

**Zur Berücksichtigung
einer ungleichmäßigen
Querkraftverteilung im
Durchstanzbereich**

T 7173

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7790-8

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69
70504 Stuttgart

Nobelstraße 12
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

LEHRSTUHL UND INSTITUT
FÜR MASSIVBAU
UNIV.-PROF. DR.-ING.
JOSEF HEGGER
MIES-VAN-DER-ROHE-STR. 1
D-52074 AACHEN
TELEFON 0241/80 25170
TELEFAX 0241/80 22335
www.imb.rwth-aachen.de
imb@imb.rwth-aachen.de

Zur Berücksichtigung einer ungleichmäßigen Querkraftverteilung im Durchstanzbereich

(DIBt-Az: ZP 52-5-7.280-1244/06)

Auftraggeber: Deutsches Institut für Bautechnik
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin

erstattet von: Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Dipl.-Ing. Marcus Ricker
Dipl.-Ing. Frank Häusler

Institutsbericht: 171/2006
Umfang des Berichtes 43 Seiten

Datum: Aachen, den 27. März 2007

INHALTSVERZEICHNIS

	Seite
1 Veranlassung und Zielsetzung	1
1.1 Veranlassung	1
1.2 Zielsetzung	1
2 Zusammenstellung der Bemessungsregeln nach Eurocode 2 und DIN 1045-1	2
2.1 Allgemeines	2
3 Überprüfung der Regelungen zum Durchstanzen nach Eurocode 2	12
3.1 Allgemeines	12
3.2 Lasteinleitung und Rundschnittführung	12
3.3 Längsbewehrungsgrad	13
3.4 Durchstanzbewehrung	14
3.5 Nachweisverfahren	14
3.6 Vergleich mit Versuchsergebnissen	19
3.6.1 Auswahlkriterien	19
3.6.2 Biegetragfähigkeit	19
3.7 Zuverlässigkeitstheorie und statistische Auswertung	19
3.7.1 Allgemeines	19
3.8 Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex β	21
3.8.1 Basisvariablen	21
3.9 Innenstützen	23
3.9.1 Durchstanztragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung	23
3.9.2 Durchstanzen von Innenstützen mit Momentenbeanspruchung	24
3.9.3 Empfehlungen für ein Nationales Anwendungsdokument zu Eurocode 2	25
3.10 Randstützen	25
3.10.1 Allgemeines	25
3.10.2 Vereinfachte Lasterhöhungsfaktoren zur Berücksichtigung der Momenten-Querkraft-Interaktion in DIN 1045-1 und Eurocode 2	26
3.10.3 Vergleich der β -Faktoren	26
3.10.4 Durchstanztragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung	27
3.10.5 Versuchsnachrechnungen zum Durchstanzen mit Durchstanzbewehrung	29
3.10.6 Empfehlungen für ein Nationales Anwendungsdokument	39
4 Zusammenfassung	40
Literatur	41

1 Veranlassung und Zielsetzung

1.1 Veranlassung

Die Bestimmungsgleichungen der Durchstanztragfähigkeit wurden im Wesentlichen an rotationssymmetrisch belasteten Innenstützenversuchen hergeleitet. Diese Randbedingungen werden jedoch in der Baupraxis nur bei Pendelstützen mit gleichlangen angrenzenden Feldern erreicht. Somit ist es erforderlich die gegenüber der ideal rotationssymmetrischen Belastung abweichende Beanspruchung im Durchstanzbereich adäquat zu berücksichtigen. Die ungleichmäßige Beanspruchung kann dabei entweder durch unterschiedlich große Lasteingzugsflächen (ungleiche Stützweitenverhältnisse) oder aber durch die planmäßige Übertragung eines Biegemomentes hervorgerufen werden.

Für ausmittig oder mit Biegemomenten beanspruchte Stützenknoten werden in den Normen ([1],[2]) sowohl vereinfachte Lasterhöhungsfaktoren als auch genauere Verfahren ([1],[4]) angeboten. Die vereinfachte Berücksichtigung führt dabei zwangsläufig zu einer groben Abschätzung der erhöhten Beanspruchung, die aber gleichwohl nicht unbedingt auf der sicheren Seite liegen muss. Bei den genaueren Verfahren wird der Einfluss des Momentes im Verhältnis zur einwirkenden Querkraft beurteilt und daraus ein Lasterhöhungsfaktor ermittelt. Die in Eurocode 2 verankerten Verfahren mit einer plastischen Schubspannungsverteilung oder einem verkürzten Rundschnitt sind für deutsche Anwender neu und sollten vor der Anwendung auf ihr Sicherheitsniveau hin überprüft werden.

1.2 Zielsetzung

Die Regelungen zur Berücksichtigung einer ungleichmäßigen Querkraftverteilung im Durchstanzbereich nach Eurocode 2 unterscheiden sich deutlich von den Regelungen in DIN 1045-1/Heft 525. Anhand von Versuchsnachrechnungen und Vergleichsrechnungen sollen das Sicherheitsniveau und ggf. Anwendungsgrenzen der einzelnen Verfahren bestimmt werden.

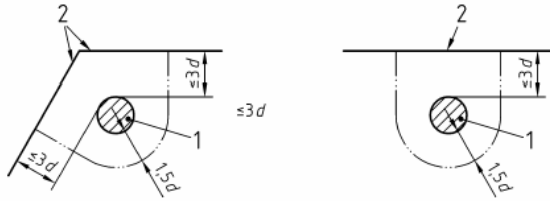
2 Zusammenstellung der Bemessungsregeln nach Eurocode 2 und DIN 1045-1

2.1 Allgemeines

Im Folgenden werden die wesentlichen Regelungen zum Durchstanzen nach den Normen Eurocode 2 und DIN 1045-1 tabellarisch gegenübergestellt. Hierbei werden die unterschiedlichen Regelungen zur Rundschnittführung und die einzelnen Nachweisformate für die Tragfähigkeiten ohne und mit Durchstanzbewehrung aufgeführt.

DIN 1045-1	Eurocode 2
<p>Der kritische Rundschnitt für runde oder rechteckige Lasteinleitungsflächen, die sich nicht in der Nähe von freien Rändern befinden, umgibt die Lasteinleitungsfläche in einem Abstand von:</p>	
<p>1,5 d Der sich daraus ergebende Winkel des Durchstanzkegels $\beta_r = 33,7^\circ$</p> <p>kritische Fläche A_{crit}</p> <p>Lasteinleitungsfläche A_{load} Umfang des kritischen Rundschnitts u_{crit}</p> <p>rechteckige Stützen analog</p> <p>$\beta_r = 33,7^\circ$ $\beta_r = 33,7^\circ$</p> <p>$1,5 d$ $1,5 d$</p> <p>$\beta_r = 33,7^\circ$ $\beta_r = 33,7^\circ$</p>	<p>weitere Rundschnitte 2,0 d Der sich daraus ergebende Winkel des Durchstanzkegels $\theta = 26,6^\circ$</p> <p>kritische Fläche A_{cont}</p> <p>Lasteinleitungsfläche A_{load} kritischer Rundschnitt u_1</p> <p>rechteckige Stützen analog</p> <p>$\theta = 26,6^\circ$ $\theta = 26,6^\circ$</p> <p>$2,0 d$ $2,0 d$</p> <p>$\theta = 26,6^\circ$ $\theta = 26,6^\circ$</p>
<p>Zusätzliche Einschränkungen d. Lasteinleitungsfläche und der Nachweisschnitte:</p>	
<p>Die Festlegungen sind auf die folgenden Arten von Lasteinleitungsflächen A_{load} anwendbar:</p> <ul style="list-style-type: none"> • kreisförmige Flächen mit einem Durchmesser bis $3,5d$ (d ist dabei die mittlere statische Nutzhöhe des nachzuweisenden Bauteils), • rechteckige Flächen mit einem Umfang nicht größer als $11d$ und einem Verhältnis von Länge a zu Breite b bis maximal $2,0$, • Flächen mit beliebiger Form, die sinngemäß wie die oben erwähnten Formen begrenzt sind; • Die Rundschnitte benachbarter Lasteinleitungsflächen dürfen sich dabei nicht überschneiden. • Bei Lasteinleitungsflächen, die sich nahe oder an einem Rand bzw. an einer freien Ecke befinden (Abstand kleiner $3d$), ist der 	<p>Bei Platten mit konstanter Dicke verläuft die Querschnittsfläche des Rundschnitts senkrecht zur Mittelebene der Platte. Bei Platten oder Fundamenten mit veränderlicher Dicke (ausschließlich Stufenfundamente) darf als wirksame statische Nutzhöhe die am Rand der Lasteinleitungsfläche auftretende statische Nutzhöhe angenommen werden.</p> <p>Weitere Rundschnitte u_i innerhalb und außerhalb des kritischen Rundschnitts müssen in der Regel die gleiche Form wie der kritische Rundschnitt aufweisen.</p> <p>Bei Lasteinleitungsflächen, die sich in der Nähe eines freien Randes oder einer freien Ecke befinden, ist in der Regel der Rundschnitt nach Bild 6.15 anzunehmen, sofern dies einen Umfang ergibt (ausschließlich des freien Randes), der kleiner ist als der Umfang ohne Berücksichtigung des freien Randes.</p>

kritische Rundschnitt gemäß Bild 41 anzunehmen, sofern dieser einen kleineren Umfang ergibt (freier Rand ausgeschlossen) als der Umfang ohne Berücksichtigung des freien Randes.



- 1 Lasteinleitungsfläche A_{load}
- 2 freier Rand

Bild 41 Kritischer Rundschnitt nahe freien Rändern

Bei Stützen mit schräger Stützenkopfverstärkung mit $l_H \leq 1,5h_H$ (s. Bild 42) ist nur im kritischen Rundschnitt außerhalb der Stützenkopfverstärkung ein Nachweis erforderlich. Der Abstand r_{crit} dieses Schnittes vom Schwerpunkt der Lasteinleitungsfläche darf nach der folgenden Gleichung ermittelt werden:

$$r_{crit} = 1,5d + l_H + 0,5 l_c$$

Dabei ist:

- l_H der Abstand des Stützenrands vom Rand der Stützenkopfverstärkung
- l_c der Durchmesser einer Lasteinleitungsfläche mit Kreisquerschnitt

Bei Rechteckstützen mit einer rechteckigen Stützenkopfverstärkung mit $l_H \leq 1,5d$ (s. Bild 42) und den Gesamtabmessungen b_c und h_c im Grundriss (mit $b_c \leq h_c$) ist r_{crit} als der jeweils kleinere der folgenden Werte anzunehmen:

$$r_{crit} = \begin{cases} 1,5d + 0,56 \sqrt{b_c \cdot h_c} \\ 1,5d + 0,64b_c \end{cases}$$

Bei Stützen mit abgestufter Stützenkopfverstärkung mit $l_H \leq 1,5h_H$ ist die gesamte Fläche der Stützenkopfverstärkung als Lasteinleitungsfläche anzunehmen.

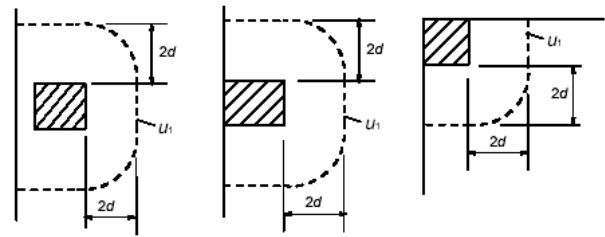


Bild 6.15 Kritische Rundschnitte um Lasteinleitungsflächen nahe eines Randes oder einer Ecke

Bei Platten mit runder Stützenkopfverstärkung mit $l_H < 2h_H$ (s. Bild 6.17) ist ein Nachweis des Durchstanzwiderstands nur in der Querschnittsfläche des Rundschnitts außerhalb der Stützenkopfverstärkung erforderlich. Der Abstand r_{cont} dieses Schnittes vom Schwerpunkt der Stützenquerschnittsfläche darf wie folgt ermittelt werden:

$$r_{cont} = 2d + l_H + 0,5c$$

Dabei ist:

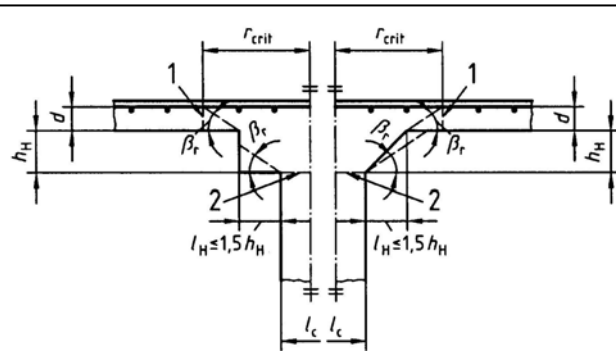
- l_H der Abstand des Stützenrands vom Rand der Stützenkopfverstärkung
- c der Durchmesser einer Stütze mit Kreisquerschnitt

Bei Rechteckstützen mit einer rechteckigen Stützenkopfverstärkung $l_H < 2,0 h_H$ (s. Bild 6.17) und Gesamtabmessungen von l_1 und l_2 ($l_1 = c_1 + 2l_{H1}$, $l_2 = c_2 + 2l_{H2}$, $l_1 = l_2$) darf r_{cont} als der kleinere der folgenden Werte angenommen werden:

$$r_{cont} = 2d + 0,56 \sqrt{l_1 l_2}$$

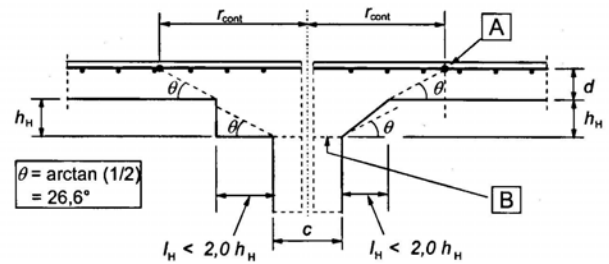
und

$$r_{cont} = 2d + 0,69 l_1$$



- 1 kritischer Rundschnitt
- 2 Lasteinleitungsfläche A_{load}

Bild 42 Platte mit einer Stützenkopfverstärkung mit $l_H \leq 1,5 h_H$



- A Querschnittsfläche des kritischen Rundschnitts
- B Lasteinleitungsfläche A_{load}

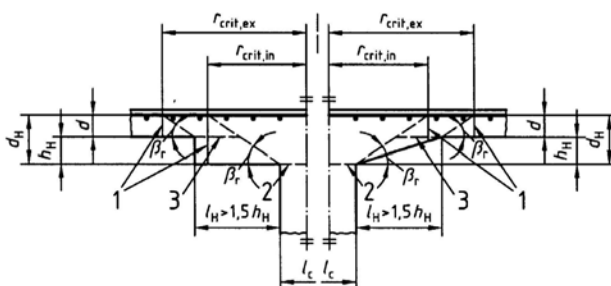
Bild 6.17 Platte mit einer Stützenkopfverstärkung mit $l_H \leq 2,0 h_H$

Bei Platten mit einer Stützenkopfverstärkung mit $l_H > 1,5 h_H$ (s. Bild 43) sind neben dem kritischen Rundschnitt außerhalb der Stützenkopfverstärkung auch kritische Rundschnitte im Bereich der Stützenkopfverstärkung nachzuweisen.

Die Abstände vom Mittelpunkt der Lasteinleitungsfläche zu den kritischen Rundschnitten nach Bild 43 dürfen wie folgt angenommen werden:

$$r_{crit,ex} = 1,5 d + l_H + 0,5 l_c$$

$$r_{crit,in} = 1,5(d + h_H) + 0,5 l_c$$



- 1 kritischer Rundschnitt
- 2 Lasteinleitungsfläche $A_{load,in}$
- 3 Lasteinleitungsfläche $A_{load,ex}$

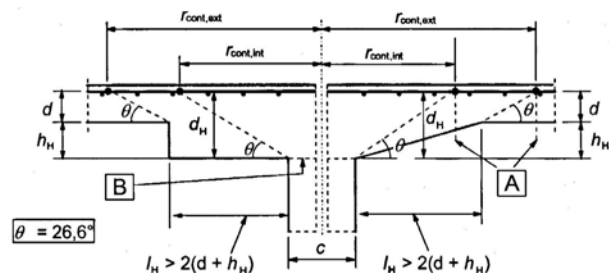
Bild 43 Platte mit einer Stützenkopfverstärkung mit $l_H > 1,5 h_H$

Bei Platten mit Stützenkopfverstärkung mit $l_H > 2 h_H$ (s. Bild 6.18) sind in der Regel die Querschnitte der Rundschnitte sowohl innerhalb der Stützenkopfverstärkung als auch in der Platte nachzuweisen.

Bei Stützen mit Kreisquerschnitt dürfen die Abstände vom Schwerpunkt der Stützenquerschnittsfläche zu den Querschnittsflächen der Rundschnitte in Bild 6.18 wie folgt ermittelt werden:

$$r_{cont,ext} = l_H + 2,0d + 0,5c$$

$$r_{cont,int} = 2,0(d + h_H) + 0,5c$$



- A Querschnittsflächen der kritischen Rundschnitte bei Stützen mit Kreisquerschnitt
- B Lasteinleitungsfläche A_{load}

Bild 6.18 Platte mit einer Stützenkopfverstärkung mit $l_H > 2(d + h_H)$

<p>Bei Platten oder Fundamenten ohne Durchstanzbewehrung ist nachzuweisen, dass längs des kritischen Rundschnitts gilt:</p>	<p>Bei Platten oder Fundamenten ohne Durchstanzbewehrung ist nachzuweisen, dass entlang des kritischen Rundschnitts oder des Rundschnitts um die Lasteinleitungsfläche gilt:</p>
<p>$V_{Ed} \leq V_{Rd,ct}$</p> <p>Dabei ist: V_{Ed} die einwirkende Querkraft im betrachteten Nachweisschnitt je Längeneinheit</p> $v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u}$ <p>mit: V_{Ed} Bemessungswert der gesamten aufzunehmenden Querkraft u der Umfang des betrachteten Rundschnitts β der Beiwert zur Berücksichtigung der nichtrotationssymmetrischen Querkraftverteilung im Rundschnitt bei Rand- und Eckstützen sowie bei Innenstützen in unregelmäßigen Systemen. Für unverschiebliche Systeme dürfen folgende Werte angenommen werden, sofern kein genauere Nachweis geführt wird. (siehe DAfStb-Heft 525)</p> <p style="text-align: center;">Eckstütze: $\beta = 1,5$ Randstütze: $\beta = 1,4$ Innenstütze: $\beta = 1,05$</p> <p>Eine Reduktion der einwirkenden Querkraft aus auflagernahen Einzellasten ist nicht zulässig.</p> <p>Bei Fundamentplatten darf die Querkraft V_{Ed} um die günstige Wirkung der Bodenpressung in der kritischen Fläche abgemindert werden. Dabei dürfen für die Ermittlung der resultierenden Bodenreaktionskraft jedoch höchstens 50% der kritischen Fläche A_{crit} in Ansatz gebracht werden.</p>	<p>$V_{Ed} \leq V_{Rd,c}$</p> <p>Dabei ist: V_{Ed} die maximale einwirkende Querkraft im betrachteten Nachweisschnitt je Flächeneinheit</p> $v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed}}{u_i d}$ <p>mit: V_{Ed} die einwirkende Querkraft d die mittlere Nutzhöhe der Platte $d = (d_y + d_z) / 2$ d_y, d_z die Nutzhöhe der Platte in y- bzw. z-Richtung u_i der Umfang des betrachteten Rundschnitts β der Beiwert zur Berücksichtigung der nichtrotationssymmetrischen Querkraftverteilung im Rundschnitt bei Rand- und Eckstützen sowie bei Innenstützen in unregelmäßigen Systemen.</p> $\beta = 1 + k \cdot \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1}$ <p>Näherungswerte für β:</p> <p style="text-align: center;">Eckstütze: $\beta = 1,5$ Randstütze: $\beta = 1,4$ Innenstütze: $\beta = 1,15$</p> <p>Bei einer konzentrierten Last in der Nähe eines Stützenanschlusses einer Flachdecke ist eine Abminderung der Querkraft nicht zulässig.</p> <p>Die Querkraft V_{Ed} in einer Fundamentplatte darf um die günstige Wirkung der Bodenpressung abgemindert werden.</p>

Die Querkraftkomponente V_{pd} der Spanngliedkraft von geneigten Spanngliedern, die parallel zu V_{Ed} wirkt und innerhalb der betrachteten Rundschnitte liegt, darf berücksichtigt werden.

