

Prof. Dr.-Ing. Jens Minnert

# Einführung in den Eurocode 2

## Teil 2: Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT)

Im Teil 2 der Beitragsreihe werden die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit (GZT) im Eurocode 2 in Verbindung mit dem Nationalen Anhang vorgestellt. Hierbei wird besonders auf die Änderungen gegenüber den bekannten Regelungen in DIN 1045-1 eingegangen. Im Einzelnen wird die Biege- und Querkraftbemessung, die Bemessung von Druckgliedern sowie ausführlich der Durchstanznachweis behandelt.

### 1 Biegebemessung

Die Grundlagen der Biegebemessung (Ebenbleiben des Querschnitts, Arbeitslinie des Betons, Arbeitslinien des Betonstahls) in EC 2-1-1 entsprechen weitgehend den Angaben in DIN 1045-1. Die möglichen Dehnungsverteilungen sind mit den entsprechenden Festlegungen im Nationalen Anhang (NA) zwischen EC 2-1-1, Bild 6.1 und DIN 1045-1, Bild 30 identisch. Neu im EC 2 (DIN EN 1992-1-1), 6.1 (4) ist der Ansatz einer Mindestausmitte  $e_0 = h / 30 \geq 20 \text{ mm}$  für Querschnitte mit Längsdruckkraft. Im NA wird klargestellt, dass diese Ausmitte nur für Druckglieder nach Theorie I. Ordnung anzusetzen ist.

### 2 Querkraftbemessung

Mit Hilfe der Angaben im NA des EC 2 ist eine mit DIN 1045-1 vergleichbare Vorgehensweise bei der Querkraftbemessung möglich. In Tabelle 1 sind die unterschiedlichen Bezeichnungen bzw. Indizes der einzelnen Querkraftwiderstände und Traganteile zusammengestellt. Zu beachten ist, dass  $V_{Rd,c}$  nicht mehr den Betontraganteil eines Bauteils mit Querkraftbewehrung beschreibt, sondern den Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung darstellt.

EC 2-1-1	DIN 1045-1	Werte
$V_{Rd,c}$	$V_{Rd,ct}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung
$V_{Rd,cc}$	$V_{Rd,c}$	Bemessungswert des Betontraganteils eines Bauteils mit Querkraftbewehrung
$V_{Rd,s}$	$V_{Rd,sy}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit mit Querkraftbewehrung

Tabelle 1. Gegenüberstellung der Querkraftwiderstände und Traganteile nach EC 2-1-1 + NA und DIN 1045-1

#### 2.1 Bauteile ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung

Der Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit eines Stahlbetonbauteils ohne rechnerisch erforderliche Querkraftbewehrung entspricht im Wesentlichen der aus DIN 1045-1 bekannten Regel. Die Betondruckspannung  $\sigma_{cp}$  in der Schwerachse darf nur mit maximal  $0,2 \cdot f_{cd}$  angesetzt werden. Weiterhin ist zu beachten, dass die Vorzeichenregelung gegenüber der DIN 1045-1 umgekehrt ist (Druckspannungen sind positiv). Nachfolgend sind die wesentlichen Gleichungen beispielhaft zusammengestellt.

$$V_{Rd,c} = \left[ \frac{0,15}{\gamma_c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,12 \cdot \sigma_{cp} \right] \cdot b_w \cdot d \quad (1)$$

$$V_{Rd,c} = [v_{\min} + 0,12 \cdot \sigma_{cp}] \cdot b_w \cdot d \quad (2)$$

mit  $\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} \leq 0,2 \cdot f_{cd}$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$$

$$v_{\min} = (0,0525/\gamma_c) \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d \leq 600 \text{ mm} \quad (3)$$

$$v_{\min} = (0,0375/\gamma_c) \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d > 800 \text{ mm} \quad (4)$$

Für  $600 \text{ mm} < d \leq 800 \text{ mm}$  darf linear interpoliert werden.

#### 2.2 Bauteile mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung

Die Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit von Bauteilen mit rechnerisch erforderlicher Querkraftbewehrung nach EC 2-1-1/NA erfolgt unverändert auf Basis der Fachwerkanalogie mit variablem Druckstrebenwinkel nach Reineck [1]. Das Originalkonzept des EC 2 für die Querkraftbemessung wurde für Deutschland nicht übernommen. Wesentlicher Unterschied in den Konzepten ist die untere Begrenzung des Druckstrebenwinkels  $\theta$ . In beiden Konzepten darf i. d. R. der Winkel zwischen  $45^\circ$  und einem unteren Grenzwert frei gewählt werden.

