderstand V_{Rd} nicht überschreitet.

Nachweisformen: $V_{Ed} \leq V_{Rd}$ [MN] bzw. $v_{Ed} \leq v_{Rd}$ [MN/m²] auf Schnittfläche bezogen

Der Nachweis erfolgt in festgelegten Rundschnitten, außerhalb der Rundschnitte gelten die Regelungen für Querkraft. Als geeignetes Bemessungsmodell für den Nachweis gegen Durchstanzen im Grenzzustand der Tragfähigkeit gibt der EC2 im Abschnitt 6.4 das in Bild 10.8 dargestellte **Modell** an. Die kritische Fläche A_{crit} ist dabei parallel zur Lasteinleitungsfläche A_{load} anzunehmen.

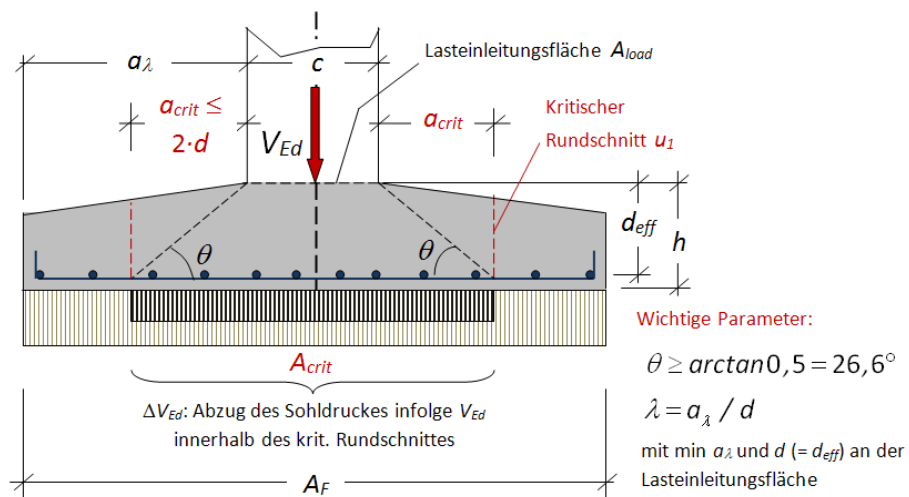


Bild 10.8: Bemessungsmodell für den Nachweis gegen Durchstanzen (bei Fundamenten)

10.3.2 Lasteinleitungsfläche und kritischer Rundschnitt

Die Festlegungen für das Durchstanzen mit einem geschlossenen kritischen Rundschnitt gelten für folgende Formen von Lasteinleitungsflächen A_{load} :

- rechteckige oder kreisförmige Flächen mit einem Umfang von $u_0 \leq 12 \cdot d$;
 dabei ist d die mittlere statische (effektive) Nutzhöhe des nachzuweisenden Bauteils, also $d = d_{eff} = 0,5 \cdot (d_x + d_y)$ und u_0 der Umfang der Lasteinzugsfläche.
- Rechteckige Flächen mit einem Verhältnis von Länge $a/b \leq 2$.
- Flächen mit beliebiger Form, die sinngemäß wie die oben erwähnten Formen begrenzt sind.

Die **Lasteinleitungsfläche** darf dabei nicht im Bereich anderweitig verursachter Querkräfte und nicht in der Nähe von anderen konzentrierten Lasten sein, so dass sich die kritischen Rundschnitte überschneiden. Der **kritische Rundschnitt** für runde und rechteckige Lasteinleitungsflächen ist als Schnitt im Abstand von a_{crit} vom Rand der Lasteinleitungsfläche festzulegen. Der **Umfang des kritischen Rundschnitts** wird mit u_1 bezeichnet. Bei gegliederten Lasteinleitungsflächen ist zunächst die Umhüllungslinie zu entwickeln. Von dieser Linie ist dann im Abstand von a_{crit} der kritische Rundschnitt. Die **kritische Fläche** A_{crit} ist die Fläche innerhalb des kritischen Rundschnittes u_1 . Weitere Rundschnitte innerhalb und außerhalb der kritischen Fläche sind affin zum kritischen Rundschnitt anzunehmen.

Wenn die oben genannten Bedingungen bezüglich der Form der Lasteinleitungsfläche bei Auflagerung von Stützen oder Wänden mit Rechteckquerschnitt nicht erfüllt sind, dürfen nur die im folgenden Bild dargestellten reduzierten Rundschnitte in Ansatz gebracht werden. Hierbei wird berücksichtigt, dass sich die Querkraftbeanspruchung auf die Ecken der Auflagerflächen konzentrieren.