$V_{Rd,ct}$ die Querkrafttragfähigkeit längs des kritischen Rundschnitts

$$V_{Rd,ct} = [0,14 \eta_1 \kappa (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} - 0,12 \sigma_{cd}] d$$

mit:

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

$\eta_1 = 1,0$ für Normalbeton; für Leichtbeton nach Tab. 10

d die mittlere Nutzhöhe in mm

$$d = (d_x + d_y) / 2$$

d_x, d_y die Nutzhöhe der Platte in x- bzw. y-Richtung im betrachteten Rundschnitt

ρ_l der mittlere Längsbewehrungsgrad innerhalb des betrachteten Rundschnitts

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{lx} \rho_{ly}} \begin{cases} \leq 0,40 f_{cd}/f_{yd} \\ \leq 0,02 \end{cases}$$

ρ_{lx}, ρ_{ly} der Bewehrungsgrad, jeweils bezogen auf die Zugbewehrung in x- bzw. y-Richtung, die innerhalb des betrachteten Rundschnitts im Verbund liegt und außerhalb des betrachteten Rundschnittes verankert ist.

σ_{cd} der Bemessungswert der Betonnormalspannung innerhalb des betrachteten Rundschnitts

$$\sigma_{cd} = \frac{\sigma_{cd,x} + \sigma_{cd,y}}{2} \text{ in N/mm}^2$$

$$\sigma_{cd,x} = \frac{N_{Ed,x}}{A_{c,x}} \quad \text{und} \quad \sigma_{cd,y} = \frac{N_{Ed,y}}{A_{c,y}}$$

$\sigma_{cd,x}, \sigma_{cd,y}$ die Bemessungswerte der Betonnormalspannung innerhalb des betrachteten Rundschnitts in x- bzw. y-Richtung

Die vertikale Komponente V_{pd} infolge geneigter Spannglieder, die die Querschnittsfläche des betrachteten Rundschnitts schneiden, darf ggfs. als günstige Einwirkung berücksichtigt werden.

$V_{Rd,c}$ der Bemessungswert des Durchstanzwiderstands je Flächeneinheit bei einer Platte ohne Durchstanzbewehrung

$$V_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \sigma_{cp})$$

mit:

f_{ck} in N/mm²

$C_{Rd,c}$ nach NAD, empfohlener Wert:
 $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$

v_{min} nach NAD, empfohlener Wert:
 $v_{min} = 0,035k^{3/2} f_{ck}^{1/2}$

k_1 nach NAD, empfohlener Wert:
 $k_1 = 0,10$

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

$$\rho_l = \sqrt{\rho_{ly} \rho_{lz}} \leq 0,02$$

ρ_{ly}, ρ_{lz} bezogen auf die verankerte Zugbewehrung in y- bzw. z-Richtung. Die Werte ρ_{ly} und ρ_{lz} sollten als Mittelwerte berechnet werden unter Berücksichtigung einer Plattenbreite entsprechend der Stützenabmessung zuzüglich $3d$ je Seite.

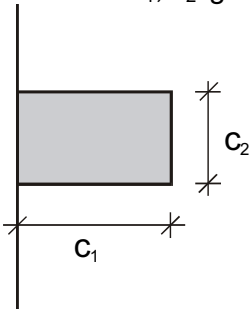
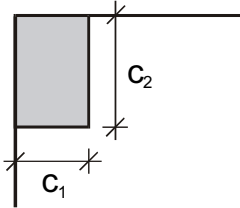
σ_{cp} der Bemessungswert der Betonnormalspannung innerhalb des betrachteten Rundschnitts

$$\sigma_{cp} = (\sigma_{cy} + \sigma_{cz})/2 \quad \text{in N/mm}^2$$

$$\sigma_{cy} = \frac{N_{Ed,y}}{A_{c,y}} \quad \text{und} \quad \sigma_{cz} = \frac{N_{Ed,z}}{A_{c,z}}$$

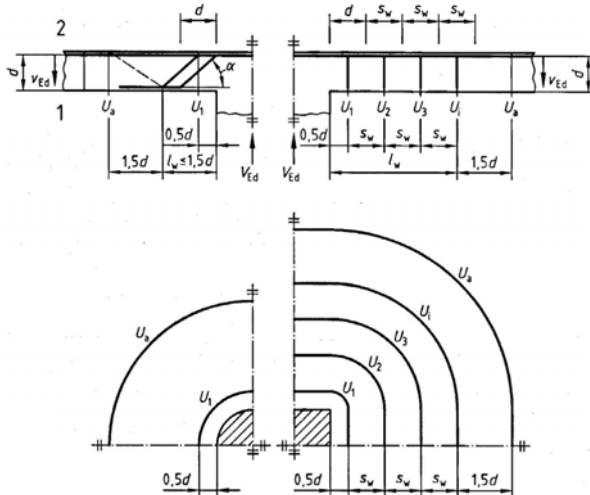
σ_{cy}, σ_{cz} die Normalspannungen im Beton in y- bzw. z-Richtung im kritischen Querschnitt (N/mm² für Druck positiv)

$N_{Ed,y}, N_{Ed,z}$ die Normalkräfte, die für Innstützen im kompletten Bereich innerhalb der Fläche des Rundschnitts wirken und die Normalkräfte, die für Eckstützen in der Fläche des Rundschnitts wirken. Diese Kraft kann

<p>$N_{Ed, x}$, $N_{Ed, y}$ die Bemessungswerte der mittleren Längskräfte in den Querschnitten $A_{c,x}$ und $A_{c,y}$ durch den kritischen Rundschnitt infolge Vorspannung oder sonstige Einwirkungen ($N_{Ed} < 0$ als Längsdruckkraft)</p>	<p>durch eine Last oder durch Vorspannung entstehen. A_c die Querschnittsfläche des Betons gemäß der Definition von N_{Ed}</p>
<p>Bei Platten oder Fundamenten mit Durchstanzbewehrung sind folgende Nachweise zu führen:</p>	
<p>a) Die aufzunehmende Querkraft V_{Ed} längs des kritischen Rundschnitts darf den Bemessungswert der maximalen Querkrafttragfähigkeit nicht überschreiten:</p> $V_{Ed} \leq V_{Rd,max}$ <p>Die maximale Querkrafttragfähigkeit für Platten mit Durchstanzbewehrung im kritischen Rundschnitt ist zu ermitteln mit</p> $V_{Rd,max} = 1,5 V_{Rd,ct}$	<p>Durchstanzbewehrung ist erforderlich, falls:</p> $V_{Ed} > V_{Rd,c}$ <p>Die einwirkende Querkraft im betrachteten Nachweisschnitt darf den maximalen Durchstanzwiderstand je Flächeneinheit nicht überschreiten.</p> $V_{Ed} < V_{Rd,max}$ <p>$V_{Rd,max}$ der Bemessungswert des maximalen Durchstanzwiderstands je Flächeneinheit</p> <p>Angrenzend an die Stütze ist der Durchstanzwiderstand begrenzt auf maximal:</p> $v_{Ed} = \frac{\beta V_{Ed}}{u_0 d} \leq v_{Rd,max} = 0,5 v f_{cd}$ <p>(empfohlener Wert nach NAD)</p> <p>mit:</p> $v = 0,6 \left[1 - \frac{f_{ck}}{250} \right] \quad (f_{ck} \text{ in N/mm}^2)$ <p>Innenstütze: $u_0 = \text{Stützenumfang}$ Randstütze: $u_0 = c_2 + 3d \leq c_2 + 2c_1$ Eckstütze: $u_0 = 3d \leq c_1 + c_2$</p> <p>c_1, c_2 gemäß Abbildung unten</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: flex-end;"> <div style="text-align: center;">  <p>a) Randstütze</p> </div> <div style="text-align: center;">  <p>b) Eckstütze</p> </div> </div>

b) In jedem inneren Rundschnitt ist nachzuweisen (s. Abbildung):

$$V_{Ed} \leq V_{Rd,sy}$$



Nachweisschnitte der Durchstanzbewehrung

Bei einer Durchstanzbewehrung rechtwinklig zur Plattenebene ist die erforderliche Bewehrung für die jeweils betrachtete Bewehrungsreihe zu ermitteln und auf dem betrachteten Umfang gleichmäßig verteilt anzuordnen:

a) für die erste Bewehrungsreihe im Abstand $0,5d$ vom Stützenrand gilt:

$$V_{Rd,sy} = V_{Rd,c} + \frac{\kappa_s A_{sw} f_{yd}}{u}$$

b) für die weiteren Bewehrungsreihen im Abstand $s_w \leq 0,75 d$ untereinander gilt:

$$V_{Rd,sy} = V_{Rd,c} + \frac{\kappa_s A_{sw} f_{yd} d}{u s_w}$$

Dabei ist:

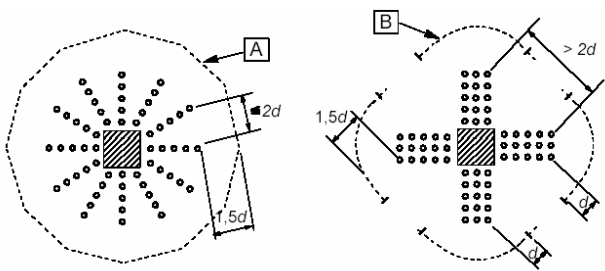
- $V_{Rd,c}$ der Betontraganteil; es darf $V_{Rd,c} = V_{Rd,ct}$ angenommen werden
- $\kappa_s A_{sw} f_{yd}$ die Bemessungskraft der Durchstanzbewehrung in Richtung der aufzunehmenden Querkraft für jede Reihe der Bewehrung
- u der Umfang des Nachweisschnittes
- s_w die wirksame Breite einer Bewehrungsreihe, mit: $s_w \leq 0,75 d$

Ist Querkraftbewehrung erforderlich, sollte sie gemäß folgender Gleichung ermittelt werden:

$$V_{Rd,cs} = 0,75 V_{Rd,c} + 1,5 (d/s_r) A_{sw} f_{ywd,ef} \cdot (1/(u_1 d)) \sin \alpha \quad [\text{N/mm}^2]$$

Dabei ist:

- A_{sw} die Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung in einem Rundschnitt um die Stütze [mm^2]
- s_r der radiale Abstand der Durchstanzbewehrungsreihen [mm^2]
- $f_{ywd,ef}$ der wirksame Bemessungswert der Festigkeit der Durchstanzbewehrung, gemäß $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$ (N/mm^2)
- d die mittlere Nutzhöhe [mm]
- u_1 Länge des kritischen Rundschnitts im Abstand $2,0d$ vom Stützenrand [mm]
- α Winkel zwischen Durchstanzbewehrung und Plattenebene

<p>κ_s der Beiwert zur Berücksichtigung des Einflusses der Bauteilhöhe auf die Wirksamkeit der Bewehrung mit</p> $\kappa_s = 0,7 + 0,3 \frac{d - 400}{400} \begin{cases} \geq 0,7 \\ \leq 1,0 \end{cases} \quad d \text{ in mm}$ <p>Werden Schrägstäbe als Durchstanzbewehrung eingesetzt, müssen diese eine Neigung von $45^\circ \leq \alpha \leq 60^\circ$ gegen die Plattenebene aufweisen. Werden ausschließlich Schrägstäbe eingesetzt, so dürfen diese nur im Bereich von $1,5d$ (mit der statischen Nutzhöhe d der Platte oder des Fundaments) um die Stütze angeordnet werden.</p> <p>Die erforderliche Bewehrung ist in einem Schnitt im Abstand $0,5d$ vom Stützenrand wie folgt nachzuweisen.</p> $V_{Rd,sy} = V_{Rd,c} + \frac{1,3 A_s \sin \alpha f_{yd}}{u}$ <p>Dabei ist:</p> <ul style="list-style-type: none"> $1,3 A_s \sin \alpha f_{yd}$ die Bemessungskraft der Durchstanzbewehrung in Richtung der aufzunehmenden Querkraft α der Winkel der geneigten Durchstanzbewehrung gegen die Plattenebene. 	<p>Bei einer einzelnen Reihe aufgebogener Stäbe darf für das Verhältnis d/s_r der Wert 0,67 verwendet werden.</p>
<p>c) Zur Vermeidung eines Versagens außerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches ist längs des äußeren Rundschnitts nachzuweisen:</p> $V_{Ed} \leq V_{Rd,ct,a}$ <p>Der äußere Rundschnitt liegt im Abstand $1,5d$ von der letzten Bewehrungsreihe. Die Querkrafttragfähigkeit längs des äußeren Rundschnitts ist wie folgt zu ermitteln:</p> $V_{Rd,ct,a} = \kappa_a V_{Rd,ct}$ <p>Dabei ist:</p> <ul style="list-style-type: none"> $V_{Rd,ct}$ die Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung unter Berücksichtigung des Längsbewehrungsgrades ρ_l im äußeren Rundschnitt κ_a der Beiwert zur Berücksichtigung des Übergangs zum Plattenbereich mit der Tragfähigkeit einer liniengelagerten Platte 	<p>Der Rundschnitt u_{out} (oder $u_{out,ef}$) für den die Durchstanzbewehrung nicht mehr erforderlich ist, ist in der Regel zu ermitteln nach:</p> $u_{out,ef} = \beta V_{Ed} / (V_{Rd,c} d)$ <p>Der äußere Rundschnitt der Durchstanzbewehrung hat in der Regel nicht weiter als $k \cdot d$ von u_{out} (oder $u_{out,ef}$) entfernt zu sein.</p> <p>$k = 1,5$ (nach NAD, empfohlener Wert)</p>  <p>A Rundschnitt u_{out} B Rundschnitt $u_{out,ef}$</p>

$$\kappa_a = 1 - \frac{0,29 l_w}{3,5d} \geq 0,71$$

l_w die Breite des Bereiches mit Durchstanzbewehrung außerhalb der Lasteinleitungsfläche

Anforderungen an die bauliche Durchbildung der Durchstanzbewehrung sind einzuhalten; die erforderliche Durchstanzbewehrung der inneren Rundschnitte darf folgenden Wert nicht unterschreiten:

$$\rho_w = \frac{A_{sw}}{s_w u} \geq \min \rho_w$$

bzw.

$$\rho_w = \frac{A_{sw} \sin \alpha}{s_w u} \geq \min \rho_w$$

bei geneigter Durchstanzbewehrung mit $s_w = d$ und mit $\min \rho_w$ nach 13.2.3 (5).

Bei Lasteinleitungsflächen, die sich nahe oder an einem Rand oder einer freien Ecke befinden, d.h. mit einem Randabstand kleiner als d , ist eine Randbewehrung entsprechend der Randbewehrung an freien Rändern von Platten mit einem Abstand der Steckbügel $s_w \leq 100$ mm längs des freien Randes erforderlich.

Mindestmomente

Um die Querkrafttragfähigkeit sicherzustellen, sind die Platten im Bereich der Stützen für Mindestmomente m_{Ed} zu bemessen, sofern die Schnittgrößenermittlung nicht zu höheren Werten führt.

Bei der Verwendung von anderen Bauprodukten als Durchstanzbewehrung ist in der Regel $V_{Rd,cs}$ durch Versuche in Übereinstimmung mit den maßgebenden Europäischen Technischen Zulassungen zu bestimmen.

Anforderungen an die bauliche Durchbildung der Durchstanzbewehrung sind einzuhalten. In Fällen, in denen Durchstanzbewehrung erforderlich ist, wird die erforderliche Fläche des Bügelschenkels (oder eines Äquivalents) $A_{sw,min}$ mit der folgenden Gleichung ermittelt:

$$A_{sw,min} (1,5 \sin \alpha + \cos \alpha) / (s_r s_t) \geq 0,08 \cdot \sqrt{f_{ck}} / f_{yk}$$

Dabei ist:

- α der Winkel zwischen der Durchstanzbewehrung und der Hauptbewehrung (d.h. bei vertikalen Bügeln $\alpha = 90^\circ$ und $\sin \alpha = 1$);
- s_r der Abstand der Bügel der Durchstanzbewehrung in radialer Richtung;
- s_t der Abstand der Bügel der Durchstanzbewehrung in tangentialer Richtung;
- f_{ck} in N/mm^2

Bei Lasteinleitungsflächen nahe eines freien Randes oder einer Ecke, d.h. in einer Entfernung kleiner als d , ist in der Regel eine Randbewehrung entsprechend der Randbewehrung an freien Rändern von Platten einzulegen.