Die Berechnung und Begrenzung des Druckstrebenwinkels  $\theta$  wurde im Nationalen Anhang (NA) unverändert aus DIN 1045-1 übernommen. Beim Druckstrebenachweis hat sich gegenüber der Formulierung in DIN 1045-1 die Gleichung zur Bestimmung der maximalen Druckstrebentragfähigkeit  $V_{Rd,max}$  nur geringfügig geändert.

$$V_{Rd,max} = \alpha_{cw} \cdot b_w \cdot z \cdot v_1 \cdot \frac{f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (5)$$

Im NA festgelegte Parameter:

$$v_1 = 0,75 \cdot v_2 \quad v_2 = (1,1 - f_{ck}/500) \leq 1,0 \quad \alpha_{cw} = 1,0$$

$$V_{Rd,max} = 1,0 \cdot b_w \cdot z \cdot 0,75 \cdot \left(1,1 - \frac{f_{ck}}{500}\right) \cdot \frac{f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (6)$$

Formulierung in DIN 1045-1, Gleichung 76:

$$V_{Rd,max} = b_w \cdot z \cdot 0,75 \cdot \frac{f_{cd}}{\cot\theta + \tan\theta} \quad (7)$$

### 3 Durchstanzen

#### 3.1 Allgemeines

Das Tragverhalten punktgestützter Platten ist durch eine rotationssymmetrische Lastabtragung gekennzeichnet. Im Übergangsbereich von Stützenanschnitt und Platte treten hohe Beanspruchungen (Tangential- und Radialmomente) auf, welche zum Durchstanzen einer Platte führen können. Das Durchstanzenversagen kennzeichnet sich durch das Heraustrennen eines Plattenstücks mit Kegel- oder Pyramidenstumpf ähnlicher Seitenfläche. Ausgehend von Radialrissen, die ihre vorrangige Ursache in der Biegebeanspruchung haben, bilden sich bei höherer Beanspruchung tangentiale Querkraftrisse, die sich zu einem Durchstanzriss vereinen.

Aus Vereinfachungsgründen wird für die Bemessung derartiger Platten im Grenzzustand der Tragfähigkeit ein getrennter Nachweis für die Biegetragfähigkeit und die Querkrafttragfähigkeit geführt. Das Durchstanzenversagen stellt daher einen Sonderfall der Querkraftbeanspruchung von plattenförmigen Bauteilen dar und bestätigt den engen Zusammenhang zwischen den Bemessungsansätzen für Querkraft und Durchstanzen.

Das Bauteilversagen ist durch die gegenseitige Beeinflussung von Durchstanzen und Biegetragverhalten gekennzeichnet. In Bild 1 sind die theoretischen Rissbilder bei reiner Querkraft- und reiner Biegebeanspruchung dargestellt.

Reine Querkraftbeanspruchung      Reine Biegebeanspruchung

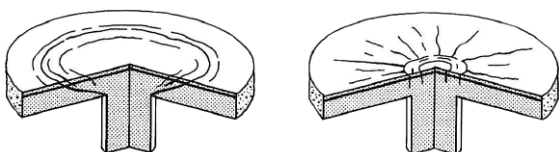


Bild 1. Tragverhalten im Versagenszustand

Das Versagen beim Durchstanzen tritt in der Regel ohne eine ausgeprägte Vorankündigung auf (Bild 2) und führt beim Fehlen der „Notfallbewehrung“ (über den Stützen verlaufende, durchgehende Feldbewehrung) zu einem progressiven Kollaps der gesamten Konstruktion.

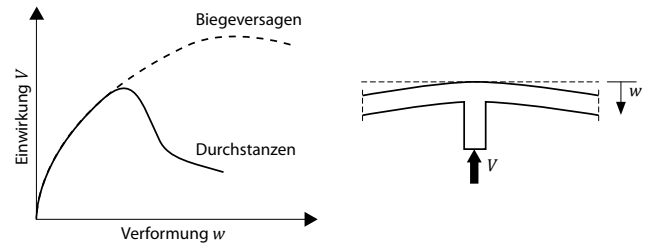


Bild 2. Last-Verformungsverhalten beim Durchstanzen einer Innenstütze

Bei Durchstanzenversuchen können grundsätzlich zwei unterschiedliche Versagensmechanismen beobachtet werden. Zum einen das Versagen bei Bauteilen ohne Durchstanzenbewehrung und zum anderen bei solchen mit Durchstanzenbewehrung. Bei Bauteilen mit Durchstanzenbewehrung muss hierbei noch zwischen einem Versagen innerhalb oder außerhalb der Durchstanzenbewehrung sowie unter Maximaltragfähigkeit am Stützenanschnitt unterschieden werden [2]. Für die Ermittlung des Durchstanzenwiderstandes von Flachdecken existiert derzeit noch keine allgemein gültige theoretische Lösung. Die Bemessungsgleichungen basieren daher auf empirischen Ansätzen, die anhand von umfangreichen Durchstanzenversuchen hergeleitet wurden.