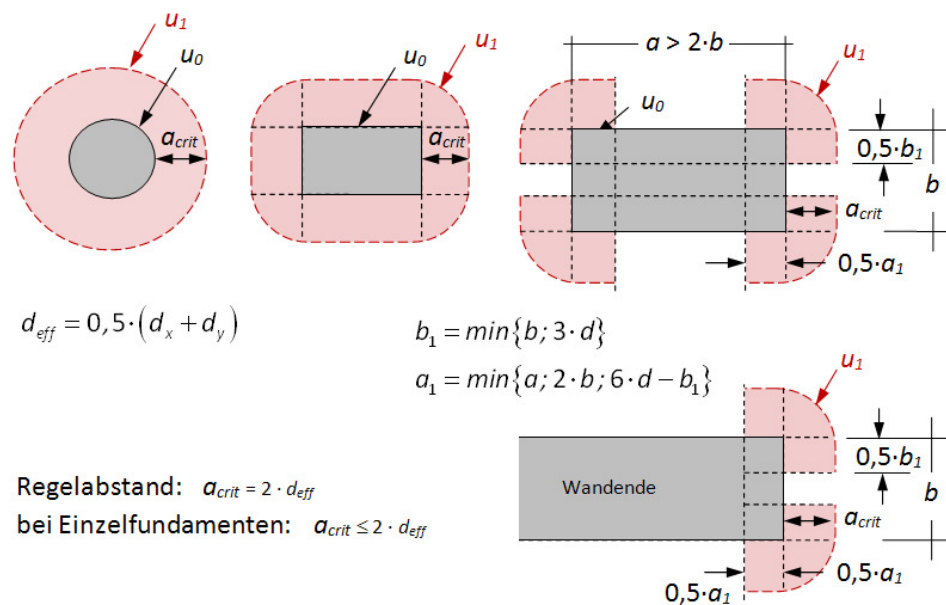


Bild 10.9: Kritische Rundschnitte um Lasteinleitungsflächen (Regelfälle)

Der Abstand des kritischen Rundschnitts für runde oder rechteckige Lasteinzugsflächen wird in der Norm mit $a_{crit} = 2 \cdot d_{eff}$ angegeben. Rundschnitte in einem **Abstand kleiner als $2 \cdot d_{eff}$** sind nur dann zu berücksichtigen, wenn der konzentrierten Last (aus der Stütze) ein hoher Gegendruck (aus der **Sohlpressung bei Einzelfundamenten**) oder die Auswirkungen einer Last oder einer Auflagerreaktion innerhalb eines Abstandes von $2,0 \cdot d_{eff}$ vom Rand der Lasteinleitungsfläche entgegensteht. In diesen Fällen ist der Ab-

stand a_{crit} **iterativ** zu ermitteln, da – wie bei Fundamenten typisch – die Querkraft V_{Ed} um die günstige Wirkung aus den Sohlpressungen innerhalb der kritischen Fläche abgemindert werden darf.

Für Bodenplatten und schlanke Fundamente mit

$$\lambda = a_{\lambda} / d_{eff} > 2,0 \quad (\alpha_{\lambda} = \text{kürzester Abstand zw. Lasteinleitungsfläche u. Fundamentrand})$$

darf zur Vereinfachung der Rechnung (Vermeidung einer iterativen Ermittlung) ein konstanter Rundschnitt im Abstand $1,0 \cdot d_{eff}$ angenommen werden.

10.3.3 Nachweise zur Sicherheit gegen Durchstanzen

Die **einwirkende Querkraft** V_{Ed} entspricht der Kraft, die von der Stütze in die Fundamentplatte eingeleitet wird und in den vorausgegangenen Kapiteln als N_{Ed} in [MN] bzw. [kN] bezeichnet wurde. Bei Fundamenten darf die günstige Wirkung aus den Sohlpressungen innerhalb des kritischen Rundschnittes abgemindert werden; es wird mit $V_{Ed,red}$ weitergerechnet:

$$\begin{aligned} V_{Ed,red} &= V_{Ed} - \Delta V_{Ed} = N_{Ed} - \sigma_{gd(N)} \cdot A_{crit} \\ &= N_{Ed} - \frac{N_{Ed}}{A_F} \cdot A_{crit} = N_{Ed} \cdot \left(1 - \frac{A_{crit}}{A_F} \right) \end{aligned} \quad \text{in [MN] oder [N]}$$

Die auf die **Mantelfläche des kritischen Schnittes** bezogene Bemessungsquerkraft ($\equiv u_1$, dem Umfang von A_{crit} multipliziert mit der mittleren Nutzhöhe d_{eff}) wird ermittelt aus:

$$v_{Ed} = \beta \cdot \frac{V_{Ed,red}}{u_1 \cdot d_{eff}} \quad \text{in [MN/m}^2\text{] bzw. [N/mm}^2\text{]}$$

Der Beiwert $\beta \geq 1,1$ ist ein **Korrekturfaktor**, der die Auswirkungen von Momenten in der Lasteinleitungsfläche und damit die ungleichmäßige Verteilung der Schubspannungen in der Mantelfläche des Rundschnittes näherungsweise berücksichtigt. Bei zentrisch beanspruchten Fundamenten kann der Mindestwert von β , also $\beta = 1,1$ gesetzt werden.

Der **Bemessungswiderstand** v_{Rd} [MN/m²] bzw. [N/mm] wird durch einer der folgenden Werte ermittelt:

- $v_{Rd,c}$ - Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit in der Mantelfläche des kritischen Schnittes **ohne Durchstanzbewehrung**; d.h. ohne Bügel oder andere Querkraftbewehrung: Bei dicken Platten, erst recht bei dicken Fundamentplatten ist der Querkrafttragwiderstand bereits so hoch, dass keine weiteren Bemessungsschritte zur Ermittlung einer Durchstanzbewehrung in Form von Bügeln oder anderer Querkraftbewehrung erforderlich sind. Es muss nachgewiesen werden, dass $v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$ ist.
- $v_{Rd,max}$ - Bemessungswert der **maximalen Querkrafttragfähigkeit** in der Mantelfläche des kritischen Schnittes mit Durchstanzbewehrung: Es muss nachgewiesen werden, dass $v_{Ed} \leq v_{Rd,max}$ ist. Es sind weitere Bemessungsschritte zur Ermittlung einer Durchstanzbewehrung erforderlich.
- $v_{Rd,cs}$ - Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit **mit Durchstanzbewehrung**: Es ist in sogenannten inneren Rundschnitten $v_{Ed} \leq v_{Rd,cs}$ nachzuweisen, in dem eine ausreichende Bewehrungsmenge bestimmt wird, mit der die erforderliche Querkrafttragwiderstand sichergestellt wird.