3 Überprüfung der Regelungen zum Durchstanzen nach Eurocode 2

3.1 Allgemeines

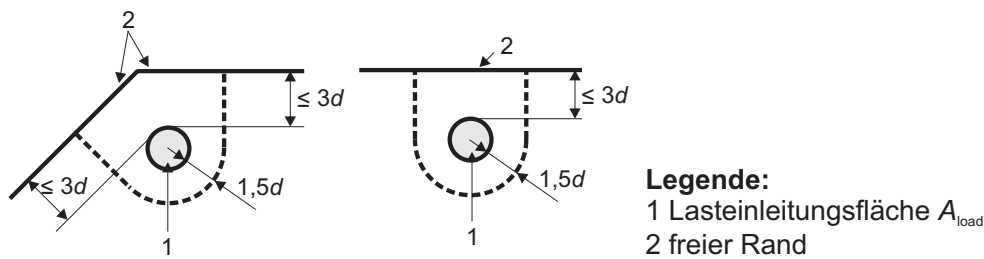
Zur Überprüfung der unterschiedlichen Ansätze der Lasterhöhungsfaktoren werden Versuchsergebnisse nachgerechnet. Aus diesem Grund werden ausgehend von den Regelungen in Kapitel 6.4 „Durchstanzen“ nach Eurocode 2 (Ausgabe Oktober 2005) [1] nachfolgend kurz die einzelnen Bemessungsregeln und die Verfahren zur Berücksichtigung einer ungleichmäßigen Querkraftverteilung vorgestellt. Unterschiede zu den Regelungen in DIN 1045-1 [2] werden angegeben, sobald sie unterschiedliche Vorgehensweisen beinhalten.

3.2 Lasteinleitung und Rundschnittführung

Der kritische Rundschnitt verläuft in Eurocode 2 im Abstand $2,0d$ von der Lasteinleitungsfläche. Durch den im Vergleich zu DIN 1045-1 größeren Abstand von der Stütze werden Spannungsspitzen am Stützenrand stärker geglättet. Für Fundamente ist der maßgebende Rundschnitt iterativ in einem Bereich bis $2,0d$ vom Stützenrand anhand der niedrigsten Tragfähigkeit zu ermitteln.

Bei Lasteinleitungsflächen, die sich in der Nähe eines freien Randes oder einer freien Ecke befinden, ist in beiden Normen ein kritischer Rundschnitt nach Bild 3-1 anzunehmen, sofern der Umfang dieses Rundschnittes nicht größer als der Umfang des kritischen Rundschnitts für Innenstützen ist. Die Rundschnitte unterscheiden sich nur durch den unterschiedlichen Abstand von der Lasteinleitungsfläche. Ergänzend wird in DIN 1045-1 geregelt, dass ein freier Rand oder eine freie Ecke dann als stützennah gelten, wenn ihr Abstand von der Lasteinleitungsfläche $\leq 3d$ ist. Dieses Maß kann als Hilfsgröße beibehalten und im Nationalen Anwendungsdokument angegeben werden.

DIN 1045-1:



Eurocode 2:

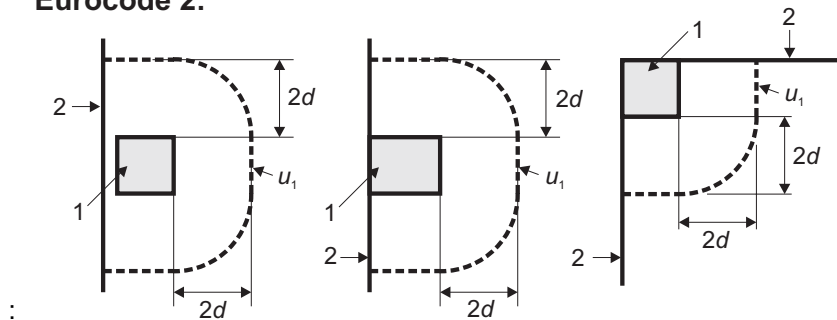


Bild 3-1: Definition des kritischen Rundschnitts in der Nähe von Rändern

3.3 Längsbewehrungsgrad

Zur Ermittlung des Durchstanzwiderstands für Platten und Fundamente wird der maximal anrechenbare Längsbewehrungsgrad auf 2% begrenzt, um eine Bewehrungskonzentration im Bereich des Stanzkegels zu vermeiden, die ein Verbundversagen begünstigen würde. Der Längsbewehrungsgrad wird dabei in einem Bereich der Stützenbreite zuzüglich $3,0d$ je Seite ermittelt. Durch die größere anzusetzende Breite ergeben sich bei Bewehrungskonzentrationen in Stütznähe geringere Bewehrungsgrade als bei der Anwendung von DIN 1045-1, die den Mittelwert innerhalb des Rundschnittes, d.h. Stützenbreite zuzüglich $1,5d$ je Seite, zugrunde legt. Ein kleinerer Längsbewehrungsgrad ergibt eine geringere rechnerische Durchstanztragfähigkeit. In DIN 1045-1 wird der Längsbewehrungsgrad zusätzlich in Abhängigkeit von der Betondruck- und Stahlzugfestigkeit auf $\rho_l \leq 0,40 f_{cd} / f_{yd}$ begrenzt. Durch diese Begrenzung wird die Anordnung einer Druckbewehrung für niedrigere Betondruckfestigkeiten verhindert, da eine Druckbewehrung im Durchstanzbereich aufgrund ihrer Lage in der Nähe der Dehnungsnulllinie nahezu unwirksam ist. Für übliche Deckenschlankheiten liegt die Betondruckzonenhöhe mit 30 bis 60 mm in der Größenordnung der Betondeckung [4].

Die Begrenzung des Längsbewehrungsgrades zur Vermeidung einer Druckbewehrung wurde für eine Betondruckfestigkeit ohne den Dauerstandsbeiwert α hergeleitet [4]. Der Vorfaktor von 0,4 in DIN 1045-1 liegt somit auf der sicheren Seite und darf um den Faktor $1/\alpha$ erhöht werden. Es ergibt sich dann der in Heft 525 angegebene Vorfaktor von 0,47.

3.4 Durchstanzbewehrung

Die erforderliche Durchstanzbewehrung ist in festgelegten Rundschnitten nachzuweisen und ebenso vorzusehen. Die erste Reihe liegt dabei in einem Abstand von $0,5d$ vom Stützenrand und alle weiteren Reihen dürfen einen maximalen Abstand s_w von $0,75d$ haben. In Heft 525 [4] wird eine Lageabweichung von $0,2d$ als zulässig erachtet.

Die angegebenen Bemessungsgleichungen beziehen sich auf den Einsatz von Bügeln und Schrägaufbiegungen als Durchstanzbewehrung. Beim Einsatz anderer Bauprodukte (Doppelkopfanker, Dübelleisten, Gitterträger, etc.) als Durchstanzbewehrung wird auf Versuche und die bauaufsichtlichen Zulassungen zur Ermittlung der Durchstanztragfähigkeit verwiesen.

3.5 Nachweisverfahren

Für den Durchstanzwiderstand punktgestützter Platten werden vier Grenzwerte festgelegt:

$V_{Rd,c}$	Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung ermittelt im Abstand $2,0d$;
$V_{Rd,cs}$	Durchstanzwiderstand innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs;
$V_{Rd,max}$	maximaler Durchstanzwiderstand der Platte ermittelt am Stützenrand;
$V_{Rd,out}$	Durchstanzwiderstand außerhalb der Durchstanzbewehrung.

Die Bemessungsgleichungen weichen teilweise erheblich von den Regelungen in DIN 1045-1 ab und werden deshalb im Folgenden anhand von Versuchsergebnissen von ausmittig beanspruchten Innenstützen und Randstützen überprüft.

Eine ausmittige Beanspruchung bei Innen-, Rand- und Eckstützen wird über einen Lasterhöhungsfaktor β berücksichtigt, mit dem die Momenten-Querkraft-Interaktion abgedeckt wird. Zur Ermittlung des Lasterhöhungsfaktors bietet Eurocode 2 drei Verfahren an. Neben dem Ansatz einer vollplastischen Schubspannungsverteilung dürfen verkürzte Rundschnitte und konstante Faktoren angesetzt werden. Das genaue Verfahren legt eine vollplastische Schubspannungsverteilung zu Grunde (Bild 3-2, links). Dieses Berechnungsverfahren wurde aus Model Code 90 [6] übernommen. Die Wahl dieser Schubspannungsverteilung ist auf Mast [7] zurückzuführen, der mit der Elastizitätstheorie gezeigt hat, dass sich die Schubspannungsverteilung nahe der Stütze einer vollplastischen Verteilung annähert (Bild 3-2, rechts).

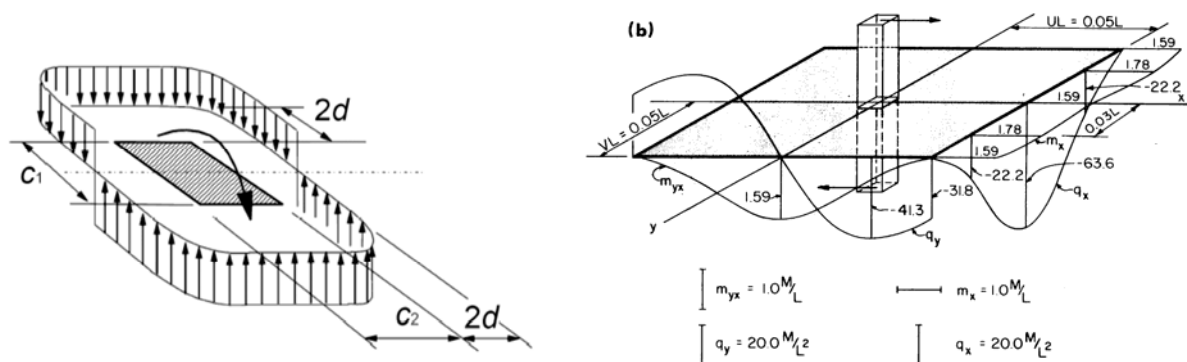


Bild 3-2: Vollplastische Schubspannungsverteilung nach Eurocode 2 (links)
 Momenten- und Querkraftverteilung nach Mast [7] (rechts)

Der Lasterhöhungsfaktor β ergibt sich danach zu:

$$\beta = 1 + k \cdot \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1} \quad (3-1)$$

Hierbei sind k der Anteil des Moments, der zusätzliche Schubspannungen erzeugt, u_1 der Umfang des kritischen Rundschnitts, W_1 das Widerstandsmoment entlang des kritischen Rundschnitts, welches nach folgender Gleichung ermittelt werden darf:

$$W_1 = \int_0^{u_1} |e| dl \quad (3-2)$$

Bei der Berechnung von W_1 ist für e der Abstand von der Schwerelinie des kritischen Rundschnitts einzusetzen. Für Innen- und Randstützen sind die Gleichungen für W_1 in Tabelle 3-1 angegeben. Bei Rand- und Eckstützen liegt der Lastangriffspunkt des Moments (Stützenschwerpunkt) im Regelfall nicht auf der Schwerelinie des kritischen Rundschnitts. Bei der Berechnung des β -Faktors ist das Moment M_{Ed} auf die Schwerelinie des kritischen Rundschnitts zu beziehen und kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$M_{Ed,Sl} = M_{Ed,Stütze} - V_{Ed} \cdot x_{sl} \quad (3-3)$$

V_{Ed} ist die einwirkende Querkraft und x_{sl} der Abstand zwischen dem Schwerpunkt der Stütze und der Schwerelinie des kritischen Rundschnitts. Wenn x_{sl} so groß wird, dass $M_{Ed,Sl}$ das Vorzeichen wechselt, tritt bei Randstützen die größte Schubspannung am freien Rand der Platte auf, d.h. die Ausmitte e' bezogen auf die Schwerelinie des kritischen Rundschnitts wird negativ (Bild 3-3). In diesem Fall ist bei der Berechnung von β das Widerstandsmoment W_1 mit negativem Vorzeichen einzusetzen, damit sich für β ein Wert größer als 1 ergibt.

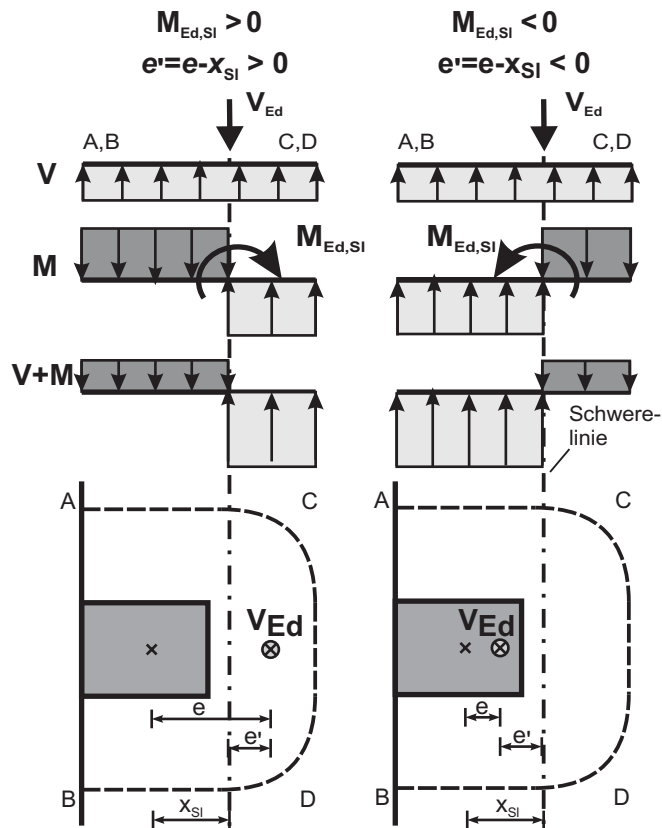
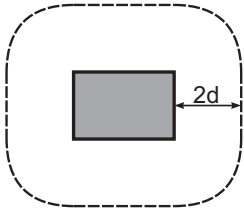
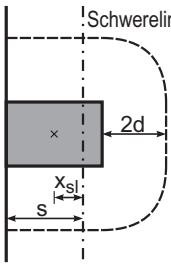


Bild 3-3 Plastische Spannungsverteilung in Abhängigkeit des Moments

Tabelle 3-1: Statisches Moment des kritischen Rundschnittes W_1 für Innen- und Randstützen

	Innenstütze	Randstütze
		
W_1	$W_1 = \frac{1}{2} c_1^2 + c_1 \cdot c_2 + 4 \cdot c_2 \cdot d + 16 \cdot d^2 + 2\pi \cdot d \cdot c_1$	$W_1 = 2 \cdot c_1 \cdot \left \frac{1}{2} \cdot c_1 - s \right + c_2 \cdot 2 \cdot d + c_1 - s + 2 \cdot \pi \cdot d \cdot \left c_1 + 4 \cdot \frac{d}{\pi} - s \right $
s	0	$s = \frac{c_1^2 + c_1 \cdot c_2 + 2c_2 \cdot d + 2\pi \cdot d \cdot c_1 + 8 \cdot d^2}{2c_1 + c_2 + 2\pi \cdot d}$

Bei einer rechteckigen Innenstütze mit zweiachsiger Lastausmitte darf für β die folgende Näherung verwendet werden:

$$\beta = 1 + 1,8 \cdot \sqrt{\left(\frac{e_y}{b_z}\right)^2 + \left(\frac{e_z}{b_y}\right)^2} \quad (3-4)$$

Dabei sind e_y, e_z die Lastausmitten M_{Ed}/V_{Ed} jeweils bezogen auf die y- und z-Achse und b_y, b_z die Abmessungen des betrachteten Rundchnitts.

Vereinfachend dürfen Randstützen mit einer Lastausmitte rechtwinklig zum freien Rand, die zum Platteninneren gerichtet ist, und ohne Lastausmitte parallel zum freien Rand mit einem verminderten Rundschnitt u_{1*} (Bild 3-4) berechnet werden. Der β -Faktor darf dann vereinfacht ermittelt werden mit

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} \quad (3-5)$$

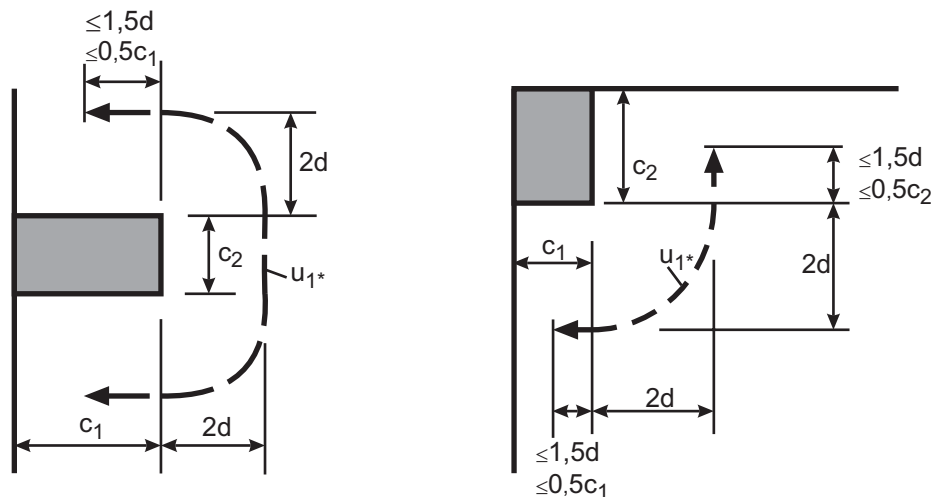


Bild 3-4: Verkürzter Rundschnitt u_{1*} für Randstützen (links) und Eckstützen (rechts) nach Eurocode 2

Bei Lastausmitten in zwei orthogonalen Richtungen darf β wie folgt bestimmt werden:

$$\beta = \frac{u_1}{u_{1*}} + k \cdot \frac{u_1}{W_1} \cdot e_{par} \quad (3-6)$$

Dabei ist u_{1*} der verminderte kritische Rundschnitt nach Bild 3-4, links, e_{par} ist die parallel zum Plattenrand verlaufende Lastausmitte, k ist der Anteil des Momentes senkrecht zum Plattenrand, der zusätzliche Schubspannungen erzeugt und darf aus Tabelle 6.2 des Eurocode 2 entnommen werden, wenn das Verhältnis c_1/c_2 durch $c_1/2c_2$ ersetzt wird, W_1 ist das Widerstandsmoment für ein Moment senkrecht zum Plattenrand und ist für den gesamten kritischen Rundschnitt einer Innenstütze zu ermitteln.

Bei Eckstützen mit einer nach innen gerichteten Lastausmitte wird angenommen, dass die Querkraft gleichmäßig über einen verminderten Rundschnitt u_{1*} (Bild 3-4, rechts) verteilt ist. Der β -Faktor darf dann zu $\beta = u_1/u_{1*}$ berechnet werden.

Bei Rand- und Eckstützen mit nach außen gerichteter Lastausmitte ist das oben beschriebene genauere Verfahren, dem eine plastische Schubspannungsverteilung zugrunde liegt, zu verwenden.