#### 3.2 Nachweisverfahren

Gegenüber DIN 1045-1 ergeben sich aufgrund von neueren Forschungsergebnissen Änderungen in der Nachweisführung für Durchstanzen. Grundsätzlich ist nach EC 2 nachzuweisen, dass die einwirkende Querkraft  $v_{Ed}$  den Bauteilwiderstand  $v_{Rd}$  nicht überschreitet:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd} \quad (8)$$

Der Nachweis der aufnehmbaren Querkraft erfolgt längs festgelegter Rundschnitte. Außerhalb dieser Rundschnitte gelten die Regelungen für Querkraft. Die Tragfähigkeit des Bauteils wird durch unterschiedliche Versagensmechanismen begrenzt. Die Bemessungswerte der aufnehmbaren Querkraft sind:

$v_{Rd,c}$	Bemessungswert der Querkrafttragfähigkeit im kritischen Rundschnitt einer Platte ohne Durchstanzenbewehrung
$v_{Rd,max}$	Bemessungswerte der maximalen Querkrafttragfähigkeit längs des kritischen Rundschnitts mit Durchstanzenbewehrung
$v_{Rd,cs}$	Bemessungswerte der Querkrafttragfähigkeit mit Durchstanzenbewehrung längs innerer Nachweisschnitte
$v_{Rd,c,out}$	Bemessungswerte der Querkrafttragfähigkeit im äußeren Rundschnitt außerhalb des durchstanzenbewehrten Bereichs

Ist längs des kritischen Rundschnitts der Bemessungswert  $v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$ , so ist rechnerisch keine Durchstanzbewehrung erforderlich. Ist  $v_{Ed} > v_{Rd,c}$ , so muss eine Durchstanzbewehrung (z. B. Bügel) eingebaut werden. Reicht die Tragfähigkeit der Bügel nicht aus, so können zur Tragfähigkeitssteigerung Einbauteile (z.B. Dübelleisten) entsprechend den Zulassungen verwendet werden.

### 3.3 Bemessungswert der Einwirkung

Die auf den betrachteten Nachweisschnitt bezogene Querkraft wird ermittelt mit:

$$v_{Ed} = \frac{\beta \cdot V_{Ed}}{u_i \cdot d} \tag{9}$$

Hierin sind

- $v_{Ed}$  Bemessungswert der aufzunehmenden Querkraft
- $u_i$  Umfang des betrachteten Rundschnitts
- $\beta$  Beiwert zur Berücksichtigung von Momenten in der Lasteinleitungsfläche (Bild 3)
- $V_{Ed}$  Bemessungswert der gesamten aufzunehmenden Querkraft
- $d = (d_y + d_z)/2$ , mittlere Nutzhöhe der Platte

Mit dem Beiwert  $\beta$  lassen sich ausmittige Beanspruchungen der Stützen berücksichtigen. Als Mindestwert legt EC 2 sowohl für Flachdecken als auch für mittig belastete Einzelfundamente  $\beta = 1,10$  fest. EC 2 gibt näherungsweise konstante  $\beta$ -Faktoren für unverschiebliche Systeme mit geringen Stützweitenunterschieden an.

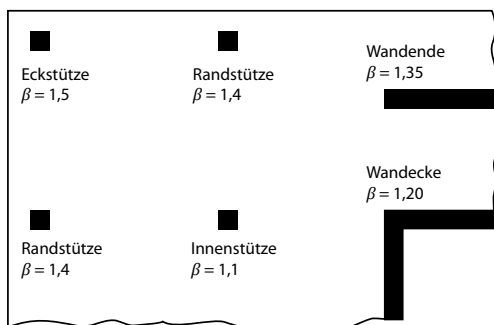


Bild 3: Näherungswerte für den Beiwert  $\beta$  nach EC2-1-1 und NA

Weiterhin gibt EC 2 Ansätze für eine genauere Berechnung mit dem Modell einer vollplastischen Schubspannungsverteilung im kritischen Schnitt an. Dieses genauere Verfahren legt eine vollplastische Schubspannungsverteilung entlang des kritischen Rundschnitts gemäß Bild 4 zu Grunde.

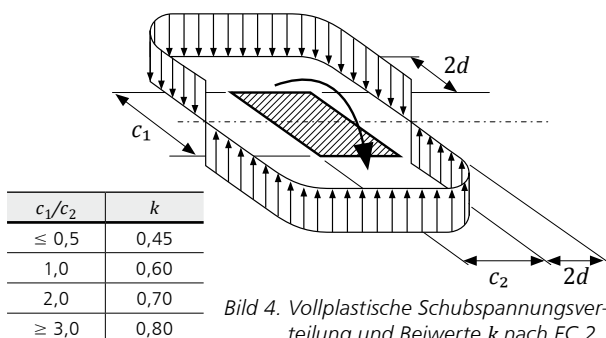


Bild 4. Vollplastische Schubspannungsverteilung und Beiwerte  $k$  nach EC 2

Der Lasterhöhungsfaktor  $\beta$  ergibt sich zu:

$$\beta = 1 + k \cdot \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_i}{W_1} \tag{10}$$

