

Durchstanzen von Flachdecken nach NA(D) zu Eurocode 2

C. Siburg, F. Häusler, J. Hegger

216

Stahlbetonbau • Durchstanzen • Normen

Zusammenfassung Zum 01. Juli 2012 wird Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) zusammen mit dem Nationalen Anhang in Deutschland (NA(D)) bauaufsichtlich eingeführt und ist ab diesem Zeitpunkt für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen bindend. In DIN EN 1992-1-1 wird der Durchstanznachweis im Vergleich zu DIN 1045-1 neu geregelt. Vergleiche mit experimentellen Untersuchungen und Parameterstudien zeigen allerdings, dass die Durchstanznachweise nach DIN EN 1992-1-1 das geforderte und nach DIN 1045-1 bekannte Sicherheitsniveau teilweise signifikant unterschreiten. Um dennoch eine sichere Bemessung zu erreichen, wurden die Bemessungsgleichungen von DIN EN 1992-1-1 im Nationalen Anhang für Deutschland überarbeitet und angepasst. Dieser Beitrag stellt die Durchstanzbemessung nach DIN EN 1992-1-1 zusammen mit den Regelungen des nationalen Anhangs vor und erläutert Hintergründe zur Durchstanzbemessung.

Flat slab punching design according to german annex of Eurocode 2

Abstract Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) in combination with the national Annex for Germany (NA(D)) will be introduced by the 1st of July 2012. From this point onwards, it will be obligatory for the design of reinforced concrete components. Compared to the present German Code DIN 1045-1, the punching shear analysis has been reorganized. Comparisons with experimental investigations and parameter studies reveal that the punching shear design defined in DIN EN 1992-1-1 does not comply the safety level required and known from DIN 1045-1. The design equations in DIN EN 1992-1-1 have been revised and readjusted in the national Annex for Germany to achieve a sufficient reliability. This paper introduces the punching shear design according to DIN EN 1992-1-1 and the national Annex for Germany as well as comments on the background of punching shear design.

Dipl.-Ing. Carsten Siburg
Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger
Lehrstuhl und Institut für Massivbau
RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Str. 1
52074 Aachen
Dr.-Ing. Frank Häusler
Halfen GmbH
Gruppenleiter Verankerungstechnik,
Montagesysteme
Liebigstraße 14
40764 Langenfeld

1 Einleitung

Mit der bauaufsichtlichen Einführung von DIN EN 1992-1-1 [1] einschließlich des Nationalen Anhangs [2] in Deutschland wird die Durchstanzbemessung zum Stichtag 01.07.2012 neu geregelt. Im Vorfeld der Einführung wurden zahlreiche Untersuchungen zu den Regelungen der DIN EN 1992-1-1 im Vergleich zu DIN 1045-1 [3] durchgeführt, insbesondere zum Durchstanzen. Anhand von Versuchsauswertungen und Parameterstudien wurde festgestellt, dass die neuen Regelungen zum Durchstanzen das geforderte Sicherheitsniveau teilweise deutlich unterschreiten und eine Anpassung erfordern [4]–[9]. Die für das erforderliche Sicherheitsniveau notwendigen Änderungen im NA(D) werden im Einzelnen vorgestellt und erläutert.

2 Durchstanznachweis nach DIN EN 1992-1-1 und NA(D)

2.1 Allgemeines

In Durchstanzversuchen sind unterschiedliche Versagensmechanismen zu beobachten, die sich grundsätzlich in ein Versagen ohne (Bild 1, (a)) und mit Durchstanzbewehrung einteilen lassen. Mit Durchstanzbewehrung ist zwischen einem Versagen innerhalb (b) oder außerhalb der Durchstanzbewehrung (c) und auf dem Niveau der Maximaltragfähigkeit am Stützenanschnitt (d) zu unterscheiden. Wie in DIN 1045-1 wird in DIN EN 1992-1-1 jeder Versagensart eine eigene Bemessungsgleichung zugeordnet.

Zur Ermittlung des Durchstanzwiderstandes von Flachdecken existiert derzeit kein allgemeingültiger theoretischer Lösungsansatz. Auch physikalische Modelle wie z. B. [10] [11][12] benötigen empirisch bestimmte Anpassungsfaktoren. Die Bemessungsregeln gegen Durchstanzen nach DIN EN 1992-1-1 und die Anpassungen im NA(D) basieren daher wie auch nach DIN 1045-1 auf halbempirischen Modellen, die aus Versuchen an Deckenausschnitten hergeleitet wurden.