Anstelle einer genaueren Ermittlung des Lasterhöhungsfaktors β nach den beiden beschriebenen Verfahren dürfen alternativ für gewisse Randbedingungen pauschale Werte angewendet

werden. Die pauschalen β -Faktoren stimmen bis auf den Wert für Innenstützen (1,15 statt 1,05) mit den Werten in DIN 1045-1 überein. In Abhängigkeit der gewählten Versuchsanordnung werden bei zentrischen Durchstanzversuchen bereits nichtrotationssymmetrische Querkraftbeanspruchungen geprüft, deren Abweichungen vom rotationssymmetrischen Fall bis zu 20 % betragen können. Da die Herleitung der Bemessungsgleichungen anhand einer Versuchsdatenbank erfolgte, sind die bei Innenstützen auftretenden Abweichungen von einer rotationssymmetrischen Querkraftbeanspruchung bereits berücksichtigt. Beutel hat in [19] mit nichtlinearen FE-Simulationen gezeigt, dass bei Deckensystemen im Bereich der Innenstützen im Gegensatz zu Rand- und Eckstützen der β -Faktor mit zunehmendem Abstand zur Stütze nicht abklingt (Bild 3-5). Diese Berechnungen ergaben für gleiche Stützweitenverhältnisse im Bereich der ersten Innenstützen einen mittleren Lasterhöhungsfaktor β von ungefähr 1,25 (Bild 3-5). Der β -Faktor von 1,25 erfasst sowohl die Spannungskonzentration an den Stützenecken als auch die ungleiche Querkraftverteilung im Bauwerk. Aus diesem Grund wird empfohlen den in Eurocode 2 festgelegten Wert von 1,15 beizubehalten, um auch für Stützweitenunterschiede von bis zu 25 % ein ausreichendes Sicherheitsniveau zu erreichen. Für eine Abminderung des β -Faktors bei Innenstützen unterhalb des Wertes von 1,15 ist eine genauere Berechnung nach Gleichung (3-1) im Einzelfall erforderlich. Für den Fall von ein- oder auspringenden Stützenecken sind größere Spannungsspitzen zu erwarten, die durch die angegebenen Lasterhöhungsfaktoren nicht abgedeckt sind. Diese können nur durch eine sektorweise Betrachtung des Rundschnittes erfasst werden. Eine entsprechende Regelung sollte im Nationalen Anwendungsdokument gefordert werden.

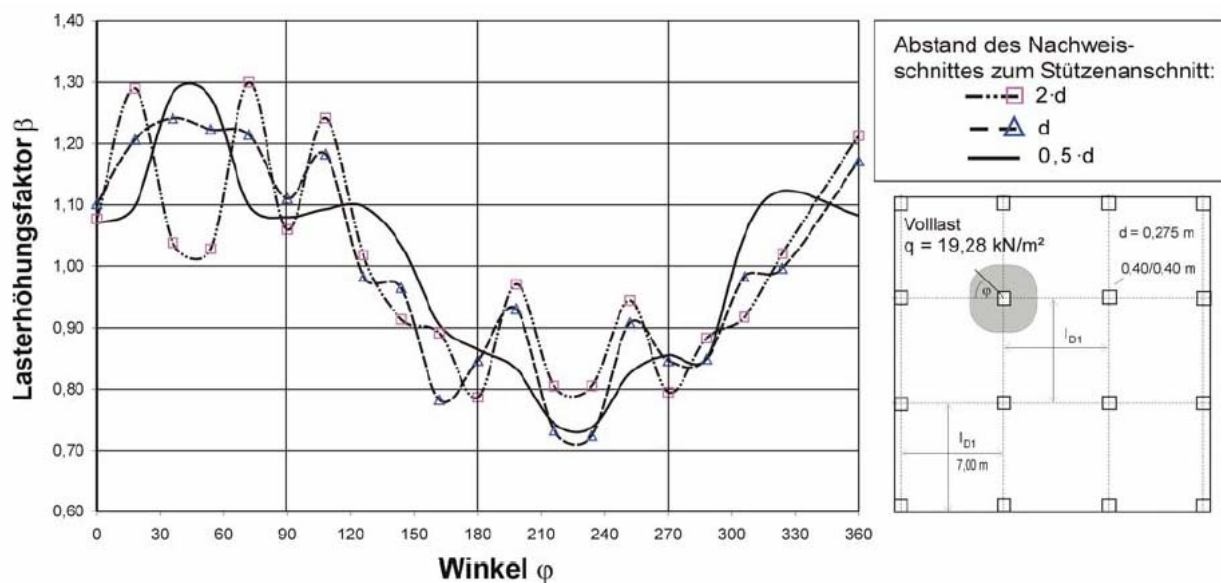


Bild 3-5 Typischer Verlauf des Lasterhöhungsfaktors β im Bereich von Innenstützen bei Variation des Abstandes zur Stütze für nichtlineare Systemberechnungen mit LIMFES [19]

3.6 Vergleich mit Versuchsergebnissen

3.6.1 Auswahlkriterien

Nachfolgend wird das Sicherheitsniveau der Bemessungsansätze zum Durchstanzen nach Eurocode 2 anhand von Versuchsergebnissen überprüft. Hierzu wurden alle Versuche nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Statische Nutzhöhe größer 80 mm;
- Orthogonales Bewehrungsnetz;
- Verhältnis der Stützensseitenlängen $0,67 \leq c_1/c_2 \leq 1,5$;
- Betondruckfestigkeit $f_{c,cyl} \leq 100$ MPa;
- Bewehrungsgrad innerhalb der Anwendungsgrenzen des Berechnungsansatzes;
- Verhältnis aus Versuchsbruchlast zu Biegetragfähigkeit nach Bruchlinientheorie $V_{Test}/V_{u,flex} \leq 1,15$.

Die Versuchsnachrechnungen wurden in Anlehnung an EN 208 mit einer charakteristischen Betondruckfestigkeit von $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$ MPa durchgeführt.

3.6.2 Biegetragfähigkeit

Die Biegetragfähigkeit der Versuche wurde mit der Bruchlinientheorie berechnet [10]. Die Bruchmomente wurden dabei unter Annahme eines rechteckigen Spannungsbereichs in der Druckzone ermittelt. Bei Rand- und Eckstützen wurde zur Vereinfachung der Berechnung eine fächerartige Anordnung der Bruchlinien vorausgesetzt. Eine solche Anordnung der Bruchlinien kann im Versuch jedoch nicht beobachtet werden. Die ermittelten Bruchlasten stellen somit eine obere Schranke der Biegetragfähigkeit dar, wegen der Nachverfestigung des Betonstahls können in Versuchen dennoch höhere Lasten erreicht werden. Versuche mit einem Verhältniswert $V_{Test}/V_{u,flex} < 1,0$ wurden als ein sprödes Durchstanzversagen klassifiziert, Werte zwischen $1,0 \leq V_{Test}/V_{u,flex} \leq 1,15$ als ein halbduktiler Durchstanzversagen und Versuche mit $V_{Test}/V_{u,flex} > 1,15$ als ein Biegeversagen bewertet. Die Versuche mit einer geringen rechnerischen Überschreitung der theoretischen Bruchlinienlast wurden aus der Überlegung berücksichtigt, dass der zweiachsigel Spannungszustand der Betondruckzone bei der Bestimmung des plastischen Querschnittsmoments vernachlässigt wurde. Außerdem sollten Versuche im Übergangsbereich zwischen Biege- und Durchstanzversagen, d.h. Biegeschubbrüche erfasst werden.

3.7 Zuverlässigkeitstheorie und statistische Auswertung

3.7.1 Allgemeines

Bauwerke sind so zu bemessen, dass in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit der Widerstand R nur mit einer sehr geringen Wahrscheinlichkeit kleiner als die Einwirkungen E wird. In Bild 3-6, oben sind die Verteilungsdichten des Widerstandes R und der Einwirkungen E dargestellt. Im grau dargestellten Überschneidungsbereich ist ein zufällig vorhandener Widerstand kleiner als die gleichzeitig vorhandene Einwirkung, d.h. die Tragfähigkeit ist nicht gegeben. Eine Überschneidung der beiden Bereiche ist nicht zu vermeiden, so dass eine Bemessung absolute Sicherheit nicht garantieren kann. Wird die Zustandfunktion $G = R - E = 0$ eingeführt, beschreibt der Bereich $G < 0$ den Versagensbereich (Bild 3-6, unten).

Der Abstand zwischen dem Mittelwert μ_G und dem Ursprung beschreibt die sogenannte zentrale Sicherheitszone und kann als ein Vielfaches der Standardabweichung σ_G ausgedrückt werden. Der Sicherheitsindex β entspricht dem Multiplikator und ergibt sich somit zu

$$\beta = \frac{\mu_G}{\sigma_G} \quad (3-7)$$

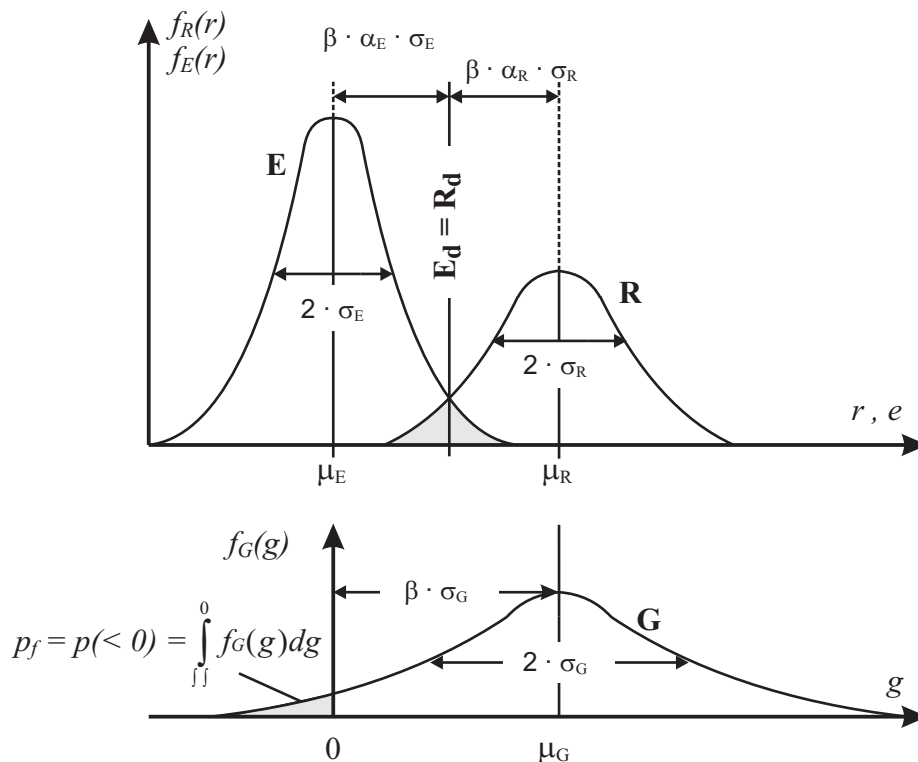


Bild 3-6 Verteilungsdichten des Widerstandes R und der Einwirkungen E (oben)
 Verteilungsdichte der Zustandsfunktion $G = R - E$ (unten)

Die Zuverlässigkeit der Durchstanzgleichungen in Eurocode 2 wurde mit Hilfe der Zuverlässigkeitstheorie erster Ordnung (FORM – First-Order Reliability Method) überprüft bzw. kalibriert. Die untersuchten Bemessungsgleichungen wurden mit den in Anhang D.8 in Eurocode beschriebenen Gleichungen bewertet. Bei dem Verfahren in Eurocode handelt es sich um eine klassische MVFOSM-Methode (Mean Value First-Order Second-Moment Method), d.h. die Grenzzustandsgleichung wurde in dem durch die Mittelwerte der Basisvariablen vorgegebenen Punkt linearisiert. Die Verteilungstypen der Basisvariablen werden bei der in Eurocode beschriebenen Methode nicht berücksichtigt. Bei Anwendung der beiden Methoden wurde durch die Wahl von konstanten Wichtungsfaktoren die Widerstands- und Einwirkungsseite voneinander entkoppelt. Die konstanten Wichtungsfaktoren wurden dabei gemäß DIN 1055-100 [9] und Eurocode (EN 1990) [8] zu $\alpha_R = 0,8$ und $\alpha_E = -0,7$ angenommen. Diese Vereinfachung ermöglichte es im Rahmen dieses Berichtes alleine die Widerstandsseite zu betrachten und beschreibt auch den Übergang von den probabilistischen Methoden zu den semi-probabilistischen Methoden, die den derzeit gültigen Normen zugrunde liegen. Weitergehende Erläuterungen zur Zuverlässigkeitstheorie sollen an dieser Stelle nicht gegeben werden, es wird auf die einschlägige Fachliteratur verwiesen ([12],[13],[14],[15],[16]).

3.8 Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex β

In Anhang B zu Eurocode (EN 1990) [8] und in Anhang B zu DIN 1055-100 [9] werden Zielwerte für den Zuverlässigkeitsindex β für den Grenzzustand der Tragfähigkeit angegeben (Tabelle 3-2). Die Werte werden dabei für die Bezugszeiträume 1 und 50 Jahre angegeben. Es wird dabei für gängige Gebäude von einer durchschnittlichen Nutzungsdauer von 50 Jahren ausgegangen. Eurocode gibt zusätzlich weitere Werte für den Zuverlässigkeitsindex in Abhängigkeit von sogenannten Schadensfolgenklassen an (Tabelle 3-3). Allerdings werden im Eurocode genau wie in DIN 1055-100 bei der Ermittlung von Sicherheitselementen diese Unterscheidungen nicht angewendet, sondern es wird auf den Zuverlässigkeitsindex $\beta = 3,8$ für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren zurückgegriffen. Ein gegebenenfalls erforderliches höheres Sicherheitsniveau ist durch größere Teilsicherheitsbeiwerte zu berücksichtigen.

Tabelle 3-2 Mindestwerte des Zuverlässigkeitsindex β bzw. der Versagenswahrscheinlichkeit nach Eurocode

Schadensfolge-/ Zuverlässigkeitsklasse	Mindestwert für β (Versagenswahrscheinlichkeit)	
	Bezugszeitraum 1 Jahr	Bezugszeitraum 50 Jahre
3	5,2 ($1,0 \cdot 10^{-7}$)	4,3 ($8,5 \cdot 10^{-6}$)
2	4,7 ($1,3 \cdot 10^{-6}$)	3,8 ($7,2 \cdot 10^{-5}$)
1	4,2 ($1,3 \cdot 10^{-5}$)	3,3 ($4,8 \cdot 10^{-4}$)

Tabelle 3-3 Klassen für Schadensfolgen nach Eurocode

Schadensfolgeklassen	Merkmale	Beispiele
3	Hohe Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen (z.B. eine Konzerthalle)
2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen (z. B. ein Bürogebäude)
1	Niedrige Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr (z.B. Scheunen, Gewächshäuser)

3.8.1 Basisvariablen

Für die Zuverlässigkeitsanalyse müssen die unsicheren Einflussgrößen statistisch beschrieben werden. Bei dem vorliegenden Problem ist von Vorteil, dass alle als streuend angenommenen Basisvariablen messbare Größen sind, für die Statistiken prinzipiell leicht beschafft werden können. Trotzdem erlaubt das vorliegende Datenmaterial zum Teil nur Schätzungen. Das gilt vor allem für die Modellunsicherheiten, die aus Bauteilversuchen bestimmt werden sollten. Bei

den vorliegenden Verteilungstypen genügt zur vollständigen Charakterisierung der streuenden Größen die Angabe des Mittelwertes, der Standardabweichung, bzw. Variationskoeffizient und des Verteilungstyps. Die statistischen Kennwerte für die Stahleigenschaften und die geometrischen Größen wurden dem Probabilistic Model Code des Joint Committee on Structural Safety [15] entnommen. Die Streuung der Betonfestigkeiten wurde dagegen in Anlehnung an den Artikel [11] von Tue zu 3,5 MPa festgelegt. In Tabelle 3-4 sind die Annahmen für die statistischen Kennwerte der Festigkeits- und geometrischen Größen zusammengefasst. Innerhalb des durch Eurocode 2 vorgegebenen Anwendungsbereiches wurde die Wertekombination für die Basisvariablen ermittelt, die zu dem kleinsten Zuverlässigkeitsindex führte. Das Durchstanzen von Platten ohne Durchstanzbewehrung wurde für eine minimale statische Nutzhöhe von 140 mm nachgewiesen, da kleinere statische Nutzhöhen für Flachdecken ohne Bedeutung sind. In Deutschland sind Vollplatten mit einer Höhe von 70 mm zulässig. Sollte bei solch dünnen Platten (z.B. Fassadenplatten) dennoch die Gefahr eines Durchstanzversagens bestehen, wurde davon ausgegangen, dass die Ausführungstoleranzen deutlich geringer als 10 mm sind (Fertigteilplatten).

Tabelle 3-4 Zusammenstellung der Basisvariablen

Einflussgröße	Mittelwert	σ	ν	Verteilung	ohne Durchstanzbewehrung	mit Durchstanzbewehrung
d	+10 mm	10 mm	-	normal	≥ 140 mm	≥ 150 mm
f_c	-	3,5 MPa	-	In-normal	≥ 20 MPa	≥ 20 MPa
f_s	+2 σ	30 MPa	-	In-normal	S 500	S 500
c	$0,003c \approx 0 \leq 3$ mm	$4+0,006c$ mm	-	normal	≥ 200 mm	≥ 200 mm
A_s	-	-	0,02	normal	$\leq 2\%$	$\rho_{l,min}^{1)} \leq \rho_l \leq 2\%$
A_{sw}	-	-	0,02	normal	-	$\rho_{w,min} \leq \rho_w \leq \rho_{w,max}^{2)}$

1) berechnet aus den Mindestmomenten; 2) berechnet aus der Maximaltragfähigkeit

Es ist nicht möglich die Bedingungen mit Sicherheit anzugeben, unter denen ein Bauwerk oder Bauteil versagt. Dies liegt an dem meist beschränkten Wissen über das zugrunde liegende Tragverhalten und an den notwendigen Vereinfachungen der Rechnung. Die Vorhersageunge nauigkeit des verwendeten Rechenmodells kann durch den Vergleich der berechneten Versagenslasten mit experimentell bestimmten Werten abgeschätzt werden. Die Modellunsicherheit kann dann durch eine zusätzliche Basisvariable in der Grenzzustandsfunktion berücksichtigt werden. Die in den nachfolgenden Zuverlässigkeitsberechnungen verwendeten und aus umfangreichen Versuchsnachrechnungen gewonnenen statistischen Parameter für die Modellunsicherheitsfaktoren sind in Tabelle 3-5 zusammengestellt. Zur Berücksichtigung der zwangsläufig beschränkten Versuchsanzahl wurden die Standardabweichung bzw. die Variationskoeffizienten mit einem Vertrauensniveau von 75% und die Quantilbeiwerte mit einem Vertrauensniveau von 95% jeweils einseitig nach oben abgesichert. Zur Ermittlung des Erwartungswertes wurde gemäß Anhang D des Eurocodes eine Regressionsgerade durch den Ursprung ermittelt. Der mit der Methode der kleinsten Abstandsquadrate gefundene Regressionskoeffizient b beschreibt dann die Mittelwertabweichung.