Hierbei ist

- $u_i$  Umfang des kritischen Rundschnitts
- $k$  Beiwert, der sich aus dem Verhältnis der Abmessungen der Stützen  $c_1$  und  $c_2$  ergibt: Sein Wert gibt den Anteil des Moments an, der durch eine nicht rotationssymmetrische Schubspannungsverteilung übertragen wird. Der restliche Anteil wird über Biegung und Torsion in die Stütze eingeleitet (siehe Tabelle in Bild 4)
- $W_1$  Funktion des kritischen Rundschnitts  $u_i$  zur Ermittlung der in Bild 4 dargestellten Querkraftverteilung

$$W_1 = \int_0^{u_i} |e| dl \tag{11}$$

- $dl$  Differential des Umfangs
- $e$  lotrechter Abstand vom Schwerpunkt des Rundschnitts zum Schwerpunkt des betrachteten Abschnitts  $dl$  des Rundschnitts  $u_i$

Für Rechteckstützen mit einem geschlossenen Rundschnitt und  $c_1$  der Stützenabmessung parallel und  $c_2$  senkrecht zur Lastausmitte ergibt sich  $W_1$  z. B. zu:

$$W_1 = \frac{c_1^2}{2} + c_1 c_2 + 4c_2 d + 16d^2 + 2\pi d c_1 \tag{12}$$

Weitere Hinweise und Berechnungsalgorithmen zur Bestimmung des Lasterhöhungsfaktors können z. B. [2] oder [3] entnommen werden.

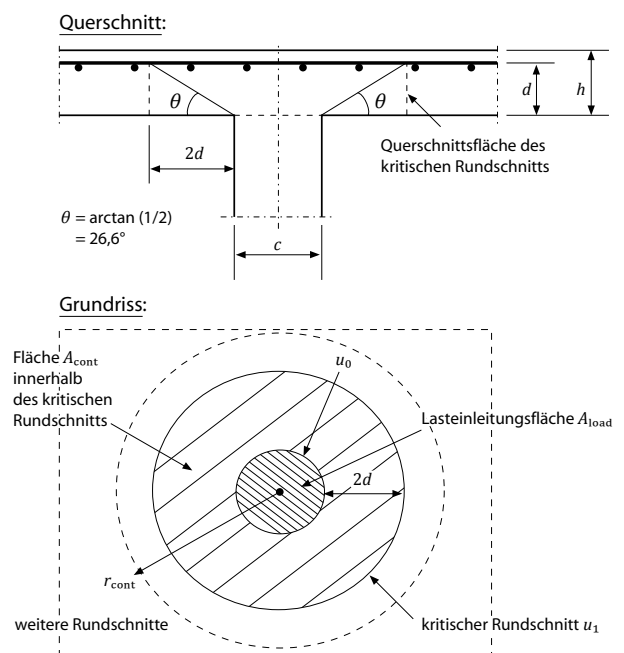


Bild 5. Bemessungsmodell für den Nachweis der Sicherheit gegen Durchstanzen (EC 2, Bild 6.12)

### 3.4 Lasteinleitungsfläche und kritischer Rundschnitt

In Bild 5 ist das Bemessungsmodell für den Nachweis der Sicherheit gegen Durchstanzen dargestellt. Die Festlegungen für das Durchstanzen mit den kritischen Rundschnitten gelten für folgende Formen von Lasteinleitungsflächen  $A_{load}$ :

- kreisförmige mit einem Umfang  $u_0 \leq 12d$  ( $d$  mittlere Nutzhöhe)
- rechteckige mit einem Umfang  $u_0 \leq 12d$  und mit einem Verhältnis Länge zu Breite  $\leq 2$
- beliebige andere Formen, die sinngemäß wie oben genannt begrenzt werden

Die Lasteinleitungsfläche darf sich nicht im Bereich anderweitig verursachter Querkräfte und nicht in der Nähe von anderen konzentrierten Lasten befinden, so dass sich die kritischen Rundschnitte überschneiden.

Der kritische Rundschnitt für runde oder rechteckige Lasteinleitungsflächen ist als Schnitt im Abstand  $2d$  vom Rand der Lasteinleitungsfläche festgelegt. Die kritische Fläche  $A_{crit}$  ist die Fläche innerhalb des kritischen Rundschnitts  $u_{crit}$ . Weitere Rundschnitte innerhalb und außerhalb der kritischen Fläche sind affin zum kritischen Rundschnitt anzunehmen.

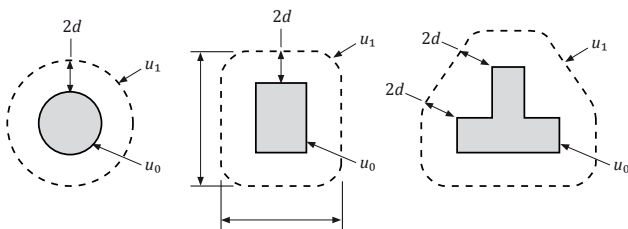


Bild 6: Typische kritische Rundschnitte um Lasteinleitungsflächen (EC 2, Bild 6.13)

Wenn die oben genannten Bedingungen bezüglich der Form der Lastaufstandsfläche bei Auflagerungen auf Wänden oder Stützen mit Rechteckquerschnitt nicht erfüllt sind, dürfen nur reduzierte kritische Rundschnitte in Ansatz gebracht werden.