- $V_{Rd,c,out}$ - Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit in der Mantelfläche des **äußeren Rund-**
schnitts außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs:
 Kann im äußeren Rundschnitt der Nachweis $v_{Ed} \leq v_{Rd,c,out}$ erbracht werden, so kann
 außerhalb davon auf weitere Durchstanzbewehrung verzichtet werden. Die Platte
 ist nun in der Lage, die Querkraft ohne Querkraftbewehrung aufzunehmen.

Analog zu dem üblichen Querkraftnachweis bei stabförmigen Bauteilen ist die Durchstanztragfähigkeit bei Fundamenten **ohne Durchstanzbewehrung** wie folgt zu bestimmen:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot \frac{2 \cdot d_{eff}}{a_{crit}} \geq v_{min} \cdot \frac{2 \cdot d_{eff}}{a_{crit}} \quad [\text{MN/m}^2] \text{ bzw. } [\text{N/mm}^2]$$

Die darin enthaltenen Parameter sind:

- $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_c$ (in der Regel gilt $\gamma_c = 1,5$)
- $k = 1 + (200/d_{eff})^{0,5} \leq 2,0$ mit d_{eff} in [mm]
- $\rho_l = (\rho_{lx} \cdot \rho_{ly})^{0,5} \leq \min \{ 0,02; 0,5 \cdot f_{cd} / f_{yd} \}$
 Längsbewehrungsgrad der verankerten Hauptbewehrung in x- und y-Richtung auf eine
 Streifenbreite von $c_y + 3 \cdot d_{eff}$ resp. $c_x + 3 \cdot d_{eff}$
- a_{crit} = Abstand des kritischen Rundschnitts zum Stützenrand
- d_{eff} = mittlere (effektive) Nutzhöhe des Fundamentes

Die Mindesttragfähigkeit v_{min} wird berechnet mit:

$$v_{min} = (\kappa_1 / \gamma_c) \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2}$$

- mit $\kappa_1 = 0,0525$ für $d_{eff} \leq 60$ cm
- $\kappa_1 = 0,0375$ für $d_{eff} \geq 80$ cm (Zwischenwerte interpolieren)

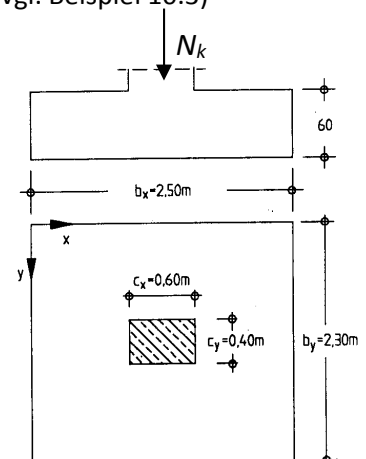
Auf Durchstanzbewehrung darf verzichtet werden, wenn der Nachweis $v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$ erbracht werden kann. Das Einlegen einer Durchstanzbewehrung bei Fundamenten erfordert einen hohen Arbeitsaufwand und sollte durch geeignete Wahl der Fundamentabmessungen, der Betongüte oder einer ausreichenden Längsbewehrung vermieden werden.

Beispiel 10.4: Durchstanznachweis für bewehrtes Einzelfundament (vgl. Beispiel 10.3)

Gegeben: Ein Einzelfundament für eine mittig belastete Stahlbetonstütze ist zu entwerfen und zu bemessen. Das Fundament befindet sich nicht in betonangreifenden Boden. Das Fundament ist durch die Stütze wie folgt belastet:

- Eigenlast: $N_{gk} = 1000$ kN
- Veränderliche Lasten: $N_{qk} = 500$ kN
- Baustoffe: C 30/37 mit $f_{cd} = 17,0$ N/mm²

Gesucht: Nachweis, ob Fundament ohne Durchstanzbewehrung ausgeführt werden kann.



Lasteinleitungsfläche: $c_x/c_y = 600 / 400 = 1,5 \leq 2,0 \quad \checkmark$
 $u_{Load} = 2 \cdot (0,60 + 0,40) = 2,0 \text{ m} \leq 12 \cdot (0,537 + 0,521) / 2 = 6,35 \text{ m} \quad \checkmark$

Einwirkung: $V_{Ed} = N_{Ed} = (1,35 \cdot 1000 + 1,50 \cdot 500) \cdot 10^{-3} = \underline{2,10 \text{ MN}}$

Lage des kritischen Rundschnitts:

Funda.-schlankheit: $\lambda = a_\lambda / d_{eff} = 0,95 / 0,529 = \underline{1,79} < 2,0 \rightarrow a_{crit} \text{ iterativ bestimmen.}$