Tabelle 3-5 Zusammenstellung der statistischen Kenngrößen für die Basisvariable Modellunsicherheit

Versuchstyp	Anzahl	ξ_m	b	v_δ	$v_{\delta,1-0,25}$	Verteilung
Innstützen ohne Durchstanzbewehrung mit Moment	72	1,24	1,23	0,119	0,133	LN
Randstützen ohne Durchstanzbewehrung	37	1,43	1,33	0,125	0,146	LN

ξ_m : arithmetisches Mittel; b : Mittelwertabweichung aus Regression durch Ursprung; v_d : Variationskoeffizient; $v_{d,1-0,25}$: Variationskoeffizient mit einem Vertrauensniveau von 75%; LN: In-normalverteilt

3.9 Innenstützen

3.9.1 Durchstanztragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung

In Abschnitt 6.4.4 wird die Durchstanztragfähigkeit für Platten ohne Durchstanzbewehrung festgelegt. Dabei entspricht die Bestimmungsgleichung nach Eurocode 2 formal der Gleichung in DIN 1045-1. Unterschiede bestehen in den beiden Vorfaktoren $C_{Rd,c}$ und k_1 , die in Eurocode 2 beide kleiner sind als in DIN 1045-1. Durch die unterschiedlichen Rundschnittlängen ergeben sich jedoch in etwa gleich große Widerstände und ein ausreichendes Sicherheitsniveau wie in [39] festgestellt wurde.

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} \cdot k \cdot (100 \cdot \rho_l \cdot f_{ck})^{1/3} + k_1 \cdot \sigma_{cp} \geq (v_{min} + k_1 \cdot \sigma_{cp}) \quad (3-8)$$

Hierbei sind $C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c$, k der Maßstabsfaktor $k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2,0$ (mit d in mm) und ρ_l der Längsbewehrungsgrad.

Zusätzlich wurde in Eurocode 2 eine Mindestquerkrafttragfähigkeit v_{min} eingeführt, die bei kleinen Längsbewehrungsgraden in Verbindung mit höheren Betonfestigkeiten zu größeren Tragfähigkeiten führt (Bild 3-7). Bei den ausgewerteten Versuchen der Datenbank wurde dieses Kriterium allerdings nicht maßgebend und kann daher nicht beurteilt werden.

$$v_{min} = 0,035 \cdot k^{2/3} \cdot f_{ck}^{1/2} \quad (3-9)$$

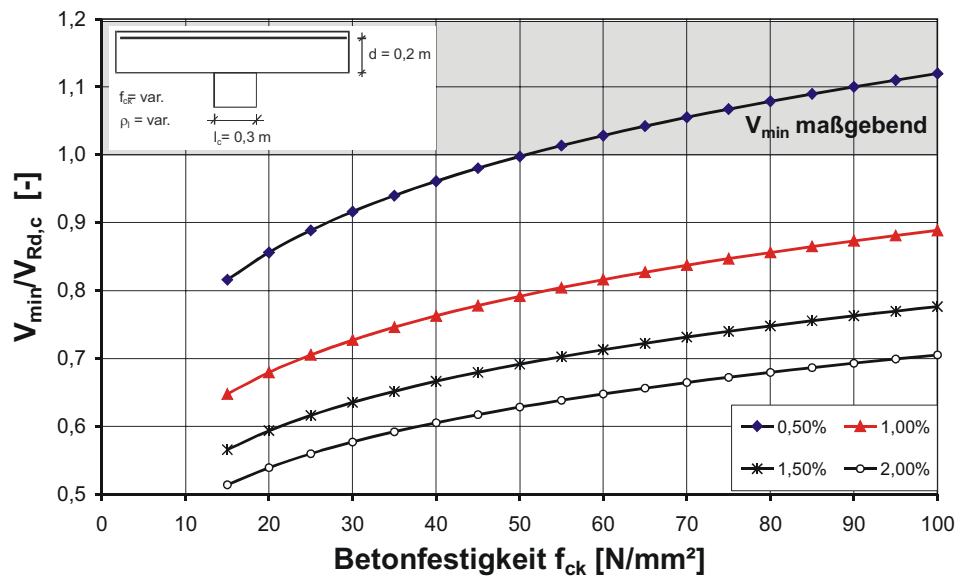


Bild 3-7: Vergleich der Mindestdurchstanztragfähigkeit V_{min} mit der Durchstanztragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung $V_{Rd,c}$

3.9.2 Durchstanzen von Innenstützen mit Momentenbeanspruchung

Werden Gebäude mit Flachdecken ohne aussteifende Wände oder Kerne errichtet, müssen die Stützen-Decken-Knoten auch bei Innenstützen planmäßig Momente und Querkräfte übertragen. Eine Momentenbeanspruchung entsteht bei Innenstützen außerdem durch große Spannweitenunterschiede benachbarter Felder sowie durch stark unterschiedliche Verkehrslastbeanspruchungen der einzelnen Deckenbereiche. Zur Überprüfung des Berechnungsverfahrens in Eurocode 2 wird nachfolgend eine umfangreiche Versuchsnachrechnung durchgeführt. Als Grundlage wurde dabei die in [22] veröffentlichte Datenbank verwendet. Die Datenbank wurde von Zilch und Hammelehle neu gesichtet und erweitert und umfasst nun insgesamt 76 Versuche an exzentrisch belasteten Innenstützen ohne Durchstanzbewehrung [27]. Bei hoher Momentenbeanspruchung bzw. im Grenzfall einer reinen Momentenbeanspruchung tritt bei Innenstützen ein asymmetrisches Durchstanzen auf. Ursache hierfür ist der selbst bei geringen Bewehrungsgraden hohe Biege Widerstand von Innenstützen, so dass sich der in Bild 3-8 dargestellte Tragmechanismus einstellen kann [23].

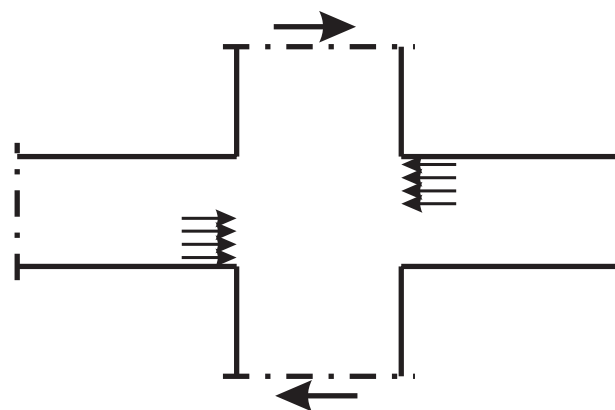


Bild 3-8 Übertragen des Moments zwischen Platte und Stütze durch gegenüberliegende Druckzonen

In Bild 3-9 wird der genauere Bemessungsansatz nach Eurocode 2 (plastische Schubspannungsverteilung) mit den Versuchen aus der Datenbank verglichen, indem auf der Ordinate der Quotient aus experimenteller und rechnerischer Durchstanzlast in Abhängigkeit der Schubspannung infolge Moment bezogen auf die zulässige Schubspannung nach Eurocode 2 aufgetragen ist. Bei einem Mittelwert von $\xi_m = 1,24$ und einem Variationskoeffizienten von $v_{\delta+rt} = 0,189$ ergibt sich der Sicherheitsindex β_{min} zu 3,88, womit das nach Eurocode erforderliche Sicherheitsniveau ($\beta \geq 3,8$) erreicht wird. Weiterhin kann dem Diagramm entnommen werden, dass die lineare Interaktion zwischen Moment und Querkraft, die Gleichung 3-1 zugrunde liegt, für das Durchstanzen von Innenstützen mit Momentenbeanspruchung näherungsweise zutrifft.

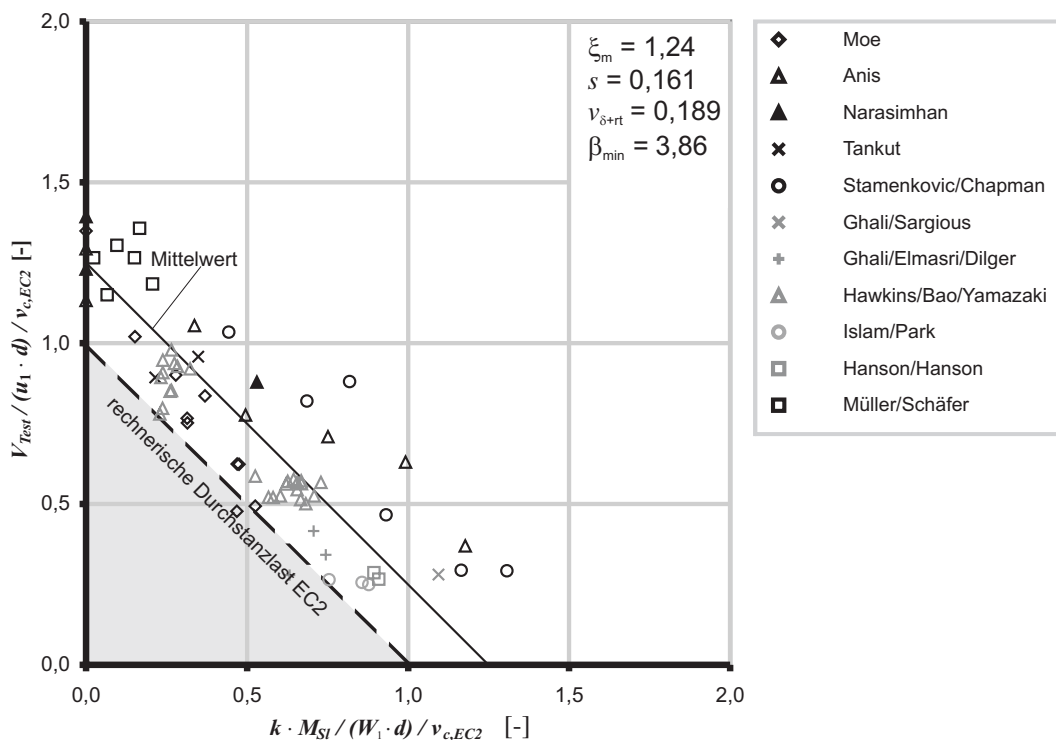


Bild 3-9: Gegenüberstellung von experimenteller und rechnerischer Durchstanzlast nach Eurocode 2 für 72 Versuche in Abhängigkeit der bezogenen Momentenbeanspruchung, $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

3.9.3 Empfehlungen für ein Nationales Anwendungsdokument zu Eurocode 2

Das Verfahren zur Berechnung von Innenstützen mit Momentenbeanspruchung aus Eurocode 2 kann für Platten ohne Durchstanzbewehrung ohne Änderung übernommen werden, da das geforderte Sicherheitsniveau erreicht wird.

3.10 Randstützen

3.10.1 Allgemeines

Im Bereich der Decken-Stützenverbindungen von Rand- und Eckstützen entstehen bei Flachdecken hohe Momenten- und Querkraftbeanspruchungen, die sowohl ein Biegeversagen als auch ein Querkraftversagen verursachen können. Während bei zentrisch belasteten Innenstützen

zen annähernd rotationssymmetrische Spannungsverhältnisse vorliegen, erzeugen bei Rand- und Eckstützen das Einspannmoment aus Rahmenwirkung und die Querkraft eine asymmetrische Beanspruchung. DIN 1045-1 bzw. Heft 525 und Eurocode 2 regeln die Abnahme der Querkrafttragfähigkeit über Lasterhöhungsbeiwerte β .

3.10.2 Vereinfachte Lasterhöhungsfaktoren zur Berücksichtigung der Momenten-Querkraft-Interaktion in DIN 1045-1 und Eurocode 2

In [24] hat Tuchlinski ein verbessertes Nachweiskonzept für Rand- und Eckstützen vorgestellt, das einen kritischen Rundschnitt direkt am Stützenanschnitt verwendet und die Momenten-Querkraft-Interaktion explizit berücksichtigt. Die wesentlichen Einflüsse können auch durch einen vereinfachten Lasterhöhungsfaktor, der für die Anwendung in Verbindung mit dem Nachweiskonzept von DIN 1045-1 bzw. Eurocode 2 entwickelt wurde, berücksichtigt werden [25]. Für rechteckige Rand- und Eckstützen ergibt sich:

$$\beta = \frac{\beta_0}{k} \quad (3-10)$$

Hierin ist β_0 der Grundfaktor zur Berücksichtigung der Momenteneinwirkung und kann wie folgt ermittelt werden:

$$\beta_0 = \frac{e}{c} \geq 1,1 \quad (3-11)$$

Der Faktor $k = \left(\frac{d}{c_2}\right)^{0,15}$ dient zur Berücksichtigung der unterschiedlichen Rundschnittführungen;

c_2 ist bei Randstützen die Stützenbreite parallel zum freien Rand und bei Eckstützen die größere Seitenlänge der Stütze.

3.10.3 Vergleich der β -Faktoren

In Bild 3-10 sind die verschiedenen β -Faktoren über die bezogene Lastausmitte e/c aufgetragen. Beim genauen Verfahren nach Eurocode 2, das eine plastische Schubspannungsverteilung verwendet, kann die maßgebende Schubspannung entweder am freien Rand der Platte oder am inneren Rand des kritischen Rundschnitts auftreten. Ab einer bezogenen Ausmitte kleiner als 1,0 tritt beim Nachweis nach Eurocode 2 die betragsmäßig größte Spannung am freien Rand auf. Bei Randstützen ist im Gegensatz zu Innenstützen keine umlaufende Druckzone am Stützenanschnitt vorhanden, die einen traglaststeigernden mehraxialen Spannungszustand hervorruft. Nach nichtlinearen FE-Parameterstudien von Tuchlinski [24] zur Momenten-Querkraft-Interaktion konnte gezeigt werden, dass sich bei einer geringen Momentenbeanspruchung senkrecht zum freien Rand bei Randstützen zunächst noch keine ausreichend große Druckzone ausbildet, so dass die Durchstanztragfähigkeit im Vergleich zu Innenstützen geringer ist. Mit zunehmender Biegebeanspruchung vergrößert sich die Druckzone und die Durchstanztragfähigkeit nimmt entsprechend zu. Bis zu einer bezogenen Ausmitte von etwa 0,9 führt dieser Effekt zu einer Erhöhung der Tragfähigkeit, für größere Ausmitte wirkt sich die Momenten-Querkraft-Interaktion traglastmindernd aus. In [24],[25] wird daher vorgeschlagen, den Last-

erhöhungsfaktor β in Abhängigkeit von der bezogenen Ausmitte zu bestimmen. Die Verfahren mit konstanten β -Faktoren ergeben für sehr kleine und sehr große bezogene Ausmitten e/c deutlich kleinere β -Faktoren als die Verfahren mit veränderlichen β -Faktoren. Der Ansatz nach [24],[25] verwendet im Vergleich dazu im Bereich kleiner Ausmitten einen konstanten Lasterhöhungsfaktor, der dann ab einer bezogenen Ausmitte $e/c \geq 1,1$ linear ansteigt.

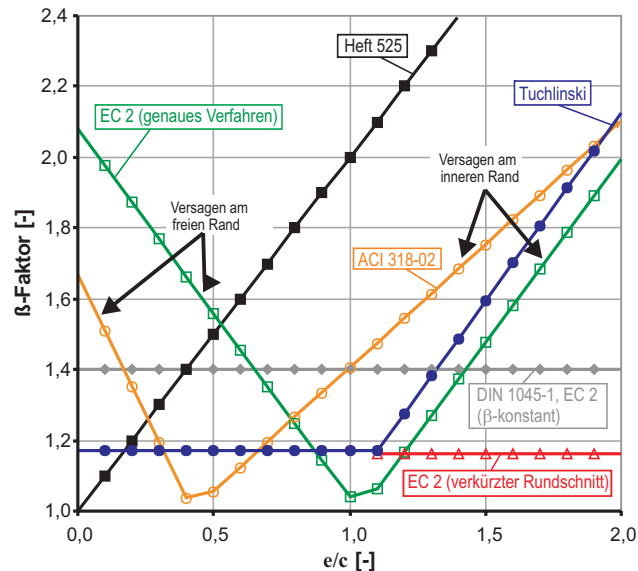


Bild 3-10 Vergleich von verschiedenen β -Faktoren in Abhängigkeit der bezogenen Ausmitte e/c

3.10.4 Durchstanztragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung

Ausgangspunkt für die Vergleichsrechnungen waren die in [24],[26],[27] angegebenen Versuchszusammenstellungen zum Durchstanz im Bereich von Randstützen. Die eigene Datenbank umfasst 110 Randstützenversuche zum Durchstanz ohne Durchstanzbewehrung (z.B. [28],[29],[30],[31],[32]) und 38 Versuche zum Durchstanz mit Durchstanzbewehrung (z.B. [33],[34]). Die meisten Versuche wurden mit geringer statischer Nutzhöhe ausgeführt. Zum Vergleich der Bemessungsmodelle mit den Versuchsergebnissen wird der Quotient aus experimenteller Bruchlast V_{Test} und der rechnerischen Bruchlast $V_{Ru,model}$ gebildet. Das Widerstandsmoment W_1 und der Abstand zur Schwerlinie x_{Sl} wurde gemäß Tabelle 3-1 berechnet.

Bei Verwendung der in Eurocode 2 angegebenen plastischen Schubspannungsverteilung zur Ermittlung der β -Faktoren wird das geforderte Sicherheitsniveau erreicht. Der Bemessungsansatz liegt bei einem Variationskoeffizienten von $v_{\delta+rt} = 0,216$ mit einem Sicherheitsindex $\beta_{min} = 3,71$ nur knapp unterhalb des erforderlichen Wertes von 3,80 (Bild 3-11). Allerdings setzt dieser Wert einen Mindestwert für den Lasterhöhungsfaktor β von 1,10 voraus. Bei Ansatz des verkürzten Rundschnittes nach Eurocode 2 ergibt sich ein 5%-Quantilwert von nur 0,55 (Tabelle 3-6). Dies deutet auf eine sehr große Modellunsicherheit hin, so dass das erforderliche Sicherheitsniveau nicht erreicht wird. Der Variationskoeffizient beträgt 0,39 und ist damit sogar schlechter als bei Ansatz eines konstanten β -Faktors von 1,4 ($v = 0,37$).