In der Nähe von Öffnungen ist ein Teil des maßgebenden Rundschnitts als unwirksam zu betrachten. Ebenso ist bei Lasteinleitungsflächen in der Nähe eines freien Randes ein reduzierter Rundschnitt zu berücksichtigen.

### 3.5 Punktförmig gestützte Platten und Fundamente ohne Durchstanzbewehrung

Die Tragfähigkeit  $v_{Rd,c}$  eines Bauteils ohne Durchstanzbewehrung wird nach Gleichung (14) berechnet. Diese ist abhängig von der Betonfestigkeit, dem Längsbewehrungsgrad, der Plattendicke und der Betonnormalspannung (z.B. infolge Vorspannung). Der rechnerische Nachweis der Tragsicherheit wird im kritischen Rundschnitt im Abstand von  $2,0d$  vom Stützenrand geführt.

Bei Platten ohne rechnerisch erforderliche Durchstanzbewehrung ist längs des kritischen Rundschnitts folgender Nachweis zu führen:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,c} \quad (13)$$

Die Querkrafttragfähigkeit  $v_{Rd,c}$  ermittelt sich nach EC 2 zu:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} + 0,10 \cdot \sigma_{cp} \geq v_{min} + 0,10 \cdot \sigma_{cp} \quad (14)$$

Hierin sind

$$C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c \quad \text{bei Flachdecken und Bodenplatten}$$

$$= 0,18/\gamma_c \cdot (0,1u_0/d + 0,6) \quad \text{bei Innenstützen von Flachdecken mit } u_0/d < 4$$

$$= 0,15/\gamma_c \quad \text{bei Fundamenten (siehe nachfolgende Erläuterungen)}$$

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0 \quad \text{mit } d \text{ in mm}$$

$$v_{min} = (0,0525/\gamma_c) \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d \leq 600 \text{ mm}$$

$$v_{min} = (0,0375/\gamma_c) \cdot k^{3/2} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d > 800 \text{ mm}$$

(Zwischenwerte interpolieren)

$$\rho_1 = \sqrt{\rho_{ly} \cdot \rho_{lz}} \begin{cases} \leq 0,50 \cdot \frac{f_{cd}}{f_{yd}} \\ \leq 0,02 \end{cases} \quad \text{mittlerer Längsbewehrungsgrad}$$

$\rho_{ly}, \rho_{lz}$  Geometrischer Bewehrungsgrad für die innerhalb des betrachteten Rundschnitts auf der Biegezugseite angeordnete Bewehrung, die außerhalb des betrachteten Rundschnitts verankert ist

$\sigma_{cp}$  Bemessungswert der Betonnormalspannung (z. B. aus Vorspannung) innerhalb des betrachteten Rundschnitts  $\sigma_{cp} = (\sigma_{cp,y} + \sigma_{cp,z})/2$  in N/mm<sup>2</sup> (Druck positiv!)

### 3.6 Besonderheiten bei Fundamenten

Aus Versuchen (z. B. [3]) ist der Zusammenhang zwischen der Schlankheit eines Fundamentes und dessen Durchstanzwiderstand bekannt. Bei gedrungenen Fundamenten stellen sich steilere Schubrisse ein; die Lage des kritischen Schnitts variiert demzufolge je nach Schlankheit in einem Bereich  $\lambda \leq 2d$ .

Im Durchstanzbereich  $A_{crit}$  dürfen die Einwirkungen vollständig um den Sohldruck reduziert werden. Die Lage des kritischen Schnitts  $a_{crit}$  ist iterativ zu ermitteln, da mit wachsendem  $a_{crit}$  sowohl die aufnehmbare Schubspannung als auch die Einwirkungen kleiner werden. Maßgebend ist der Schnitt mit dem kleinsten Widerstand  $v_R$ . Vereinfachend darf für schlanke Fundamente mit  $\lambda > 2$  ( $\lambda = a_\lambda / d$ ,  $a_\lambda$  = Fundamentauskragung) der Nachweis im Abstand  $1,0d$  geführt werden. Bei ausmittig belasteten Fundamenten ist die Reduktion der einwirkenden Querkraft bereits in die Ermittlung des Lasterhöhungsfaktors  $\beta$  einzubeziehen.