Ansatz: $a_{crit} = 0,6 \text{ m} \rightarrow u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot a_{crit} = 2 \cdot (0,6 + 0,4) + 2 \cdot \pi \cdot 0,6 = \underline{5,77 \text{ m}}$

$$A_{crit} = c_x \cdot c_y + 2 \cdot a_{crit} \cdot (c_x + c_y) + \pi \cdot a_{crit}^2 = \underline{2,571 \text{ m}^2}$$

$$V_{Ed,red} = 2,10 \cdot [1 - 2,571 / (2,5 \cdot 2,3)] = \underline{1,161 \text{ MN}}$$

$$v_{Ed} = 1,1 \cdot 1,161 / (5,77 \cdot 0,529) = \underline{0,4184 \text{ MN/m}^2}$$

mit $k = 1 + (200/529)^{0,5} = 1,615 \leq 2,0$

und $\rho_l = [18,05 / (230 \cdot 53,7) \cdot 20,14 / (250 \cdot 52,1)]^{0,5} = \underline{0,0015}$

$$v_{min} = 0,0525 / 1,5 \cdot 1,615^{3/2} \cdot 30,0^{1/2} = 0,3934 \text{ MN/m}^2$$

$$v_{Rd,c} = 0,15 / 1,5 \cdot 1,615 \cdot (100 \cdot 0,0015 \cdot 30,0)^{1/3} \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,60)$$

$$= 0,470 \text{ MN/m}^2 \geq 0,3934 \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,60) = \underline{0,694 \text{ MN/m}^2}$$

$v_{Rd,c} / v_{Ed} = 0,694 / 0,4184 = \underline{1,659}$ Ziel der Iteration: $v_{Rd,c} / v_{Ed} \rightarrow \text{Minimum}$

Ansatz: $a_{crit} = 0,4 \text{ m} \rightarrow u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot a_{crit} = 2 \cdot (0,6 + 0,4) + 2 \cdot \pi \cdot 0,4 = \underline{4,51 \text{ m}}$

$$A_{crit} = c_x \cdot c_y + 2 \cdot a_{crit} \cdot (c_x + c_y) + \pi \cdot a_{crit}^2 = \underline{1,543 \text{ m}^2}$$

$$V_{Ed,red} = 2,10 \cdot [1 - 1,543 / (2,5 \cdot 2,3)] = \underline{1,536 \text{ MN}}$$

$$v_{Ed} = 1,1 \cdot 1,536 / (4,51 \cdot 0,529) = \underline{0,7081 \text{ MN/m}^2}$$

mit $k = 1,615$ und $\rho_l = \underline{0,0015}$ sowie $v_{min} = 0,3934 \text{ MN/m}^2$

$$v_{Rd,c} = 0,1 \cdot 1,615 \cdot (100 \cdot 0,0015 \cdot 30,0)^{1/3} \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,40)$$

$$= 0,705 \text{ MN/m}^2 \geq 0,3934 \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,40) = \underline{1,041 \text{ MN/m}^2}$$

$v_{Rd,c} / v_{Ed} = 1,041 / 0,7081 = \underline{1,470}$ Ziel der Iteration: $v_{Rd,c} / v_{Ed} \rightarrow \text{Minimum}$

Ansatz: $a_{crit} = 0,405 \text{ m} \rightarrow u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot a_{crit} = 2 \cdot (0,6 + 0,4) + 2 \cdot \pi \cdot 0,405 = \underline{4,545 \text{ m}}$

$$A_{crit} = c_x \cdot c_y + 2 \cdot a_{crit} \cdot (c_x + c_y) + \pi \cdot a_{crit}^2 = \underline{1,567 \text{ m}^2}$$

$$V_{Ed,red} = 2,10 \cdot [1 - 1,567 / (2,5 \cdot 2,3)] = \underline{1,528 \text{ MN}}$$

$$v_{Ed} = 1,1 \cdot 1,528 / (4,545 \cdot 0,529) = \underline{0,6991 \text{ MN/m}^2}$$

mit $k = 1,615$ und $\rho_l = \underline{0,0015}$ sowie $v_{min} = 0,3934 \text{ MN/m}^2$

$$v_{Rd,c} = 0,1 \cdot 1,615 \cdot (100 \cdot 0,0015 \cdot 30,0)^{1/3} \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,405)$$

$$= 0,696 \text{ MN/m}^2 \not\geq 0,3934 \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,405) = \underline{1,028 \text{ MN/m}^2}$$

$v_{Rd,c} / v_{Ed} = 1,028 / 0,6991 = \underline{1,470}$ nach Iteration: $v_{Rd,c} / v_{Ed} = \text{Minimum}$

Hinweis: Excel-Anwendung
benutzen (Datei zum Down-
load auf Laufwerk I:\)

Nachweis im maßgebenden kritischen Rundschnitt bei $a_{crit} = 0,405 \text{ m}$:

$$v_{Ed} = 0,6991 \text{ MN/m}^2 \leq v_{Rd,c} = 1,028 \text{ MN/m}^2 \rightarrow \text{Nachweis erfüllt; keine Durchstanzbew.}$$

Wenn – anders wie in Beispiel 10.4 gezeigt – der Nachweis $v_{Ed} \geq v_{Rd,c}$ auch mit einer sinnvollen Erhöhung der Längsbewehrung, der Betonfestigkeitsklasse und/oder der Nutzhöhe nicht (mehr) erfüllt werden kann, so ist eine Durchstanzbewehrung längs mehrerer Rundschnitte zu bemessen. Zusätzlich ist immer zu prüfen, ob im kritischen Rundschnitt bei u_1 der **maximale Wert der Durchstanztragfähigkeit** nicht überschritten wird:

$$v_{Ed} = v_{Ed,u1} \leq v_{Rd,max} = 1,4 \cdot v_{Rd,c,u1}$$

Die **erforderliche Durchstanzbewehrung** errechnet sich aus den folgenden Bemessungsgleichungen:

- für **Bügel** ($f_{ywd,eff} = \min \{ 250 + 0,25 \cdot d_{eff}; f_{ywd} \}$):