2.2 Rundschnitte

Der Nachweis der aufnehmbaren Querkraft erfolgt nach DIN EN 1992-1-1 längs festgelegter Rundschnitte über Schubspannungen. Grundsätzlich ist für die Fläche in jedem Rundschnitt ($u \cdot d$) nachzuweisen, dass die einwirkende Schubspannung v_{Ed} den Widerstand v_{Rd} nicht überschreitet. Der kritische Rundschnitt u_1 für runde oder rechteckige Lasteinleitungsflächen, die sich nicht in der unmittelbaren Nähe von freien Rändern befinden, umfahren die Lasteinleitungsfläche in einem Abstand von $2,0d$ (Bild 2), mit d der statischen Nutzhöhe der Platte.

Zur Abgrenzung gegenüber der Querkraftbemessung wird der Umfang der Lasteinleitungsfläche für den anrechenbaren Durchstanzwiderstand im Deutschen Anhang auf $u_0 \leq 12d$ begrenzt und ist damit gegenüber DIN 1045-1 leicht

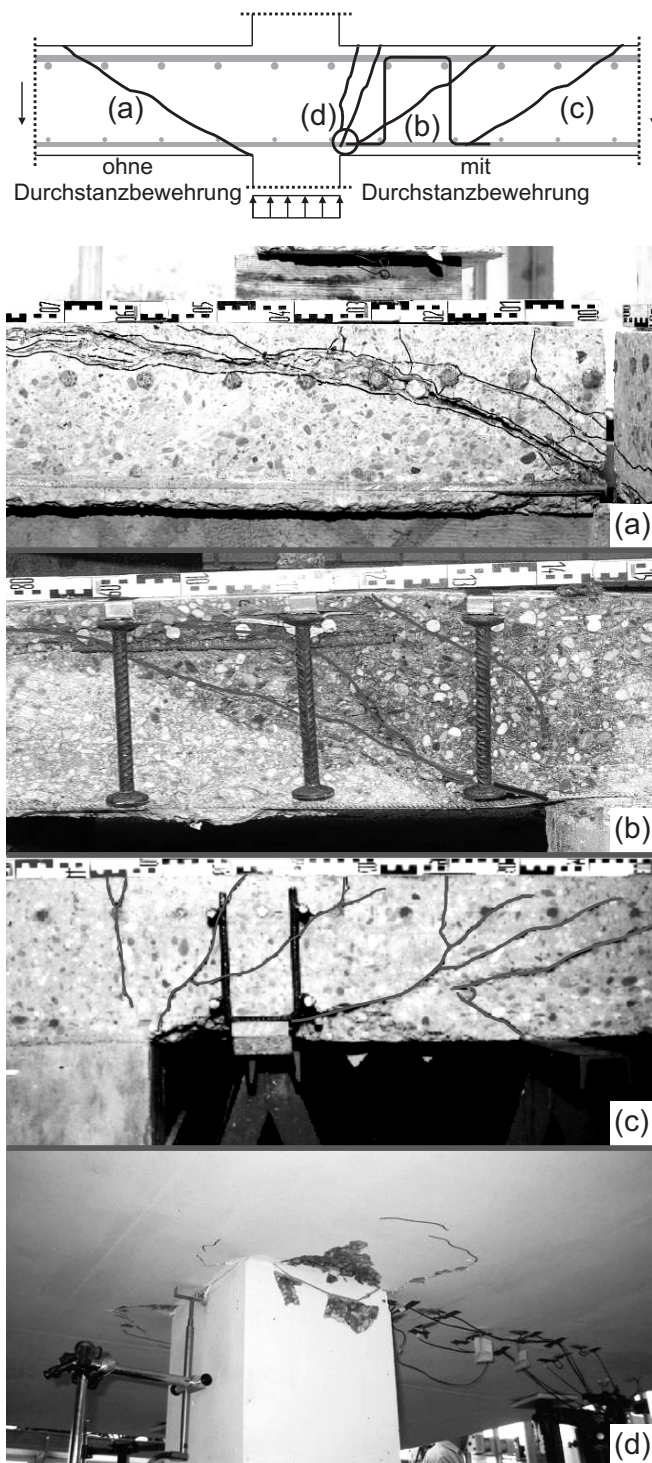


Bild 1. Prinzipskizze und Sägeschnitte der Durchstanzversagensarten (a) ohne Durchstanzbewehrung; (b) innerhalb und (c) außerhalb der Durchstanzbewehrung, (d) Maximaltragfähigkeit