In der Bemessungsgleichung (14) wird der Einfluss der Schlankheit über den Faktor  $C_{Rd,c}$  berücksichtigt. In EC2/NA ist der Beiwert für Fundamente mit  $0,15 / \gamma_C$  geringer festgelegt als für Flachdecken, da wegen des Einflusses der Schlankheit auf die Tragfähigkeit mit dem höheren Beiwert für Flachdecken das geforderte Zuverlässigkeitsniveau nicht erreicht wird [4]. Der Widerstand ergibt sich für  $\sigma_{cp} = 0$  zu:

$$v_{Rd,c} = \frac{0,15}{\gamma_r} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_1 \cdot f_{ck})^{1/3} \cdot 2 \cdot \frac{d}{a} \geq v_{\min} \cdot 2 \cdot \frac{d}{a} \quad (15)$$

$a$  Abstand des kritischen Schnitts zum Stützenrand

Zur Ermittlung des maßgebenden Nachweisschnittes können für jeden Schnitt  $a_i$  die zugehörigen Werte  $V_{Ed,red,i}$ ,  $b_i$ ,  $v_{Ed,i}$  sowie der maßgebende Widerstand  $v_{Rd,c,i}$  ermittelt werden. Gesucht wird die Stelle, für die das Verhältnis von Widerstand und Einwirkung  $v_{Rd} / v_{Ed}$  minimal wird (Iteration erforderlich).

### 3.7 Punktförmig gestützte Platten und Fundamente mit Durchstanzbewehrung

Eine Durchstanzbewehrung ist erforderlich, wenn:

$$v_{Ed} > v_{Rd,c} \quad (16)$$

Die Tragfähigkeit wird durch ein räumliches Fachwerkmodell nachgewiesen, wobei die Zugstreben von der Durchstanzbewehrung gebildet werden. Es sind Nachweise in mehreren Schnitten zu führen. Für den kritischen Rundschnitt ist die maximale Tragfähigkeit der Betondruckstrebe wie folgt zu ermitteln:

$$v_{Ed} \leq v_{Rd,max} = 1,4 \cdot v_{Rd,c,u1} \quad (17)$$

Die Durchstanztragfähigkeit mit Durchstanzbewehrung beträgt im kritischen Rundschnitt:

$$v_{Rd,cs} = 0,75 \cdot v_{Rd,c} + \left[ 1,5 \cdot (d/s_r) \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd,ef}}{u_1 \cdot d} \right] \cdot \sin \alpha \quad (18)$$

Hierin sind:

- $v_{Rd,c}$  Durchstanzwiderstand gemäß Gleichung (14)
- $d$  mittlere Nutzhöhe
- $A_{sw}$  Querschnitt der Durchstanzbewehrung in einer Bewehrungsreihe
- $s_r$  radialer Abstand der Bewehrungsreihe
- $f_{ywd,ef}$  wirksamer Bemessungswert der Querkraftbewehrung mit  $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$
- $\alpha$  Winkel zwischen Durchstanzbewehrung und Plattenebene

Mit Gleichung (19) kann die erforderliche Bewehrungsmenge einer Reihe im kritischen Schnitt wie folgt bestimmt werden:

$$A_{sw} = \frac{(v_{Ed} - 0,75 \cdot v_{Rd,c}) \cdot u_1 \cdot d}{1,5 \cdot (d/s_r) \cdot f_{ywd,ef} \cdot \sin \alpha} \quad (19)$$

Bis zum Erreichen von  $v_{Ed} \leq v_{Rd,c}$  wird diese mit Gleichung (19) berechnete Bewehrung wie folgt in den Reihen angeordnet:

1. Reihe im Abstand  $0,3d \leq a_1 \leq 0,5d$ :  
 $\kappa_{sw,1} = 2,5 \cdot A_{sw}$
2. Reihe im Abstand  $s_r \leq 0,75d$ :  
 $\kappa_{sw,2} = 1,4 \cdot A_{sw}$
3. bis zur letzten Reihe (Abstände  $s_r \leq 0,75d$ ):  
 $\kappa_{sw,i} = 1,0 \cdot A_{sw}$

Die letzte Bewehrungsreihe ist im Abstand  $\leq 1,5d$  vom äußeren Rundschnitt  $u_{out}$  einzulegen. Im äußeren Rundschnitt erfolgt der Nachweis, dass keine Durchstanzbewehrung mehr erforderlich ist.

$$u_{out} = \beta \cdot \frac{V_{Ed}}{v_{Rd,c} \cdot d} \quad (20)$$

Der Betontraganteil  $v_{Rd,c}$  ist hierbei mit dem Faktor  $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_C$  zu bestimmen. Dies entspricht der Querkrafttragfähigkeit liniengelagerter Platten.