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,s} = \frac{A_{sw,1+2} \cdot f_{ywd,ef}}{u_1 \cdot d} \rightarrow A_{sw,1+2,rqd} = \frac{v_{Ed}}{u_1 \cdot d_{eff} \cdot f_{ywd,ef}} = \frac{\beta \cdot V_{Ed,red}}{f_{ywd,ef}} \quad [\text{cm}^2]$$

- für **aufgebogener Bewehrung** ($\alpha =$ Neigung gegenüber der Horizontalen; $f_{ywd,eff} = f_{ywd}$):

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,s} = \frac{1,3 \cdot A_{sw,1+2} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \sin \alpha}{u_1 \cdot d}$$

$$\rightarrow A_{sw,1+2,rqd} = \frac{v_{Ed}}{1,3 \cdot u_1 \cdot d_{eff} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \sin \alpha} = \frac{\beta \cdot V_{Ed,red}}{1,3 \cdot f_{ywd,ef} \cdot \sin \alpha} \quad [\text{cm}^2]$$

Die Bewehrungsmenge $A_{sw,1+2}$ wird gleichmäßig auf die beiden ersten Reihen im Abstand von $0,3 \cdot d_{eff}$ und $0,8 \cdot d_{eff}$ verteilt (vgl. Kap. 10.3.4). Sind ggf. weitere Bewehrungsreihen erforderlich, so sind je Reihe $1/3 \cdot A_{sw,1+2}$ vorzusehen, wobei dann der Abzug der Bodenpressung mit der Fundamentfläche innerhalb der betrachteten Bewehrungsreihe erfolgen darf (v_{Ed} ist kleiner als $v_{Ed,u1}$).

Wenn Durchstanzbewehrung notwendig ist, so ist auf eine **Mindestdurchstanzbewehrung** zu achten. Jeder Bügelschenkel muss mindestens folgende Querschnittsfläche aufweisen:

$$A_{sw,min} = A_s \cdot \sin \alpha = \frac{0,08}{1,5} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} \cdot s_r \cdot s_t \quad \text{mit } f_{ck} \text{ in } [\text{N/mm}^2]$$

Dabei ist:

- α = der Winkel zwischen der Durchstanzbewehrung und der Längsbewehrung (bei vertikalen Bügeln $\alpha = 90^\circ \rightarrow \sin \alpha = 1$)
- s_r = der Abstand der Bügel der Durchstanzbewehrung in radialer Richtung
- s_t = der Abstand der Bügel der Durchstanzbewehrung in tangentialer Richtung

Um sicher zu stellen, dass sich die angegebenen Tragwiderstände $v_{Rd,c}$ und $v_{Rd,s}$ und $v_{Rd,max}$ auch so einstellen wie berechnet, muss die Hauptbewehrung in x- und y-Richtung für folgende **Mindestbiegemomente** (je Längeneinheit bezogen auf die Breite des kritischen Rundschnitts) bemessen sein:

$$m_{Ed,x} \geq \eta_x \cdot V_{Ed} \quad \text{bzw.} \quad m_{Ed,y} \geq \eta_y \cdot V_{Ed}$$

Bei mittig auf dem Fundament angeordnete Stützen, die planmäßig zentrisch beansprucht sind, sind die Beiwerte η_x und η_y mit 0,125 anzusetzen (andere η -Faktoren und β -Werte siehe Durchstanznachweise bei Platten in Kapitel 11).

Beispiel 10.5: Durchstanznachweis für bewehrtes Einzelfundament mit Durchstanzbewehrung

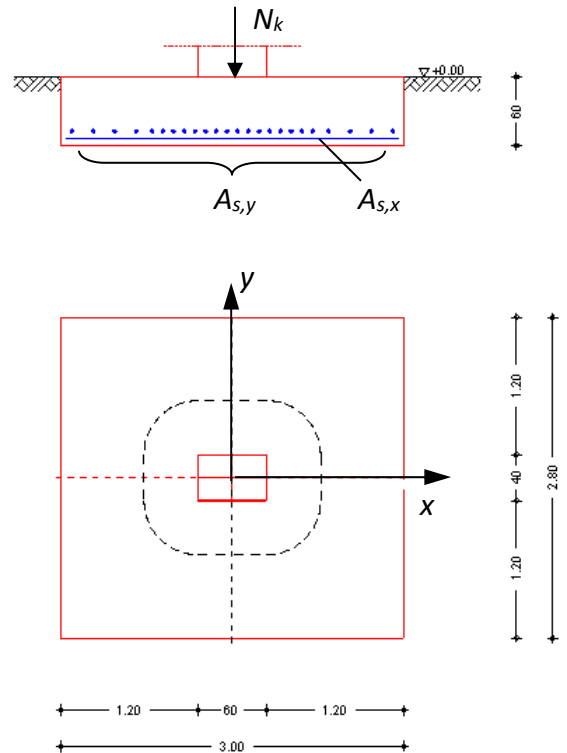
Gegeben: Ein Einzelfundament ($b_x/b_y = 3,0 \text{ m}/2,8 \text{ m}$) für eine mittig belastete Stahlbetonstütze ist im Hinblick auf das Durchstanzn zu bemessen. Das Fundament ist durch die Stütze wie folgt belastet:

Eigenlast: $N_{gk} = 1500 \text{ kN}$
 Veränderliche Lasten: $N_{qk} = 750 \text{ kN}$
 Baustoffe: C 25/30 mit $f_{cd} = 14,2 \text{ N/mm}^2$