Fig. 1. Cross sections after failure with critical shear cracks (a) without punching shear reinforcement, (b) inside shear reinforcement, (c) outside, (d) maximum punching resistance

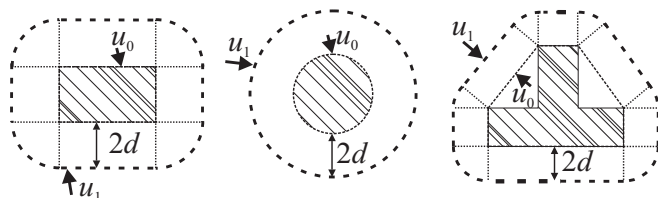
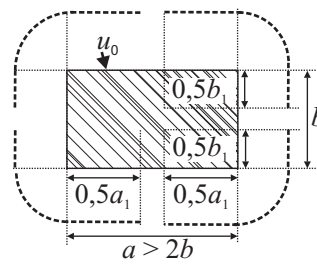


Bild 2. Rundschnitte u_0 und u_1 bei unterschiedlicher Stützensgeometrie
Fig. 2. Perimeters u_0 and u_1 for different column sections



$$b_1 = \min\{b; 3d\}$$

$$a_1 = \min\{a; 2b; 6d - b_1\}$$

Bild 3. Rundschnitt bei ausgedehnten Lasteinleitungsflächen

Fig. 3. Critical perimeter for large columns

vergrößert ($u_0 \leq 11d$). Der Rundschnitt u_0 entspricht dem kürzesten Rundschnitt um die Lasteinleitungsfläche (Bild 2), deren Verhältnis von Länge zu Breite nicht größer als 2,0 werden darf. Für rechteckige Lasteinleitungsflächen mit $a > 2b$ gelten die Regelungen nach Bild 3. Außerhalb des kritischen Rundschnittes ist die Querkrafttragfähigkeit maßgebend. Die gesamte Querkrafttragfähigkeit bei großen Lasteinleitungsflächen ergibt sich aus der Summe der Traganteile aus Durchstanzen und Querkraft.

2.3 Nachweisverfahren

Nach DIN EN 1992-1-1 wird die maßgebende Einwirkung V_{Ed} entlang des betrachteten Rundschnitts u_i abweichend von DIN 1045-1 in eine Querkraft je Flächeneinheit (Schubspannung) umgerechnet:

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

Eine ausmittige Beanspruchung wird über einen Lasterhöhungsfaktor β berücksichtigt, der die Momenten-Querkraftinteraktion erfasst. DIN EN 1992-1-1 bietet neben konstanten Faktoren auch einen rechnerischen Ansatz mit einer vollplastischen Schubspannungsverteilung (Bild 4) und ein Verfahren mit verkürzten Rundschnitten an. Letzteres führt jedoch zu unsicheren Ergebnissen und darf in Deutschland nicht angewendet werden [2][8].

Für unverschiebliche Systeme mit Stützweitenverhältnissen zwischen $0,8 \leq l_1/l_2 \leq 1,25$ dürfen vereinfachend konstante Werte für β angenommen werden. Der konstante Lasterhöhungsbeiwert für Innenstützen ist in DIN EN 1992-1-1 mit $\beta = 1,15$ angegeben und wurde nach den Beratungen zum NA(D) auf $\beta = 1,10$ reduziert. Die übrigen Werte für Randstützen ($\beta = 1,40$), Eckstützen ($\beta = 1,50$), Wandenden ($\beta = 1,35$) und Wandecken ($\beta = 1,20$) wurden im NA(D) identisch zu den Lasterhöhungsbeiwerten aus DIN 1045-1 festgelegt. Zusätzlich wird im NA(D) für Randstützen mit einer bezogenen Ausmitte von $e/c \geq 1,2$ (hierin sind $e = M_{Ed}/V_{Ed}$ und c die Stützenabmessung parallel zur Ausmitte) gefordert, dass der Lasterhöhungsbeiwert mit einem genaueren Verfahren, wie zum Beispiel mit der vollplastischen Schubspannungsverteilung, zu ermitteln ist.