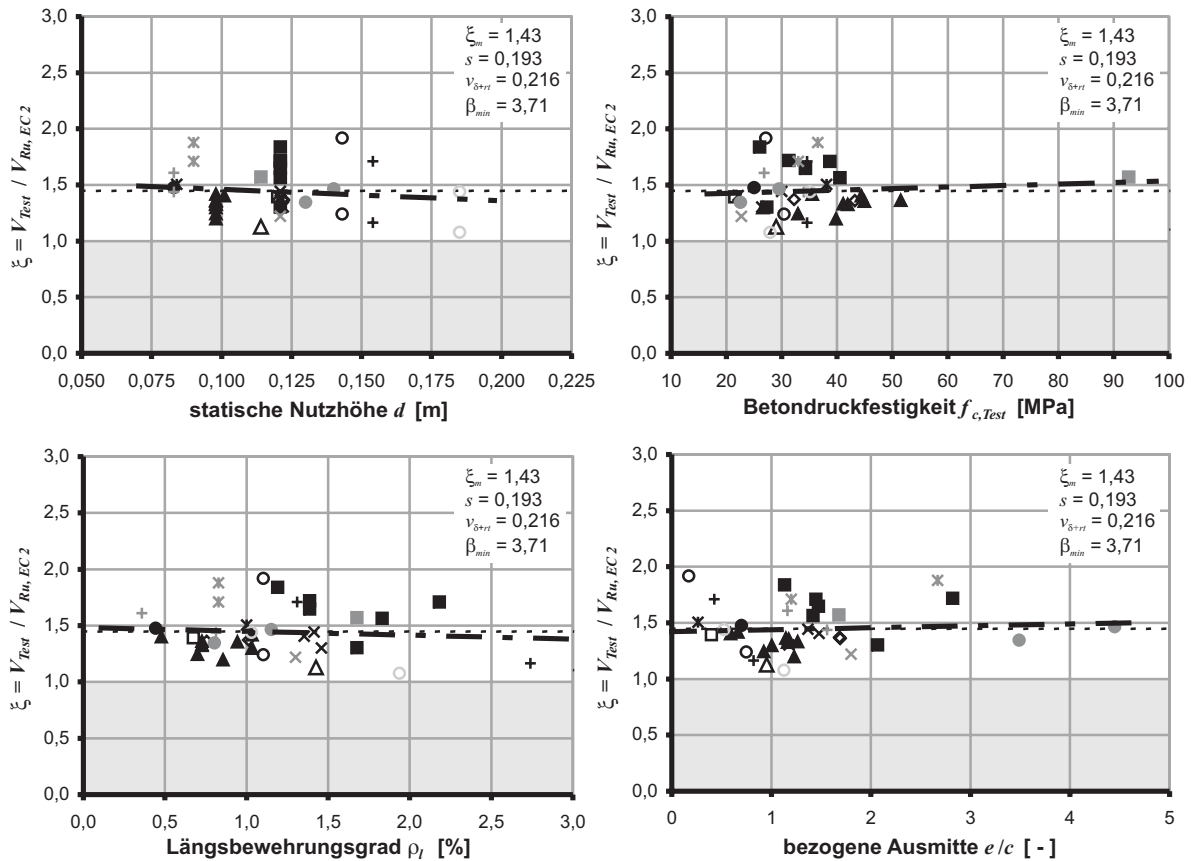


Bild 3-11: Vergleich der Versuchsbruchlast mit dem Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung nach Eurocode 2 für 37 Versuche, $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Die rechnerischen Widerstände nach DIN 1045-1, die mit einem konstanten β -Faktor ermittelt wurden, führen zu einer sehr großen Modellunsicherheit, so dass das in Eurocode [8] geforderte Sicherheitsniveau nicht erreicht wird. Bei Ansatz der Lasterhöhungsfaktoren nach Heft 525 ergibt sich für das Verhältnis aus Bruchlast und rechnerischer Tragfähigkeit ein 5%-Quantilwert von 1,37 (Tabelle 3-6). Der Variationskoeffizient vermindert sich bei Ansatz der β -Faktoren nach Heft 525 von 0,37 auf 0,18. Verantwortlich für die große Streuung und dem damit verbundenen niedrigem Sicherheitsniveau bei Ansatz eines konstanten β -Faktors ist die fehlende Berücksichtigung der Lastausmitte. Aus Bild 3-12 (links) kann entnommen werden, dass mit zunehmender bezogener Ausmitte e/c das Verhältnis aus V_{Test} zu $V_{Ru, DIN 1045-1}$ deutlich abnimmt. Die Lasterhöhungsfaktoren nach Heft 525 erfassen den Einfluss der bezogenen Ausmitte dagegen relativ trendfrei (Bild 3-12, rechts).

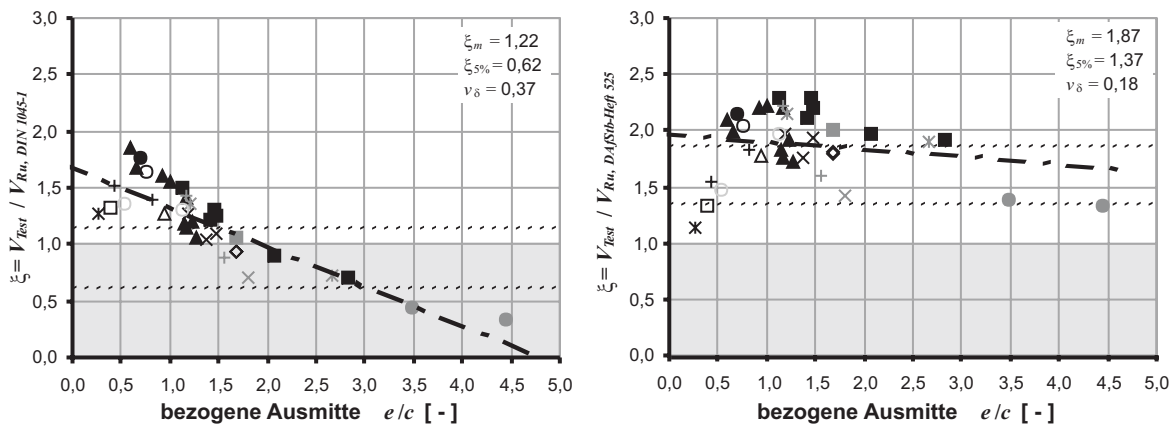


Bild 3-12: Vergleich der Bemessungsgleichungen nach DIN 1045-1 (links) und Heft 525 (rechts) mit 37 Durchstanzversuchen an Randstützen ohne Durchstanzbewehrung, $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Die relativ einfachen Regelungen von Tuchlinski zur Ermittlung des Lasterhöhungsfaktors führen zusammen mit den Regelungen nach Eurocode 2 zu einem 5%-Quantilwert von 1,06, was in Verbindung mit dem relativ geringen Variationskoeffizient von 0,14 erwarten lässt, dass das in Eurocode geforderte Sicherheitsniveau erreicht wird (Tabelle 3-6). Insgesamt führt eine Anwendung der β -Faktoren nach Tuchlinski zu einer ausreichend sicheren Bemessung ohne das Sicherheitsniveau so stark wie Heft 525 anzuheben. Die Streuung liegt auf dem Niveau des genaueren Verfahrens nach Eurocode 2, der Berechnungsaufwand dieses Ansatzes ist in der Anwendung jedoch erheblich.

Tabelle 3-6: Statistische Kennwerte der Versuchsnachrechnungen von Randstützenversuchen ohne Durchstanzbewehrung (ln-normalverteilt, $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$)

Norm	Anzahl	statistische Kennwerte		
	n	ξ_m	v_δ	$\xi_{5\%}$
DIN 1045-1	37	1,22	0,37	0,62
DIN 1045-1/Heft 525	37	1,87	0,18	1,37
EC 2 (genaues Verfahren)	37	1,43	0,14	1,13
EC 2 (verkürzter Rundschnitt)	37	1,12	0,39	0,55
EC 2 (konstante β -Faktoren)	37	1,25	0,37	0,64
DIN 1045-1 (β -Faktoren nach Tuchlinski/Hegger)	37	1,31	0,13	1,04
EC 2 (β -Faktoren nach Tuchlinski/Hegger)	37	1,35	0,14	1,06

3.10.5 Versuchsnachrechnungen zum Durchstanzen mit Durchstanzbewehrung

In Abschnitt 6.4.5 des Eurocode 2 wird die Durchstanztragfähigkeit für Platten mit Durchstanzbewehrung geregelt. Zum einen wird die Durchstanztragfähigkeit einer Bewehrung angegeben und zum anderen die Maximaltragfähigkeit der Druckstrebe am Stützenanschnitt. Bei der ermittelten Durchstanzbewehrung wird unterstellt, dass diese gleichmäßig im durchstanzbewehrten

Bereich verteilt ist. Abschließend wird der Rundschnitt ermittelt, in dem keine Durchstanzbewehrung mehr benötigt wird.

Für die Versuchsnachrechnungen wurden die Versuche nach Versagensarten klassifiziert. Neben der rechnerischen Eingruppierung wurden zusätzlich die in der Literatur beschriebenen Versagensarten berücksichtigt.

Aufgrund der geringen Versuchsanzahl wurde auf eine statistische Auswertung mit Ermittlung des erreichten Sicherheitsindex verzichtet.

Maximaltragfähigkeit

Beim Nachweis der Maximaltragfähigkeit nach Eurocode 2 wird der Bemessungsschnitt direkt an der Stütze geführt. Hierbei wird als Widerstand sinngemäß die gleiche Formel wie zur Bestimmung der maximal zulässigen Querkraft bei Balken (Eurocode 2, Abschnitt 6.2.2, Gleichung 6.5) verwendet.

$$v_{Rd,max} = 0,5 \cdot v \cdot f_{cd} \quad (3-12)$$

mit: $v = 0,6 (1 - f_{ck}/250)$

Die nach Gleichung (3-12) ermittelte Traglast entspricht der Druckstreben­tragfähigkeit eines parallelgurtigen Fachwerkmodells. Die Auswertung von Versuchen lässt jedoch eindeutig erkennen, dass nicht ein Versagen der schrägen Betondruckstrebe, sondern die Tragfähigkeit der Betondruckzone am Stützenanschnitt maßgebend ist. Infolge der geringen Druckzonenhöhe am Stützenanschnitt und der unvollständigen Umschnürung durch die Durchstanzbewehrung in diesem Bereich tritt vor Erreichen der maximalen Druckstreben­tragfähigkeit das Versagen durch ein Abplatzen der Betondeckung ein. Aus diesem Grund wurde in DIN 1045-1 die Maximaltragfähigkeit als ein Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung angegeben. Hierdurch lässt sich zudem die bessere Verankerungsqualität von Doppelkopfkankern und Dübelleisten gegenüber Bügeln durch einen höheren Vorfaktor berücksichtigen.

In [20],[39] wurde gezeigt, dass die in Eurocode 2 angegebene maximale Durchstanztragfähigkeit für Innenstützen zu groß ist. In Tabelle 3-7 sind die Versagenslasten von vier Versuchen von Mortin und Ghali (JS2, JS3, JS5 und JS6) [29] und einem Versuch von Hegger et al. (RSO6n) [35] mit den Maximaltragfähigkeiten nach Eurocode 2 sowie dem Änderungsvorschlag aus [39] ($V_{Rd,max} = 11 \cdot \sqrt{\frac{d}{u_0}} \cdot v_{Rd,c} \cdot u_0 \cdot d$) verglichen. Die Tragfähigkeit der Versuche aus [29], die

als Maximaltragfähigkeitsversuche beschrieben werden, wird von der Bemessungsgleichung in Eurocode 2 deutlich überschätzt. Die erreichten Bruchlasten liegen im unteren Streubereich der Maximaltragfähigkeit, da im Versuch höchstwahrscheinlich ein Biegeversagen aufgetreten ist. In [29] wird die nach der Fließlinientheorie ermittelte Biegetragfähigkeit mit 247 kN angegeben, die damit nur wenig größer als die beobachteten Bruchlasten ist. Die Maximaltragfähigkeit für eine Durchstanzbewehrung aus Bügeln nach ACI 318-02 wurde im Versuch erreicht. Der von Dilger und Ghali vorgeschlagene höhere Wert für Kopfbolzendübel, der heute in ACI 421.1 R empfohlen wird, wird bei den Versuchen JS2 und JS3 nicht erreicht. Die Versuche von Mortin und Ghali sind deshalb als nicht geeignet für einen Bemessungsansatz zur Maximaltragfähigkeit für das

Durchstanzen im Bereich von Randstützen zu validieren. Der Versuch RSO6n hat dagegen die rechnerischen Werte nach Eurocode 2 um 18 % überschritten, da im Bruchzustand ein Teil der Biegezugbewehrung die Streckgrenze überschritten hatte, kann das Versagen als kombiniertes Druckstreben- und Biegeversagen klassifiziert werden. Die erreichte Bruchlast sollte daher ebenfalls als untere Grenze der Maximaltragfähigkeit verstanden werden. Der Vorschlag für die Maximaltragfähigkeit nach [39] ermittelt für den eigenen Versuch ein Verhältnis aus Bruchlast zu rechnerischem Tragwiderstand von $\xi = 1,38$. Für die Versuche von Mortin und Ghali ergibt sich dagegen im Mittel ein Wert von nur 0,94, da die Versuche wie oben beschrieben vermutlich auf Biegung versagten. Um die maximale Durchstanztragfähigkeit von Randstützen genauer beurteilen zu können, sind weitere Versuche mit einem ausreichend hohen Biegebewehrungsgrad notwendig, der ein Biegeversagen sicher ausschließt.

Tabelle 3-7 Versuche zur Maximaltragfähigkeit von Randstützen

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
	$c_1=c_2$	d	f_c	$\rho_{l,EC}$	V_{Test}	M_{Test}	e/c	β	$V_{max,EC}$	$V_{Test}/V_{max,EC}$	$V_{max,NAD}$	$V_{Test}/V_{max,NAD}$
Test	[mm]	[mm]	[MPa]	[%]	[kN]	[kNm]	[-]	[-]	[kN]	[-]	[kN]	[-]
JS2	254	122	49,0	1,04	231	93,6	1,62	1,91	436	0,53	250	0,92
JS3	254	122	44,7	1,04	212	88,1	1,66	1,95	393	0,54	236	0,90
JS5	254	122	35,8	1,01	212	86,4	1,60	1,92	326	0,65	219	0,97
JS6	254	122	33,9	1,04	201	84,4	1,68	1,98	300	0,67	211	0,95
RSO6n	300	185	35,0	1,74	1032	163,0	0,53	1,48	874	1,18	746	1,38

c_1 : Stützensseitenlänge senkrecht zum freien Rand; c_2 : Stützensseitenlänge parallel zum freien Rand; d : statische Nutzhöhe; $\rho_{l,EC}$: mittlerer Bewehrungsgrad innerhalb eines Bereiches der Stütze zuzüglich $3d$ je Seite; V_{Test} : Bruchlast; M_{Test} : Bruchmoment; e/c : bezogene Lastausmitte; $V_{max,EC}$: Maximaltragfähigkeit nach Eurocode 2; $V_{max,NAD}$: Vorschlag für die Maximaltragfähigkeit
 $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Versagen innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs

Die Regelungen nach Eurocode 2 zur Durchstanztragfähigkeit von Platten mit Durchstanzbewehrung unterscheiden sich zum Teil grundlegend von denen in DIN 1045-1. Während die erforderliche Durchstanzbewehrung nach DIN 1045-1 für die erste Bewehrungsreihe und die weiteren Bewehrungsreihen getrennt ermittelt wird, bestimmt Eurocode 2 eine mittlere Bewehrungsmenge für den gesamten Durchstanzbereich.

$$V_{Rd,cs} = \left(0,75 \cdot v_{Rd,c} + 1,5 \cdot \frac{d}{s_r} \cdot \frac{A_{sw} \cdot f_{ywd,ef}}{u_1 \cdot d} \cdot \sin \alpha \right) \cdot u_1 \cdot d \quad (3-13)$$

Hierbei sind $s_r \leq 0,75d$ der radiale Abstand der Durchstanzbewehrungsreihen, A_{sw} die Querschnittsfläche einer Bewehrungsreihe und $f_{ywd,ef}$ der wirksame Bemessungswert der Stahlspannung der Durchstanzbewehrung $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$.

Die Auswertung von Versuchen an Innenstützen verdeutlicht, dass die integrale Ermittlung der Querkraftbewehrung im Durchstanzbereich nicht zutreffend ist [17],[18]. Daher erfolgt die Bemessung in DIN 1045-1 auf der Basis eines 45°-Fachwerkmodells unter Berücksichtigung eines Betontrageanteils. Dieses Vorgehen entspricht der Bewehrungsführung in den meisten Versuchen, bei denen die Durchstanzbewehrung in einer oder zwei Reihen um die Stütze konzentriert

angeordnet wurde. Nach DIN 1045-1 wird die Kraft ($V_{Ed} - u_{r=0,5d} V_{Rd,c}$) in der ersten Bewehrungsreihe vollständig durch die Bewehrung aufgenommen. In den folgenden Nachweisschnitten geht der Abstand der Bewehrungsreihen untereinander in die Bemessungsgleichung mit ein. Das Vorgehen nach Eurocode 2 unterschätzt demnach zum einen die Beanspruchung der ersten beiden Bewehrungsreihen und geht zum anderen von einem 33° -Fachwerk zuzüglich eines Betontraganteils aus, was insgesamt zu einer geringeren Bewehrungsmenge führt (Bild 3-13).

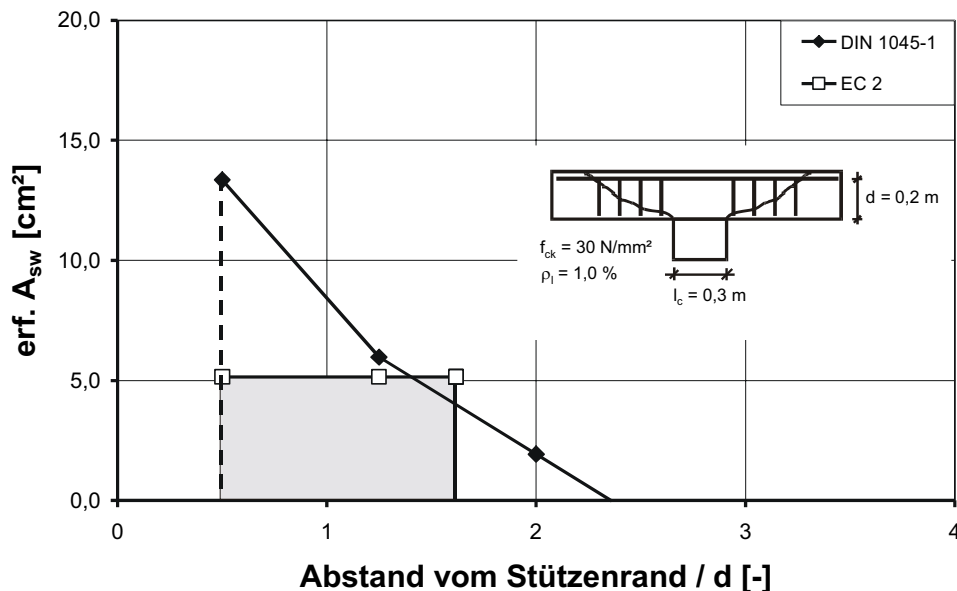


Bild 3-13: Exemplarische Ermittlung der erforderlichen Durchstanzbewehrung nach Eurocode 2 und DIN 1045-1

In Bild 3-14 sind die auf die Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung normierten Durchstanzwiderstände innerhalb des schubbewehrten Bereiches über der Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung pro Reihe aufgetragen. Für DIN 1045-1 sind drei Kurven für die ersten drei Bewehrungsreihen dargestellt, da sich die Größe des Betontraganteils ändert. Die nach Eurocode 2 und ACI 318-02 errechneten Tragfähigkeiten sind in allen Bewehrungsreihen gleich groß, da die im kritischen Rundschnitt ermittelte Bewehrung und der zugehörige Betontraganteil für alle weiteren Schnitte beibehalten werden. DIN 1045-1 ermittelt für die erste Bewehrungsreihe zusammen mit ACI 318-02 den geringsten Durchstanzwiderstand, da DIN 1045-1 die gesamte Querkraft in der ersten Reihe hochhängt [19] und ACI 318 02 ein 45° -Fachwerkmodell verwendet. Zudem sind die angesetzten Betontraganteile im Vergleich zu Eurocode 2 gering. Für die weiteren Bewehrungsreihen ermittelt DIN 1045-1 den Durchstanzwiderstand progressiver, da dann neben einem 45° -Fachwerk ein mit dem Umfang des Rundschnittes zunehmender Betontraganteil angesetzt wird. Die Kurve nach Eurocode 2 weist von allen Kurven die größte Steigung auf, da neben dem Betontraganteil ein Fachwerk mit 33° flachen Druckstreben angenommen wird. Die Erhöhung der Tragfähigkeit infolge Durchstanzbewehrung wird durch die Maximaltragfähigkeit begrenzt, die ein Betonversagen der Druckzone am Stützenanschnitt beschreibt. Die Werte oberhalb der Maximaltragfähigkeit sind in Bild 3-14 strichliniert dargestellt. Es fällt auf, dass die Maximaltragfähigkeit nach Eurocode 2 mit dem 2,86-fachen Wert der Betontragfähigkeit V_c nahezu den doppelten Wert von DIN 1045 1 und ACI 318 02 erreicht.