Ist eine Durchstanzbewehrung erforderlich, so sind immer mindestens zwei Bewehrungsreihen anzuordnen. Als Mindestbewehrung ist einzuhalten:

$$A_{sw,min} = A_s \cdot \sin \alpha = \frac{0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} \cdot s_r \cdot s_t}{f_{yk} \cdot 1,5} \quad (21)$$

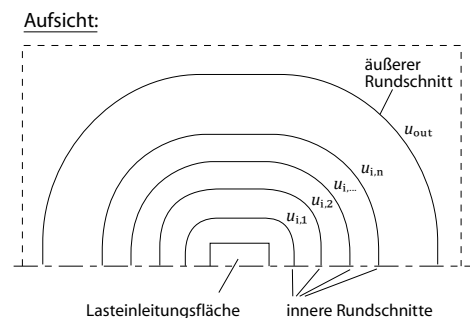
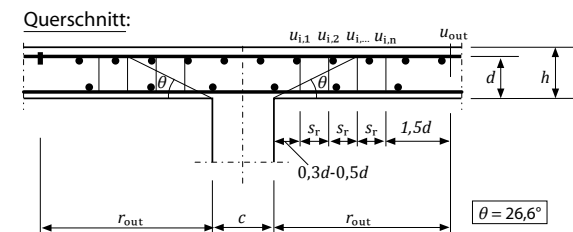


Bild 7. Nachweisschnitte der Durchstanzbewehrung (aus [4])

Werden Schrägstäbe als Durchstanzbewehrung vorgesehen, müssen diese einen Winkel von  $45^\circ < \alpha < 60^\circ$  mit der Bauteilachse aufweisen. Aufbiegungen dürfen in einem Bereich  $\leq 1,5d$  um die Stütze angeordnet werden. Der Bauteiltragwiderstand nach Gleichung (18) bzw. die erforderliche Durchstanzbewehrung nach Gleichung (19) sind mit dem Verhältnis  $(d/s_r) = 0,53$  zu berechnen, die Bewehrung darf bis  $f_{ywd,ef} = f_{ywd}$  ausgenutzt werden.

### 3.8 Fundamente mit Durchstanzbewehrung

Aufgrund der größeren Druckstrebenneigung enthält EC 2 / NA besondere Vorgaben für Fundamente und Bodenplatten mit Durchstanzbewehrung. Demnach ist der Betontraganteil  $v_{Rd,c}$  für die ersten beiden Bewehrungsreihen zu vernachlässigen und die erforderliche Bewehrung gleichmäßig auf die beiden Reihen zu verteilen (Abstände  $a_1 = 0,3d$  und  $a_2 = 0,8d$ ). Hierfür gilt:

Bügelbewehrung:  

$$\beta \cdot V_{Rd,red} \leq V_{Rd,s} = A_{sw,1+2} \cdot f_{ywd,ef} \quad (22)$$

Schrägbewehrung:  

$$\beta \cdot V_{Rd,red} \leq V_{Rd,s} = 1,3 \cdot A_{sw,1+2} \cdot f_{ywd,ef} \cdot \sin\alpha \quad (23)$$

Weitere evtl. erforderliche Bewehrungsreihen werden mit  $0,33 \cdot A_{sw,1+2}$  ausgeführt.

## 4 Druckglieder

In EC 2 werden neben einem **allgemeinen Berechnungsverfahren** für Stützen auch zwei Näherungsverfahren geregelt. Bei den **Näherungsverfahren** ist sowohl ein Berechnungsverfahren auf Grundlage einer Nennkrümmung als auch auf Grundlage einer Nennsteifigkeit möglich. Im Nationalen Anhang wird das Näherungsverfahren auf Grundlage einer Nennsteifigkeit nicht übernommen. Das Näherungsverfahren auf Grundlage einer Nennkrümmung entspricht dem aus DIN 1045-1 bekannten Modellstützenverfahren.

Das allgemeine Berechnungsverfahren basiert auf einer nicht-linearen Schnittgrößenermittlung mit Berücksichtigung der geometrischen Nichtlinearitäten nach Theorie II. Ordnung.

### 4.1 Verfahren der Nennkrümmung (Modellstützenverfahren)

Nach den Angaben in EC 2 eignet sich das Verfahren mit Nennkrümmungen vor allem für Einzelstützen mit konstanter Normalkraftbeanspruchung und einer definierten Knicklänge. Benutzt man jedoch realistische Krümmungsverteilungen, so kann das Verfahren auch auf Tragwerke angewendet werden. Nach DIN 1045-1 ist das Modellstützenverfahren nur für Druckglieder mit rechteckigem oder rundem Querschnitt geeignet, bei denen die Lastausmitte nach Theorie I. Ordnung  $e_0 / h \geq 0,1$  beträgt.

Die Berechnung der zusätzlichen Lastausmitte nach Theorie II. Ordnung  $e_2$  in EC 2 entspricht im wesentlichen den aus DIN 1045-1 bekannten Formulierungen. Es unterscheiden sich lediglich einige wenige Parameter sowie einige Bezeichnungen. In den nachfolgenden Tabelle 2 sind die Schreibweisen in EC 2 und DIN 1045-1 zusammengestellt.