Das genauere Verfahren aus DIN EN 1992-1-1, das aus Model Code 1990 übernommen wurde, legt eine vollplastische Schubspannungsverteilung entlang des kritischen Rundschnitts zu Grunde (Bild 4). Die Wahl der Schubspannungsverteilung ist auf Mast [13] zurückzuführen, der mit der Elastizitätstheorie nachweisen konnte, dass sich die Schubspannungsverteilung nahe der Stütze einer vollplastischen Verteilung annähert.

Für eine rechteckige Lasteinleitungsfläche mit einachsiger Lastausmitte ergibt sich der Lasterhöhungsbeiwert β mit dem genaueren Verfahren zu:

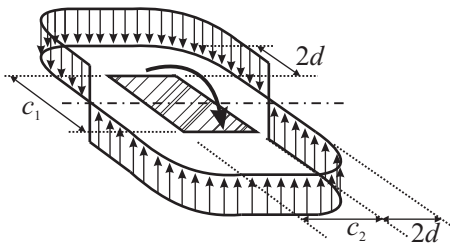


Bild 4. Vollplastische Schubspannungsverteilung nach DIN EN 1992-1-1

Fig. 4. Fully plastic shear distribution along critical section according DIN EN 1992-1-1

218

Tabelle 1. Werte für k bei rechteckigen Lasteinleitungsflächen
Table 1. Values of k for rectangular loaded areas

c_1/c_2	$\leq 0,5$	1,0	2,0	$\geq 3,0$
k	0,45	0,6	0,7	0,8

$$\beta = 1 + k \frac{M_{Ed}}{V_{Ed}} \cdot \frac{u_1}{W_1} \quad (2)$$

Hierbei gibt der Beiwert k in Abhängigkeit der Stützenabmessungen den Anteil des Momentes an, der zusätzliche Schubspannungen erzeugt (**Tabelle 1**). Der restliche Anteil $(1 - k)$ wird über Biegung und Torsion in die Stütze eingeleitet. Das von der Decke in die Stütze unter Berücksichtigung der Steifigkeiten eingeleitete Moment M_{Ed} ist auf die Schwerlinie des kritischen Rundschnitts zu beziehen und V_{Ed} ist die resultierende Deckenquerkraft. W_1 ist das Widerstandsmoment entlang des kritischen Rundschnitts u_1 und darf nach folgender Gleichung ermittelt werden:

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

Bei der Berechnung von W_1 ist für e die Entfernung von der Schwerlinie des kritischen Rundschnitts zum betrachteten Abschnitt dl des kritischen Rundschnitts einzusetzen. Für das Durchstanzen im Bereich von rechteckigen Innenstützen mit c_1 der Stützenabmessung parallel und c_2 senkrecht zur Lastausmitte ergibt sich W_1 zu:

$$W_1 = c_1^2 / 2 + c_1 c_2 + 4 c_2 d + 16 d^2 + 2 \pi d c_1 \quad (4)$$

Für Decken-Stützen-Knoten mit zweiachsiger Lastausmitte darf zur Bestimmung des Lasterhöhungsbeiwerts folgende Gleichung verwendet werden:

$$\beta = 1 + \sqrt{\left(k_x \frac{M_{Ed,x}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_{1,x}} \right)^2 + \left(k_y \frac{M_{Ed,y}}{V_{Ed}} \frac{u_1}{W_{1,y}} \right)^2} \quad (5)$$

Für Innenstützen mit Kreisquerschnitt (D ist der Durchmesser) folgt β aus der Gleichung:

$$\beta = 1 + 0,6 \pi \frac{e}{D + 4d} \quad (6)$$

Bei der Bestimmung des Widerstandsmoments von Rand- und Eckstützen ist zu beachten, dass sich die Schwerlinie des kritischen Rundschnitts in der Regel nicht über dem