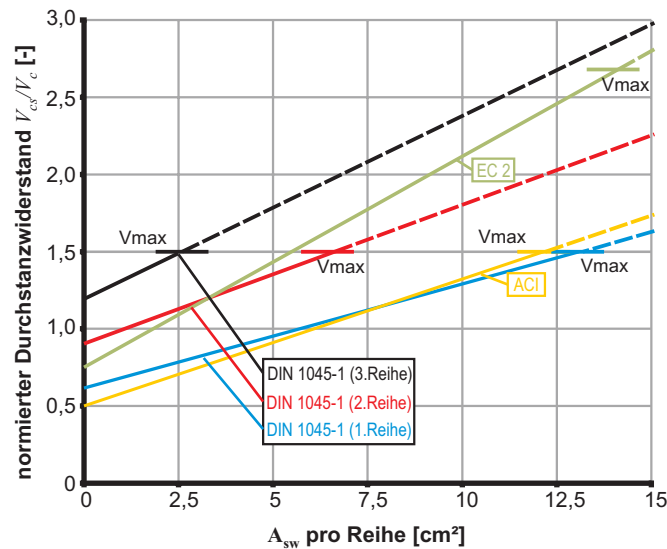


Bild 3-14: Normierter Durchstanzwiderstand im Bereich der Durchstanzbewehrung

In Tabelle 3-8 wird die Durchstanztragfähigkeit nach Eurocode 2 mit Versuchsergebnissen [35],[37] verglichen, die innerhalb der Durchstanzbewehrung versagten. Es wird das genauere Verfahren mit einer plastischen Schubspannungsverteilung nach Eurocode 2 für die Auswertung verwendet. Bei der Berechnung der Durchstanztragfähigkeit im durchstanzbewehrten Bereich nach Eurocode 2 wurden die Mittelwerte aus jeweils zwei benachbarten Bewehrungsreihen ermittelt. Für den Vergleich wurde die niedrigste Tragfähigkeit angesetzt. Die eigenen Versuche waren mit Bügeln [35] und die von Sherif [37] mit Kopfbolzendübeln bewehrt. Die Platten SC-3 und SC-4 wurden mit großer Ausmitte getestet, die bei Ansatz der plastischen Schubspannungsverteilung nach Eurocode 2 am freien Rand nach oben gerichtete Schubspannungen ergaben. Bei den Versuchen R3, R4 und RSO1 war die Momentenbeanspruchung gering, so dass die Ausmitte bezogen auf die Schwerelinie des kritischen Rundschnitts nach außen gerichtet war und am freien Rand die maximalen Schubspannungen auftraten. Der Tabelle 3-8 kann entnommen werden, dass die nach Eurocode 2 errechneten Widerstände im Mittel 7 % zu gering sind, die Streuung ist ebenfalls klein, was zu einem Variationskoeffizienten von $v = 0,11$ führt.

Tabelle 3-8 Schubspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei einem Versagen innerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches

1 Test	2 $c_1=c_2$	3 d	4 f_c	5 $\rho_{l,EC}$	6 A_{sw}	7 V_{Test}	8 M_{Test}	9 M_{Sl}/V_{Test}	10 $v_{u,Test}$		12 v_{cs}	13 v_{Test}/v_{cs}
									innen	außen		
[-]	[mm]	[mm]	[MPa]	[-]	[cm ²]	[kN]	[kNm]	[mm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]
S2	250	114	33,0	1,63	4,3	213	72,0	146	2,13	0,42	2,72	0,78
SC-1	250	114	28,3	1,53	4,3	211	73,5	156	2,16	0,36	2,64	0,82
SC-2	250	114	27,8	1,53	4,3	235	82,5	159	2,43	0,38	2,64	0,92
SC-3	250	114	28,1	1,53	4,3	120	90,2	560	2,56	-1,12	2,64	0,97
SC-4	250	114	30,8	1,53	4,3	121	95,7	599	2,71	-1,26	2,67	1,01
R3	300	185	37,1	0,83	7,4	598	93,0	-137	0,81	2,33	2,08	1,12
R4	300	185	24,4	0,99	7,4	568	97,0	-122	0,85	2,13	2,00	1,06
RSO1	300	185	24,3	1,05	7,1	575	111	-100	0,98	2,04	2,43	0,84
RSO4	300	185	39,5	1,41	5,6	673	218	31	1,96	1,57	2,19	0,89
RSO7n	300	185	26,9	1,74	9,5	779	192	-46	1,71	2,37	2,60	0,91

c_1 : Stützseitenlänge senkrecht zum freien Rand; c_2 : Stützseitenlänge parallel zum freien Rand; d : statische Nutzhöhe; f_c : Zylinderdruckfestigkeit des Betons; $\rho_{l,EC}$: mittlerer Bewehrungsgrad innerhalb eines Bereiches der Stütze zuzüglich $3d$ je Seite; A_{sw} : kleinste mittlere Durchstanzbewehrung aus jeweils zwei benachbarten Durchstanzbewehrungsreihen; V_{Test} : Bruchlast; M_{Test} : Bruchmoment; M_{Sl} : auf die Schwerlinie des kritischen Rundschnitts bezogenes Moment; $v_{u,Test}$: Schubspannung längs des kritischen Rundschnitts; v_{cs} : rechnerisch aufnehmbare Schubspannung im durchstanzbewehrten Bereich nach Eurocode 2; $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Sherif empfiehlt in [36],[37] abweichend von ACI 318-02 den Tragwiderstand der Durchstanzbewehrung bei Randstützen anders als bei Innenstützen zu berechnen. ACI 318-02 geht von einer linearen Verteilung der Schubspannungen infolge der Momentenbeanspruchung aus, so dass die maximale Schubspannung entweder an der Innenseite des Rundschnitts oder am freien Rand auftritt. Sherif geht davon aus, dass wenn am freien Rand in zwei Punkten die zulässige Schubspannung auftritt, die maximale Tragfähigkeit noch nicht erreicht ist. Aus diesem Grund wird in [36],[37] zur Berechnung des Tragwiderstandes der Durchstanzbewehrung nur die Durchstanzbewehrung an der Innenseite des untersuchten Rundschnitts angesetzt. Wird im Rechenmodell davon ausgegangen, dass die gesamte Durchstanzbewehrung gleichmäßig beansprucht wird, kann der Traganteil der Durchstanzbewehrung am gesamten Durchstanzwiderstand überschätzt werden.

In Eurocode 2 wird stark vereinfachend die plastische Schubspannungsverteilung für die Momentenbeanspruchung mit der gleichförmigen Schubspannung aus der einwirkenden Stützenquerkraft superponiert (Bild 3-3). Im Unterschied zu ACI 318-02 tritt bei der plastischen Schubspannungsverteilung nach Eurocode 2 die maximale Schubspannung über eine größere Länge auf. Da die plastische Schubspannungsverteilung keine weiteren Umlagerungen ermöglicht, ist bei Erreichen der maximal zulässigen Schubspannung, die maximale Tragfähigkeit erreicht. In Anlehnung an Sherif sollte die Durchstanzbewehrung nur in dem Bereich des Rundschnitts angesetzt werden, in dem die maximale Schubspannung auftritt (Bild 3-3). Unter der Annahme, dass die Durchstanzbewehrung gleichmäßig längs der Rundschnitte verteilt ist, ergeben sich für den verbesserten Ansatz die in Tabelle 3-9 dargestellten Tragwiderstände. Bei einem Versagen am freien Rand wurde die Einfassungsbewehrung als Durchstanzbewehrung mit angesetzt. Man erkennt, dass sich bei gleichem Variationskoeffizienten von $\nu = 0,11$ ein deutlich höheres Sicherheitsniveau ergibt, das sich in einem Mittelwert von $\xi_m = 1,31$ darstellt.

In [39] wurde bei der Versuchsnachrechnung von Innenstützen festgestellt, dass der Durchstanzwiderstand der Durchstanzbewehrung nach Eurocode 2 zu groß ist. Aus diesem Grund wurde vorgeschlagen die Bewehrungsmengen der ersten beiden Bewehrungsreihen wie folgt zu erhöhen:

1. Bewehrungsreihe: $4,2 \cdot \left(\frac{d}{u_0} \right)^{0,4} \begin{cases} \geq 1,6 \\ \leq 3,0 \end{cases}$

2. Bewehrungsreihe: 1,4

Dieses Vorgehen führt zu den in der rechten Spalte von Tabelle 3-9 angegebenen Verhältniswerten. Der Mittelwert beträgt $\xi_m = 1,23$ und der Variationskoeffizient ergibt sich zu $\nu = 0,11$. Der hohe Mittelwert sowie der geringe Variationskoeffizient der Modellunsicherheiten weisen darauf hin, dass ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht wird.

Tabelle 3-9 Durchstanzwiderstand innerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches bei Ansatz der Durchstanzbewehrung in Anlehnung an Sherif [36],[37] und nach dem Vorschlag für das NAD

1	2	3	4	5	6
	v_{Test}				
Test	innen	außen	$v_{cs,mod}$	$v_{Test}/v_{cs,mod}$	$v_{Test}/v_{cs,NAD}$
[-]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[-]	[-]
S2	2,13	0,42	1,96	1,08	1,09
SC-1	2,16	0,36	1,89	1,15	1,14
SC-2	2,43	0,38	1,88	1,29	1,26
SC-3	2,56	-1,12	1,89	1,36	1,35
SC-4	2,71	-1,26	1,92	1,41	1,38
R3	0,81	2,33	1,54	1,51	1,42
R4	0,85	2,13	1,46	1,46	1,38
RSO1	0,98	2,04	1,65	1,23	1,19
RSO4	1,96	1,57	1,67	1,17	1,13
RSO7n	1,71	2,37	1,65	1,44	1,01

v_{Test} : im Versuch erreichte Schubspannung bei Ansatz einer pseudoplastischen Schubspannungsverteilung nach Eurocode 2; $v_{cs,mod}$: modifizierter Durchstanzwiderstand innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs; $v_{cs,NAD}$: Vorschlag für den Durchstanzwiderstand innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs
 $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Versagen außerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches

Da die Regelungen zur Nachweisschnittführung für den äußeren Rundschnitt identisch sind mit denen in DIN 1045-1, besteht der Unterschied nur in der Reduktion der mehraxialen Tragfähigkeit in DIN 1045-1 mit zunehmendem Abstand vom Stützenrand. Während in Eurocode 2 mit einem konstanten Vorfaktor $C_{Rd,c}$ von $0,18/\gamma_c$ im gesamten Durchstanzbereich gerechnet wird, sinkt der Vorfaktor in DIN 1045-1 mit zunehmendem Abstand von der Stütze von $0,21/\gamma_c$ auf $0,15/\gamma_c$.

Ein Versagen außerhalb des schubbewehrten Bereiches kann analog dem Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung analysiert werden. Es wird dabei anstelle des kritischen Rundschnitts ein

Umfang außerhalb des schubbewehrten Bereiches verwendet. In Bild 3-15 ist der auf den kritischen Rundschnitt bezogene äußere Rundschnitt geteilt durch den Lasterhöhungsfaktor β über dem bezogenen Abstand vom Stützenrand aufgetragen. Im linken Diagramm ist das Ergebnis der Auswertung nach Eurocode 2 dargestellt und zum Vergleich im rechten Diagramm die Auswertung nach ACI 318-02. Bei einer bezogenen Ausmitte e/c größer als Null weisen die Kurven einen Knick auf und zeigen nach dem Knick einen abfallenden Verlauf. Mit zunehmender Ausmitte e/c wird dieses Verhalten noch ausgeprägter.

Im Gegensatz zu Innenstützen entfernt sich bei Randstützen die Schwerelinie des kritischen Rundschnitts immer weiter vom Schwerpunkt der Stütze. Ab einer bestimmten Größe des Rundschnitts wird das auf die Schwerelinie bezogene Moment M_{Sl} gleich Null oder wechselt sogar das Vorzeichen. Dadurch addieren sich am freien Rand die Spannungen aus Querkraft und Moment, so dass die maßgebende Spannung am freien Rand auftritt (Bild 3-3). Aus Bild 3-15 folgt, dass eine Verlängerung des durchstanzbewehrten Bereiches nur solange zu einer Verminderung der Schubspannung im kritischen Rundschnitt führt bis die maßgebende Schubspannung am freien Rand auftritt. Eine Verlängerung des durchstanzbewehrten Bereiches über diese Grenze hinaus führt zu keiner signifikanten Verminderung der maßgebenden Schubspannung.

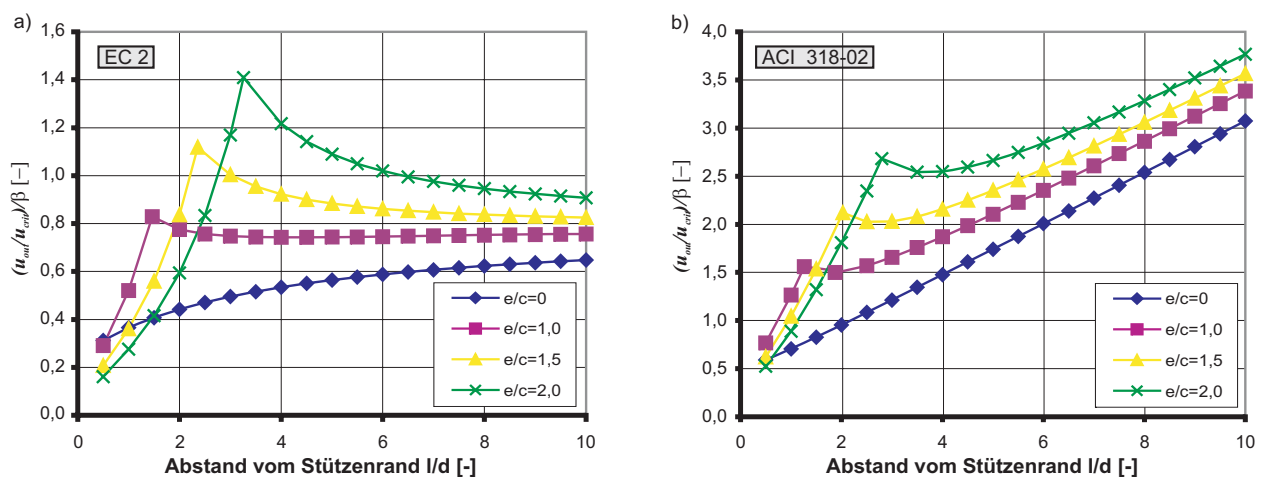


Bild 3-15: Bezogener Umfang des äußeren Rundschnittes aufgetragen über den bezogenen Abstand vom Stützenrand l/d

In Tabelle 3-10 wird der Durchstanzwiderstand im äußeren Rundschnitt nach Eurocode 2 mit zwei Versuchen verglichen, die in der Literatur mit einem eindeutigen Versagen außerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches klassifiziert wurden. Der Bemessungsansatz errechnet für die beiden Versuche sehr konservative Widerstände. Bei Randstützen klingt der β -Faktor nach Eurocode 2 mit zunehmendem Abstand vom Stützenrand nicht ab, sondern nimmt sogar noch leicht zu (Bild 3-15). Um nicht zu konservative Durchstanzwiderstände zu ermitteln, sollte für den Nachweis im äußeren Rundschnitt auch der β -Faktor des kritischen Rundschnitts verwendet werden. Es ergeben sich dann deutlich kleinere Quotienten V_{Test} zu V_{Norm} von 0,97 für Versuch P11B und 1,25 für den eigenen Versuch R2. Der Versuch P11B wird in der Literatur als ein eindeutiges Versagen außerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches beschrieben und auch die Bruchbilder deuten daraufhin [34]. Die Durchstanzbewehrung bestand jedoch aus sieben Reihen, so dass der durchstanzbewehrte Bereich relativ lang war. Es ist damit zu rechnen, dass die Bruchzone durch die äußere Lasteinleitung beeinflusst war und sich somit möglicherweise nicht der gesamte Durchstanzwiderstand ausbilden konnte.