Die Biegebemessung wurde bereits durchgeführt und hat folgendes ergeben ($d_x = 537 \text{ mm}$; $d_y = 521 \text{ mm}$):

Ri	Streifen [m]	erf. As [cm ²]	gewählt n ds [mm]	vorh. As [cm ²]
X	0.00 - 0.35	2.56	2 Ø 16	4.02
	0.35 - 0.70	3.20	2 Ø 16	4.02
	0.70 - 1.05	5.75 _v	3 Ø 16	6.03
	1.05 - 1.40	5.76	3 Ø 16	6.03
	1.40 - 1.75	5.76	3 Ø 16	6.03
	1.75 - 2.10	5.75 _v	3 Ø 16	6.03
	2.10 - 2.45	3.20	2 Ø 16	4.02
	2.45 - 2.80	2.56	2 Ø 16	4.02
Y	0.00 - 0.37	3.19	2 Ø 16	4.02
	0.37 - 0.75	3.90	2 Ø 16	4.02
	0.75 - 1.12	6.40 _v	4 Ø 16	8.04
	1.12 - 1.50	6.40 _v	4 Ø 16	8.04
	1.50 - 1.87	6.40 _v	4 Ø 16	8.04
	1.87 - 2.25	6.40 _v	4 Ø 16	8.04
	2.25 - 2.62	3.90	2 Ø 16	4.02
	2.62 - 3.00	3.19	2 Ø 16	4.02

v Mindestbewehrung zur Sicherstellung der Querkrafttragfähigkeit in der Verteilungsbreite gem. DIN EN 1992-1-1, NCI Zu 6.4.5



Gesucht: Bemessung hinsichtlich des Durchstanzens mit Nachweis auf Mindestbewehrung

Lasteinleitungsfläche: $c_x/c_y = 600 / 400 = 1,5 \leq 2,0 \quad \checkmark$

$u_{Load} = 2 \cdot (0,60 + 0,40) = 2,0 \text{ m} \leq 12 \cdot (0,537 + 0,521) / 2 = 6,35 \text{ m} \quad \checkmark$

Einwirkung: $V_{Ed} = N_{Ed} = (1,35 \cdot 1500 + 1,50 \cdot 750) \cdot 10^{-3} = \underline{3,15 \text{ MN}}$

Lage des kritischen Rundschnitts:

Funda.-schlankheit: $\lambda = a_\lambda / d_{eff} = 1,20 / 0,529 = \underline{2,27 \geq 2,0} \rightarrow$ zulässig: $\alpha_{crit} \cong 1,0 \cdot d_{eff}$.

Vorgabe: $\alpha_{crit} = 0,529 \text{ m} \rightarrow u_1 = 2 \cdot (c_x + c_y) + 2 \cdot \pi \cdot \alpha_{crit} = 2 \cdot (0,6 + 0,4) + 2 \cdot \pi \cdot 0,529 = \underline{5,324 \text{ m}}$

$A_{crit} = c_x \cdot c_y + 2 \cdot \alpha_{crit} \cdot (c_x + c_y) + \pi \cdot \alpha_{crit}^2 = \underline{2,177 \text{ m}^2}$

$V_{Ed,red} = 3,15 \cdot [1 - 2,177 / (3,0 \cdot 2,8)] = \underline{2,334 \text{ MN}}$

$v_{Ed} = 1,10 \cdot 2,334 / (5,324 \cdot 0,529) = \underline{0,9115 \text{ MN/m}^2}$

mit $k = 1 + (200/529)^{0,5} = 1,615 \leq 2,0$

und $\rho_l = [40,2 / (280 - 53,7) \cdot 48,2 / (300 - 52,1)]^{0,5} = \underline{0,0029}$

$v_{min} = 0,0525 / 1,5 \cdot 1,615^{3/2} \cdot 25,0^{1/2} = 0,3591 \text{ MN/m}^2$

$v_{Rd,c} = 0,1 \cdot 1,615 \cdot (100 \cdot 0,0029 \cdot 25,0)^{1/3} \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,529)$

$= 0,625 \text{ MN/m}^2 \not\geq 0,3591 \cdot (2 \cdot 0,529 / 0,529) = \underline{0,7183 \text{ MN/m}^2}$

$v_{Rd,c} / v_{Ed} = 0,7183 / 0,9115 = \underline{0,788} \rightarrow v_{Ed} \geq v_{Rd,c} \rightarrow$ Durchstanzbew. erforderl.

Maximale Durchstanztragfähigkeit: $v_{Ed} = 0,9115 \text{ MN/m}^2 \leq v_{Rd,max} = 1,4 \cdot v_{Rd,c,u1} = 1,006 \text{ MN/m}^2 \quad \checkmark$

Ermittlung der Durchstanzbewehrung: $f_{ywd,ef} = \min \{ 250 + 0,25 \cdot d_{eff}; f_{ywd} \} = 382,25 \text{ N/mm}^2$

$$A_{sw,1+2,rqd} = \beta \cdot V_{Ed,red} / f_{ywd,ef} = 1,1 \cdot 2,334 \cdot 10^6 / 382,25 = 6717 \text{ mm}^2 = 67,2 \text{ cm}^2$$

Gewählt: in erster Reihe im Abstand von $0,3 \cdot d_{eff} = 0,16 \text{ m}$: $16 \text{ } \varnothing 12 = 36,2 \text{ cm}^2$
 in zweiter Reihe im Abstand von $0,8 \cdot d_{eff} = 0,42 \text{ m}$: $16 \text{ } \varnothing 12 = 36,2 \text{ cm}^2$

$$A_{sw,1+2,prov} = 72,4 \text{ cm}^2 \geq 67,2 \text{ cm}^2$$

Hinweis: Eine weitere Bewehrungsreihe im Abstand vom $1,5 \cdot d_{eff}$ von der 2. Reihe aus betrachtet, also bei $(0,8+1,5) \cdot d_{eff} = 1,22 \text{ m}$ von der Stützenkante aus gerechnet, ist nicht erforderlich, da dieser Wert außerhalb des Fundaments liegt. Der Nachweis in diesem Schnitt $v_{Ed} \leq v_{Rd,c,out}$ ist somit automatisch erfüllt.