Nach DIN 1045-1 beträgt der Krümmungsbeiwert  $c = 10$  und wird nicht weiter differenziert. Im EC 2 wird der Beiwert jedoch näher erläutert. Bei einem konstanten Querschnitt soll  $c = 10$  ( $\approx \pi^2$ ) verwendet werden. Dies entspricht einem sinusförmigen Krümmungsverlauf. Bei einem konstanten Moment nach Theorie I. Ordnung darf in der Regel ein niedrigerer Wert  $8 < c < 10$  eingesetzt werden.

Sowohl nach EC 2 als auch nach DIN 1045-1 sollen Imperfektionen bei Druckgliedern beim Nachweis nach Theorie II. Ordnung angesetzt werden. In beiden Normen dürfen die Auswirkungen der Imperfektionen entweder als zusätzliche Lastausmitte oder als zusätzliche äquivalente Horizontalkraft berücksichtigt werden. Die Formulierungen in EC 2 und DIN 1045-1 unterscheiden sich nur geringfügig voneinander.

Prof. Dr.-Ing. Jens Minnert  
 Technische Hochschule Mittelhessen,  
 Fachbereich Bauwesen, öbuv Sachverständiger

### Literatur

- [1] Reineck, K.-H.: Hintergründe zur Querkraftbemessung in DIN 1045-1 für Bauteile aus Konstruktionsbeton mit Querkraftbewehrung, Bauingenieur 76 (2001), Heft 4, S. 168-179
- [2] Hegger, J.; Siburg, C.: Hintergründe und Nachweise zum Durchstanzen nach EC 2-NAD. In: Goris/Hegger (Hrsg.) Stahlbetonbau aktuell 2011; Berlin: Bauwerk, 2010
- [3] Hegger, J.; Siburg, C.: Durchstanzen, im: Eurocode 2 für Deutschland: Gemeinschaftstagung, Seminarband, Hrsg.: Deutscher Beton- und Bautechnikverein, Berlin: Ernst & Sohn, 2010, S. 723-734
- [4] Alfons Goris: Eurocode 2-Teil 1-1: Wesentliche Änderungen gegenüber DIN 1045-1. In: Tagungsband des 8. Gießener Bauforums 2011 in Gießen, Thema: „Aktuelles aus dem Bauwesen“, Shaker Verlag, Aachen 2011, ISBN 978-3-8440-0376-5

EC 2-1-1 + NA	DIN 1045-1
$e_2 = K_1 \cdot (1/r) \cdot l_0^2 / c$	$e_2 = K_1 \cdot (1/r) \cdot l_0^2 / 10$
$K_1 = \lambda / 10 - 2,5$ für $25 \leq \lambda \leq 35$ , sonst = 1,0	
$(1/r) = K_0 \cdot K_\varphi \cdot 1/r_0$	$(1/r) = 2 \cdot K_2 \cdot K_\varphi \cdot \varepsilon_{yd} / (0,9 \cdot d)$
$K_r = (n_u - n) / (n_u - n_{bal}) \leq 1$ $n = N_{Ed} / (A_c \cdot f_{cd})$ $n_u = 1 + \omega$ $\omega = A_s \cdot f_{yd} / (A_c \cdot f_{cd})$ $n_{bal} = 0,4$	$K_2 = (N_{ud} - N_{Ed}) / (N_{ud} - N_{bal}) \leq 1$ ( $N_{Ed}$ für Druck negativ) $N_{ud} = - (f_{cd} \cdot A_c + f_{yd} \cdot A_s)$ $N_{bal} = - (0,4 \cdot f_{cd} \cdot A_c)$
$K_0 = 1 + \beta \cdot \varphi_{ef} \geq 1$ mit $\beta = 0,35 + f_{ck} / 200 - \lambda / 100$	
$1/r_0 = \varepsilon_{yd} / (0,45 \cdot d)$ $\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$	$\varepsilon_{yd} = f_{yd} / E_s$
Dabei ist:	Dabei ist:
$K_1$ Interpolationsfaktor	$K_1$ Interpolationsfaktor
$1/r$ Krümmung	$1/r$ Krümmung im kritischen Querschnitt
$1/r_0$ Krümmung einer Modellstütze	$l_0$ Ersatzlänge
$l_0$ Knicklänge	$K_2$ Beiwert in Abhängigkeit von der Normalkraft
$c$ Beiwert, der vom Krümmungsverlauf abhängig	$K_\varphi$ Beiwert zur Berücksichtigung des Kriechens
$K_r$ Beiwert in Abhängigkeit von der Normalkraft	$N_{ud}$ Bemessungswert der Grenztragfähigkeit des Querschnitts
$K_\varphi$ Beiwert zur Berücksichtigung des Kriechens	$N_{bal}$ aufnehmbare Längsdruckkraft bei größter Momenten Tragfähigkeit des Querschnitts
$n$ bezogene Normalkraft	
$n_{bal}$ $n$ bei maximaler Biegetragfähigkeit	

Tabelle 2. Berechnung der zusätzlichen Lastausmitte  $e_2$  nach Theorie II. Ordnung nach EC 2-1-1 und DIN 1045-1