Tabelle 3-10 Schubspannungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit bei einem Versagen außerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches

Test	$c_1=c_2$	d	f_c	$\rho_{l,EC}$	l_s	V_{Test}	M_{Test}	M_{Sl}/V_{Test}	v_{Test}		$v_{c,out}$	$v_{Test}/v_{c,out}^{1)}$	$v_{Test}/v_{c,out,\beta}^{2)}$
									innen	außen			
P11B	250	149	29,9	2,28	0,63	479	91,2	-403	-0,37	2,25	1,34	1,67	0,97
R2	300	185	30,3	0,88	0,39	524	83,0	-326	-0,01	1,90	1,03	1,85	1,25

¹⁾: mit β nach EC 2 für den äußeren Rundschnitt; ²⁾: mit β des kritischen Rundschnitts
 c_1 : Stützenseitenlänge senkrecht zum freien Rand; c_2 : Stützenseitenlänge parallel zum freien Rand; d : statische Nutzhöhe; f_c : Zylinderdruckfestigkeit des Betons; $\rho_{l,EC}$: mittlerer Bewehrungsgrad innerhalb eines Bereiches der Stütze zuzüglich $3d$ je Seite; l_s : Länge des durchstanzbewehrten Bereiches; V_{Test} : Bruchlast; M_{Test} : Bruchmoment; M_{Sl} : auf die Schwerlinie des kritischen Rundschnitts bezogenes Moment; v_{Test} : Schubspannung längs des kritischen Rundschnitts; $v_{c,out}$: rechnerisch aufnehmbare Schubspannung im äußeren Rundschnitt nach Eurocode 2; $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Versuchsnachrechnungen ohne Berücksichtigung der Versagensart

Zur Bewertung der Güte der oben beschriebenen Bemessungsgleichungen wurden 19 Durchstanzversuche im Bereich von Randstützen mit Durchstanzbewehrung unabhängig von der im Versuch beobachteten Versagensart nachgerechnet. Bei der Auswertung wurde die in Eurocode 2 angegebene plastische Schubspannungsverteilung verwendet. Weiterhin wurden die in [39] angegebenen Empfehlungen berücksichtigt und der Nachweis für ein Versagen außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs mit dem Lasterhöhungsfaktor des kritischen Rundschnitts geführt. Die empfohlenen Bemessungsgleichungen berücksichtigen den Einfluss des Stützensumfangs, die Kapazität der Bügel und die bezogene Ausmitte e/c nahezu trendfrei (Bild 3-16). Mit zunehmender Länge des durchstanzbewehrten Bereichs ermitteln die Gleichungen geringere Tragfähigkeiten. Bei der Nachrechnung von Ausschnittversuchen ist jedoch zu beachten, dass der Versagenskegel außerhalb der Bügelbewehrung in den Bereich der Lasteinleitung hineinreichen kann. Hierdurch entsteht eine negative Beeinflussung der Ergebnisse. Insgesamt ergibt die Auswertung der Versuche mit den angepassten Gleichungen nach Eurocode 2 einen Mittelwert von $\xi_m = 1,25$ bei einer relativ geringen Streuung, die zu einem Variationskoeffizienten von $v_\delta = 0,13$ führt. Aus Tabelle 3-11 kann entnommen werden, dass von den drei Möglichkeiten in Eurocode 2 zur Ermittlung des Lasterhöhungsfaktors β nur das genaue Verfahren unter Verwendung einer plastischen Schubspannungsverteilung ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht. Die konstanten β -Faktoren entsprechend DIN 1045-1 erreichen ebenfalls nicht das erforderliche Sicherheitsniveau. Die Lasterhöhungsfaktoren nach Heft 525 erreichen bei etwas größerer Streuung ein höheres Sicherheitsniveau als das genaue Verfahren nach Eurocode 2.

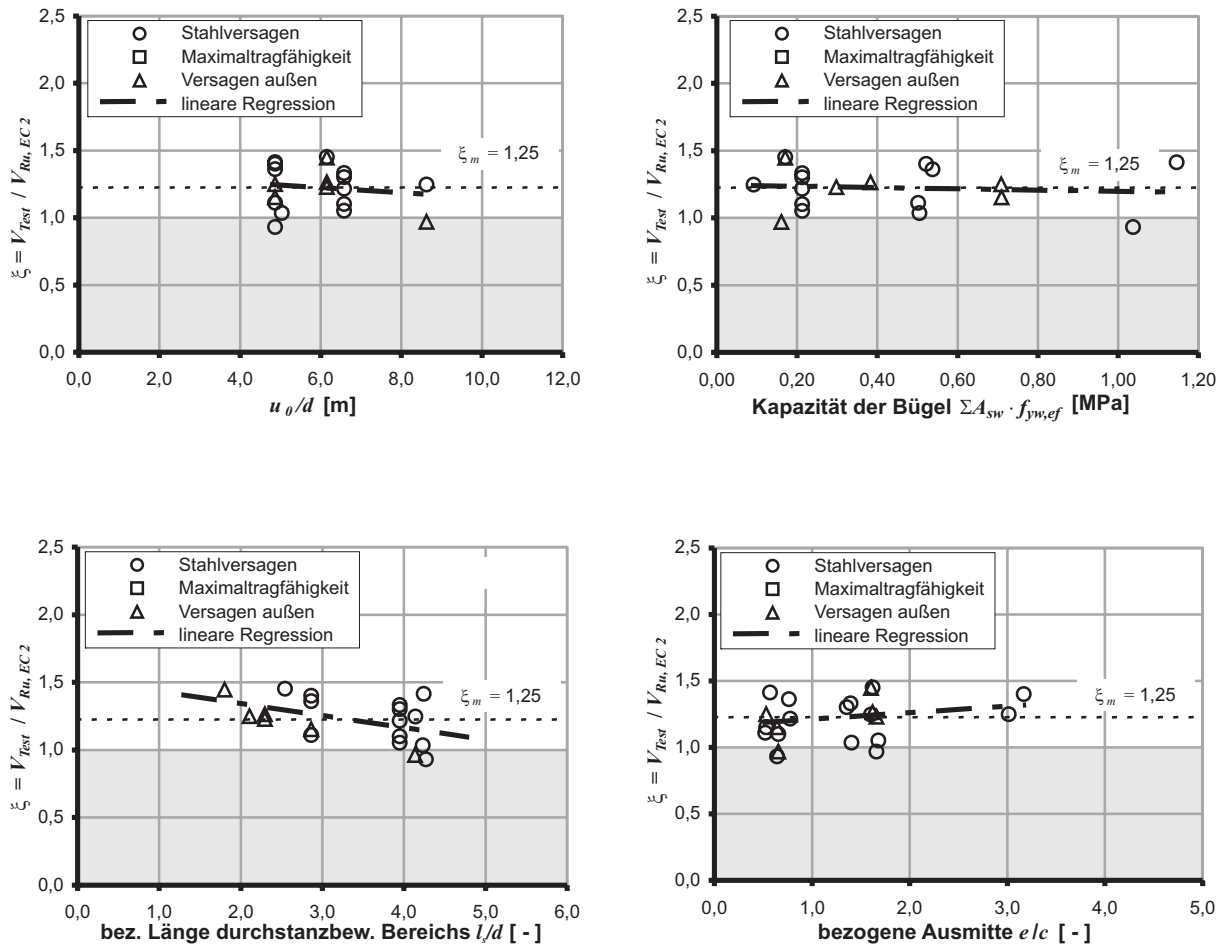


Bild 3-16 Vergleich der empfohlenen Bemessungsgleichungen nach Eurocode 2 mit 19 Durchstanzversuchen an Randstützen mit Durchstanzbewehrung, $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$

Tabelle 3-11 Statistische Kennwerte der Versuchsnachrechnungen von Randstützenversuchen mit Durchstanzbewehrung (ln-normalverteilt, $f_{ck} = f_{c,Test} - 4$)

Norm	Anzahl	statistische Kennwerte		
	n	ξ_m	v_δ	$\xi_{5\%}$
DIN 1045-1	19	1,24	0,35	0,63
DIN 1045-1/Heft 525	19	1,72	0,15	1,30
EC 2 (genaues Verfahren, NAD)	19	1,25	0,13	0,99
EC 2 (verkürzter Rundschnitt, NAD)	19	1,02	0,35	0,52
EC 2 (konstante β -Faktoren, NAD)	19	1,11	0,31	0,63

3.10.6 Empfehlungen für ein Nationales Anwendungsdokument

Das in Eurocode 2 enthaltene genauere Berechnungsverfahren ist grundsätzlich zur Ermittlung des Durchstanzwiderstandes von Stahlbetonplatten ohne Durchstanzbewehrung im Bereich von Randstützen geeignet. Das vereinfachte Verfahren mit verkürztem Rundschnitt erreicht dagegen nicht das erforderliche Sicherheitsniveau und weist sogar eine größere Streuung auf als bei Ansatz von konstanten Lasterhöhungsbeiwerten. Es wird daher empfohlen das Verfahren mit verkürztem Rundschnitt in Deutschland nicht anzuwenden. Falls das nicht möglich sein sollte, wird empfohlen einen separaten $C_{Rd,c}$ -Faktor anzugeben, der das Sicherheitsniveau des Verfahrens mit verkürztem Rundschnitt auf das geforderte Niveau anhebt. Es ist jedoch anzumerken, dass bei diesem Vorgehen aufgrund der großen Streuung die Wirtschaftlichkeit deutlich reduziert wird. Weiterhin wird empfohlen für Randstützen ohne Durchstanzbewehrung die β -Faktoren nach [24],[25] in ein zukünftiges DAfStb-Heft 6xx aufzunehmen. Der Ansatz nach [24],[25] erreicht das Sicherheitsniveau nach Eurocode und führt aufgrund seines niedrigen Variationskoeffizienten zu einer wirtschaftlichen Bemessung. Außerdem ist der Rechenaufwand deutlich geringer verglichen mit dem genaueren Verfahren nach Eurocode 2, das eine aufwendige Berechnung der Schubspannungsverteilung erfordert.

Die Bemessungsgleichungen in Eurocode 2 für das Durchstanzen im Bereich von Randstützen mit Durchstanzbewehrung erreichen nicht das nach Eurocode [8] erforderliche Sicherheitsniveau. Mit den Änderungsvorschlägen aus [39] wird ein ausreichendes Sicherheitsniveau bei der Verwendung des genauen Verfahrens zur Ermittlung des Lasterhöhungsfaktors erreicht.

4 Zusammenfassung

Eine ungleichmäßige Querkraftverteilung im Durchstanzbereich, die bei der gleichzeitigen Übertragung eines Biegemomentes und einer Querkraft auftritt, führt zu reduzierten Durchstanztragfähigkeiten. Da die Bemessungsgleichungen zum Durchstanzen in der Regel an rotationssymmetrisch belasteten Innenstützen hergeleitet wurden, ist der Einfluss der ungleichmäßigen Querkraftverteilung adäquat zu berücksichtigen. Hierzu geben die Normen Eurocode 2, DIN 1045-1 und Heft 525 unterschiedliche Verfahren an, die anhand von Vergleichsrechnungen überprüft wurden. In diesem Bericht werden zunächst die Regelungen der beiden Normen gegenübergestellt (Kapitel 2) und die Bemessungsgleichungen durch Vergleichsrechnungen und Nachrechnungen von Versuchen an Randstützen und Innenstützen mit Momentenbeanspruchung auf ihr Sicherheitsniveau hin überprüft (Kapitel 3). Im Falle eines nicht ausreichenden Sicherheitsniveaus werden Änderungsvorschläge angegeben. Hierbei wird auf die Ergebnisse der Vergleichsrechnungen von Versuchen an Innenstützen zurückgegriffen.

Es zeigt sich, dass das genaue Verfahren nach Eurocode 2 unter Ansatz einer plastischen Schubspannungsverteilung für Randstützen und Innenstützen mit Momentenbeanspruchung ein ausreichendes Sicherheitsniveau erreicht. Das Verfahren mit verkürztem Rundschnitt erreicht nicht das nach Eurocode geforderte Sicherheitsniveau und sollte demnach in Deutschland nicht angewendet werden. Das Verfahren nach Heft 525 berücksichtigt wie das genaue Verfahren nach Eurocode 2 explizit die Momentenbeanspruchung, liefert allerdings deutlich auf der sicheren Seite liegende und damit teilweise unwirtschaftliche Ergebnisse. Demgegenüber können pauschale Lasterhöhungsfaktoren nur für geringe Momentenbeanspruchungen ausreichende Sicherheiten liefern. Da die Versuchsdatenbank jedoch auch Versuche mit großen bezogenen Ausmitten enthält, erreichen die pauschalen Lasterhöhungsbeiwerte erwartungsgemäß teilweise nicht das erforderliche Sicherheitsniveau.

Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau; Berlin: Beuth 2005.
- [2] DIN 1045-1: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion, Juli 2001.
- [3] Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Grundlagen und Anwendungsregeln für den Hochbau; DIN V ENV 1992-1-1, Juni 1992.
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Erläuterungen zu DIN 1045-1. Heft 525, 2003
- [5] Hegger, J.; Beutel, R.: Hintergründe und Anwendungshinweise zur Durchstanzbemessung nach DIN 1045-1 (Teile 1 und 2). Bauingenieur, Band 77, Seiten 535-549, November 2002.
- [6] Committee Euro-International du Beton: CEB-FIP Model Code 1990: Design Code. Thomas Telford, 1993.
- [7] Mast, P. E.: Stresses in flat plates near columns. ACI Structural Journal 67 (1970) 761-768.
- [8] DIN EN 1990: Eurocode – Grundlagen der Tragwerksplanung. Berlin: Beuth 2002.
- [9] DIN 1055-100: Einwirkungen auf Tragwerke. Teil 100: Grundlagen der Tragwerksplanung, Sicherheitskonzept und Bemessungsregeln, März 2001.
- [10] Kennedy, G.; Goodchild, C.: Practical Yield Line Design. British Cement Association, 2003.
- [11] Tue, N. V.: Statistische Auswertung der Betonqualität – Folgerungen für die Bauwerkssicherheit. Kongressunterlagen 51. Betontage Ulm, Februar 2007 90-91.
- [12] Joint Committee on Structural Safety: First order reliability concepts for design codes, documentation. CEB-Bulletin d'Information No. 112, Juli 1976.
- [13] König, G.; Hosser, D.; Schobbe, W.: Sicherheitsanforderungen für die Bemessung von baulichen Anlagen nach den Empfehlungen des NABau – eine Erläuterung. Bauingenieur 57 (1982) 69-78.
- [14] König, G.; Hosser, D.: Praktische Beispiele und Hinweise zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für baulische Anlagen nach den Empfehlungen des NABau. Bauingenieur 57 (1982) 459-467.
- [15] Joint Committee on Structural Safety: Probabilistic Model Code (12th Draft). <http://www.jcss.ethz.ch/> (2001).
- [16] Ditlevsen, O.; Madsen, H. O.: Structural Reliability Methods. <http://www.mek.dtu.dk>, Juli 2005.
- [17] Kordina, K.: Zum Tragsicherheitsnachweis gegenüber Schub, Torsion und Durchstanzen nach EC 2, Teil 1 – Erläuterungen zur Neuauflage von Heft 425 und Anwendungsrichtlinie zu EC 2. Beton- und Stahlbetonbau 89 (1994) 97-100.

- [18] Hegger, J.; Beutel, R.: Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen; Schlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 10644N. RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, 1998.
- [19] Beutel, R.: Durchstanzen schubbewehrter Flachdecken im Bereich von Innenstützen. Aachen: Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen 2003.
- [20] Hegger, J.; Beutel, R.; Häusler, F.: Überprüfung der Regelungen zur Ermittlung des maximalen Durchstanzwiderstandes von schubbewehrten Platten nach Eurocode 2 (prEN 1992-1-1). Institutsbericht 142/2005, Institut für Massivbau der RWTH Aachen, 2006.
- [21] Nölting, D.: Durchstanzbemessung bei ausmittiger Stützenlast. Beton- und Stahlbetonbau 96, 2001, Heft 8.
- [22] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Tragfähigkeit durchstanzgefährdeter Stahlbetonplatten – Entwicklung von Bemessungsvorschlägen. Heft 371, 1986.
- [23] Regan, P. E.: Ultimate Limit State Principles. fib-Bulletin 2: Structural Concrete. Volume 2. Juli 1990.
- [24] Tuchlinski, D.: Zum Durchstanzen von Flachdecken unter Berücksichtigung der Momenten-Querkraft-Interaktion und der Vorspannung. Aachen: Dissertation, Lehrstuhl und Institut für Massivbau, RWTH Aachen 2005.
- [25] Hegger, J.; Tuchlinski, D.: Zum Durchstanzen von Flachdecken unter Berücksichtigung der Momenten-Querkraft-Interaktion und der Vorspannung. Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) 742-753.
- [26] Vocke, H.: Zum Durchstanzen von Flachdecken im Bereich von Rand- und Eckstützen. Stuttgart: Dissertation, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart 2002.
- [27] Zilch, K.; Hammelehle, G.: Überarbeitung bzw. Ergänzung der Nachweisformate des Eurocode 2 Teil 1 prEN 1992-1 hinsichtlich Durchstanzen mit erweiterten Randbedingungen. Abschlussbericht zum DIBt-Vorhaben ZP 32-5-7.222-1046/03. München 2006.
- [28] Zaghlool, E. R. F.: Strength and behaviour of corner and edge column-slab connections in reinforced concrete flat plates. Calgary, Canada: Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, The University of Calgary 1971.
- [29] Mortin, J. D.; Ghali, A.: Connection of flat plates to edge columns. ACI Structural Journal 88 (1991) 191-198.
- [30] Lim, F. K.; Rangan, B. V.: Studies on Concrete Slabs with Stud Shear Reinforcement in Vicinity of Edge and Corner Columns. ACI Structural Journal 92. (1995) 515-525.
- [31] Sherif, A. G.; Dilger, W. H.: Tests of Full-Scale Continuous Reinforced Concrete Flat Slabs. ACI Structural Journal 97 (2000) 455-467.
- [32] El-Salakawy, E. F.; Polak, M. A.; Soliman, M. H.: Reinforced concrete slab-column edge connections with shear studs. Canadian Journal of civil Engineering 27 (2000) 338-348.
- [33] Andrä, H.-P.: Zum Tragverhalten von Flachdecken mit Dübelleisten-Bewehrung im Auflagerbereich. Beton- und Stahlbetonbau 76 (1981) 53-57, 100-104.
- [34] Brändli, W.; Müller, F. X.; Thürlimann, B.: Bruchversuche an Stahlbeton- und Spannbetonplatten bei Rand- und Eckstützen. Versuchsbericht Nr. 7305-4, Institut für Baustatik und Konstruktion, ETH Zürich. Basel, Stuttgart: Birkhäuser 1982.

- [35] Hegger, J.; Ricker, M.; Häusler, F.: Versuchsbericht zum Durchstanzen und räumlichen Querkraftversagen von querkraftbewehrten Randstützen. Versuchsbericht zum DFG-Vorhaben He 2637/5-3. Aachen 2006.
- [36] Sherif, A. G.; Dilger, W. H.: Critical review of the CSA A23.3-94 punching shear strength provisions for interior columns. Canadian Journal of Civil Engineering 23 (1996) 998-1011.
- [37] Sherif, A. G.: Behaviour of reinforced concrete flat slabs. Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering. The University of Calgary 1996.
- [38] Zaghlool, E. R. F.; de Paiva, H. A. R.; Glockner, P. G.: Tests of reinforced concrete flat plate floors. ASCE Journal of the Structural Division 96 (1970) 487-506.
- [39] Hegger, J.; Ricker, M.; Häusler, F.: Hintergrundbericht – Durchstanzen nach Eurocode 2. Institutsbericht 173/2006, Institut für Massivbau der RWTH Aachen, 2007