Minstdurchstanzbewehrung (mit $s_r = 0,5 \cdot d_{eff} = 0,26 \text{ m}$ und $s_t = u_2/16 = 4,66/16 = 0,29 \text{ m}$)

Für jeden Bügelschenkel gilt: $A_{sw,min} = 0,08/1,5 \cdot 25,0^{0,5} / 500,0 \cdot 260 \cdot 290 = 40,2 \text{ mm}^2$

$$A_{sw,min} = 0,4 \text{ cm}^2 < A_{sw,prov} = 1,13 \text{ cm}^2 \text{ (für } \varnothing 12) \checkmark$$

10.3.4 Konstruktive Durchbildung von Fundamenten

Einzulegen ist – sofern erforderlich – eine Durchstanzbewehrung zwischen der Lasteinleitungsfläche bis zum Abstand von $1,5 \cdot d_{eff}$ innerhalb des (geschlossenen) Rundschnitts mit u_{out} , an dem die Querkraftbewehrung nicht mehr benötigt wird. Sie ist **mindestens in zwei konzentrischen Reihen** von Bügelschenkeln im Abstand $\leq 0,75 \cdot d_{eff}$ einzulegen. Diese muss mind. 50% der Längsbewehrung in tangentialer und radialer Richtung umschließen. Innerhalb von a_{crit} soll der tangentielle Abstand der Bügelschenkeln $\leq 1,5 \cdot d_{eff}$, außerhalb $\leq 2 \cdot d_{eff}$ betragen.

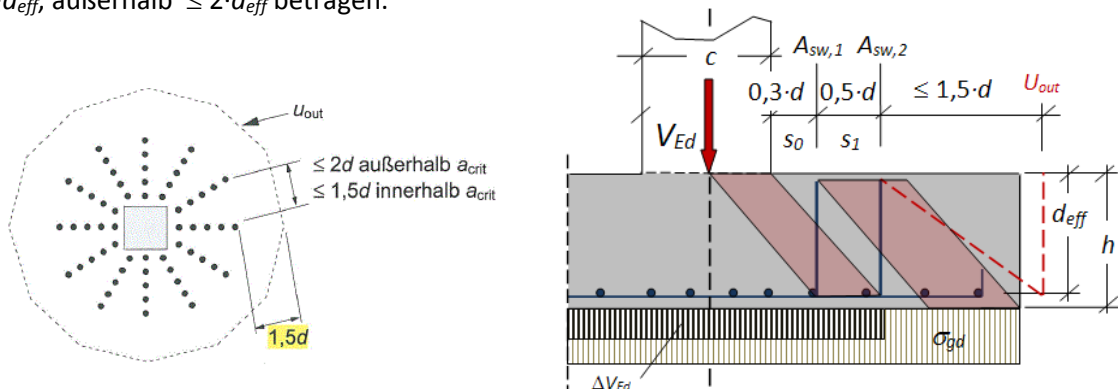
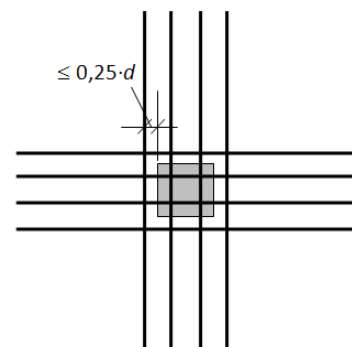


Bild 10.10: Regelanordnung der Durchstanzbewehrung bei Fundamenten (1)

Bei aufgebogenen Stäben darf eine Bewehrungsreihe als ausreichend betrachtet werden (Bild 10.11). Aufgebogene Stäbe, die die Lasteinzugsfläche A_{load} kreuzen oder in einem Abstand von weniger als $0,25 \cdot d_{eff}$ vom Rand dieser Fläche liegen, dürfen als Durchstanzbewehrung verwendet werden (nebenstehende Skizze).

Die Stabdurchmesser einer Durchstanzbewehrung sind auf die mittlere statische Nutzhöhe d_{eff} der Fundamentplatte abzustimmen:

- Bügel: $\varnothing \leq 0,05 \cdot d_{eff}$
- Schrägaufbiegungen: $\varnothing \leq 0,08 \cdot d_{eff}$



Ist bei gedrunenen Fundamenten mit $a_\lambda \leq 2 \cdot d_{eff}$ eine dritte Bewehrungsreihe erforderlich, so ist ihr Abstand zur zweiten Bewehrungsreihe auf $0,5 \cdot d_{eff}$ zu begrenzen. Für schlanke Fundamente mit $a_\lambda > 2 \cdot d_{eff}$ dieser Abstand auf auf $0,75 \cdot d_{eff}$ vergrößert werden.