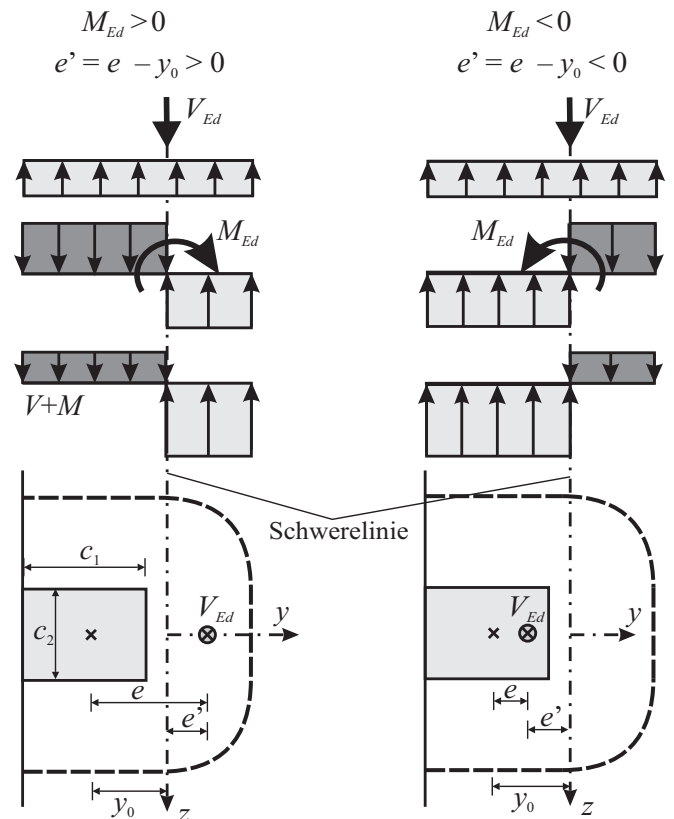


Bild 5. Plastische Spannungsverteilung in Abhängigkeit des Moments [7][8]
Fig. 5. Plastic shear distribution depending on the load eccentricity

Schwerpunkt des Stützenquerschnitts (Schnittpunkt der Stützenachsen) befindet [7][8]. Das von der Decke auf die Stütze übertragene Moment $M_{Ed,Stütze}$ ist daher auf die Schwerlinie des kritischen Rundschnitts zu beziehen (**Bild 5**) und ergibt sich zu $M_{Ed} = M_{Ed,Stütze} - V_{Ed} \cdot y_0$ (bzw. z_0). Der Abstand y_0 (bzw. z_0) ist die kürzeste Entfernung zwischen der Schwerlinie des kritischen Rundschnitts und dem Stützenschwerpunkt. Für betragsmäßig kleine Abstände y_0 (bzw. z_0) ergibt sich die größte Schubspannung an der Innenseite der Stütze in Bild 5, links. Wenn y_0 (bzw. z_0) so groß wird, dass M_{Ed} das Vorzeichen wechselt, tritt bei Randstützen die größte Schubspannung am freien Rand der Platte auf, d.h. die Ausmitte e' bezogen auf die Schwerlinie des kritischen Rundschnitts wird negativ. 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 1,0 ergibt.

Generell ist auch bei Anwendung des genaueren Verfahrens ein Mindestwert von $\beta \geq 1,10$ anzusetzen. Weitere Gleichungen für β -Faktoren und die Berechnung des Widerstandsmoments W_1 für Rand- und Eckstützen finden sich in [14].

Vergleich der β -Faktoren nach Heft 525 und DIN EN 1992-1-1

In Bild 6 sind die β -Faktoren in Abhängigkeit der bezogenen Ausmitte e/c für das Verfahren nach Heft 525 ($\beta = 1 + e/c$) und der plastischen Schubspannungsverteilung aus DIN EN 1992-1-1 für eine quadratische Randstütze mit einer Kantenlänge von $c = 0,50$ m, einem Deckenüberstand von $0,30$ m und einer statischen Nutzhöhe von $d = 0,25$ m dargestellt. Da nach dem Verfahren der plastischen Schubspannungsverteilung die maßgebende Schubspannung entweder am freien Rand der Platte oder am inneren Rand des kritischen Rundschnitts auftreten kann, stellt sich bei