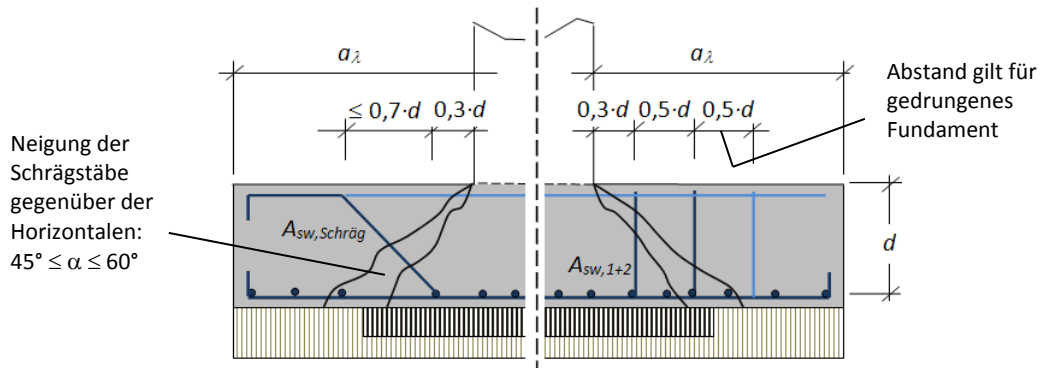


Bild 10.11: Regelanordnung der Durchstanzbewehrung bei Fundamenten (2)

Die **Minstdurchstanzbewehrung** wird auf den Wirkungsbereich eines einzelnen Bügelschenkels bezogen ($s_r \cdot s_t$). Durch Umstellung auf

$$\rho_{sw,min} = \frac{A_{sw,min}}{s_r \cdot s_t} = \frac{A_s \cdot \sin \alpha}{s_r \cdot s_t} = \frac{0,08}{1,5} \cdot \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}}$$

kann die Minstdurchstanzbewehrung auch für den Umfang einer Bewehrungsreihe durch Einsatz des tangentialen Abstandes s_t durch u_i ermittelt werden. Das ist vorteilhaft, wenn man die tatsächliche Anzahl der zu wählenden Bügelschenkel in einer Bewehrungsreihe und damit s_t noch nicht kennt. Mit dem maximal zulässigen Schenkelabstand $s_t = 1,5 \cdot d_{eff}$ bzw. $s_t = 2,0 \cdot d_{eff}$ erhält man alternativ den größten Mindestdurchmesser.

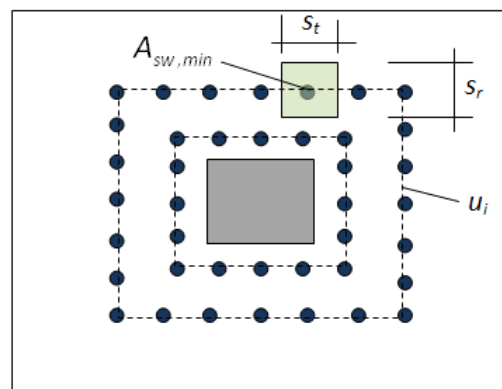


Bild 10.12: Definition der Minstdurchstanzbewehrung

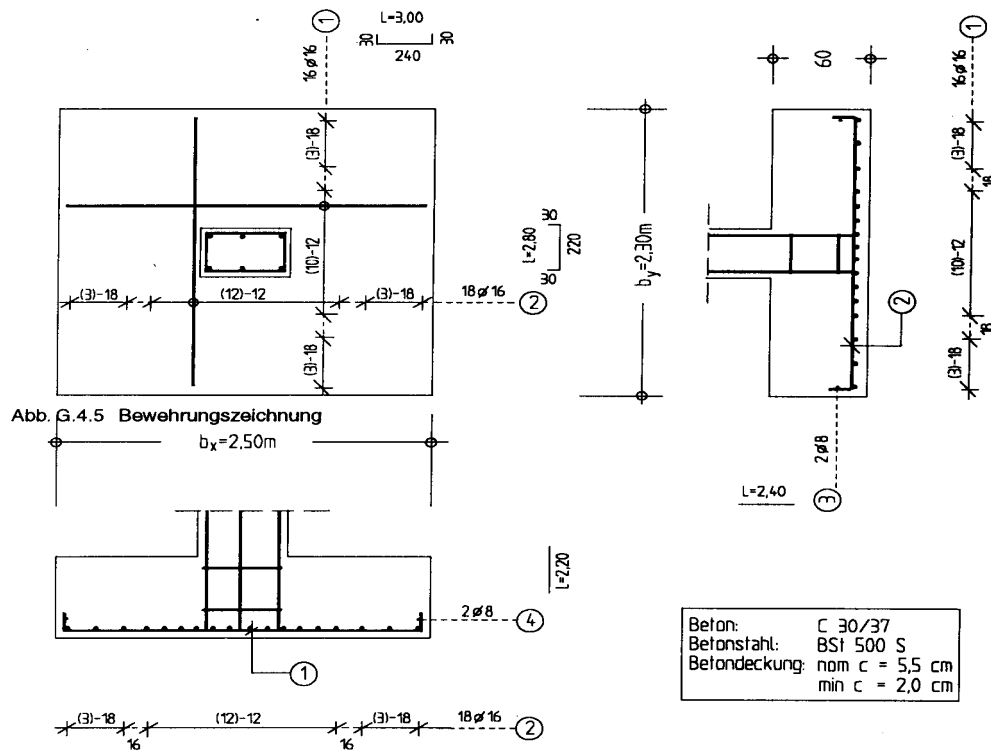


Bild 10.13: Beispiel für Bewehrungsplan eines Einzelfundamentes ohne Durchstanzbewehrung