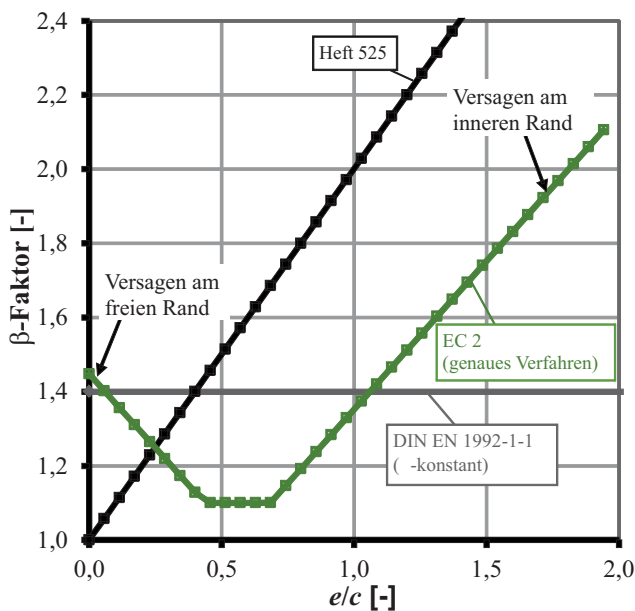


Bild 6. Vergleich von verschiedenen β -Faktoren in Abhängigkeit der bezogenen Ausmitte e/c

Fig. 6. Factor β accounting for the shear stress caused by moment transfer

einer bezogenen Ausmitte von $e/c < 0,45$ die betragsmäßig größte Spannung am freien Rand der Platte ein, während für $0,45 \leq e/c \leq 0,7$ der Mindestwert $\beta \geq 1,10$ nach NA(D) maßgebend wird. Bei Randstützen ist im Gegensatz zu Innenstützen infolge der nicht rotationssymmetrischen Plattenbiegung keine umlaufende Druckzone am Stützenanschnitt vorhanden, die einen traglaststeigernden mehraxialen Spannungszustand hervorruft [7]. Bei einer geringen Momentenbeanspruchung bildet sich an Randstützen noch keine ausreichend große Druckzone aus, sodass die Durchstanztragfähigkeit im Vergleich zu Innenstützen geringer ist und einen gegenüber Heft 525 vergrößerten Lasterhöhungsbeiwert rechtfertigt. Bei größeren bezogenen Ausmitten werden nach dem Verfahren mit der plastischen Schubspannungsverteilung deutlich kleinere Lasterhöhungsfaktoren als nach Heft 525 bestimmt. Der nach DIN EN 1992-1-1 höhere Aufwand zur Bestimmung des Widerstandsmoments entlang des kritischen Rundschnitts ist demnach gerechtfertigt, da gegenüber Heft 525 das Sicherheitsniveau entweder für kleine bezogene Ausmitten anzuheben war oder bei größeren Ausmitten eine wirtschaftlichere Bemessung ermöglicht wird.

Lasteinzugsflächen

Bei ungleichen Stützweiten oder unterschiedlichen Belastungen kann der Lasterhöhungsbeiwert einfach auf Grundlage von Sektormodellen bestimmt werden. Hierbei wird jeder Sektor (mindestens 3–4 Sektoren je Quadrant) separat nachgewiesen, in dem die jeweilige Lasteinzugsfläche des Sektormodells dem zugehörigen Abschnitt des kritischen Rundschnitts zugeordnet wird. Dadurch werden Abweichungen von einer rotationssymmetrischen Verteilung der Querkkräfte entlang des Rundschnitts bereits berücksichtigt. Wird für einen Sektor eine Durchstanzbewehrung erforderlich, so sollte in den übrigen Sektoren mindestens die Mindestdurchstanzbewehrung angeordnet werden. Alternativ zur sektorweisen Betrachtung kann auch für den gesamten Rundschnitt ein Lasterhöhungsfaktor mit $\beta = \max v_{Ed,i} / v_{Ed,m}$ bestimmt werden. Hierin sind $\max v_{Ed,i}$ die maximale Beanspruchung eines Rund-

schnittabschnitts aus einem Sektor und $v_{Ed,m}$ die mittlere einwirkende Schubspannung entlang des kritischen Rundschnitts.

Bei einer Ermittlung der Querkkräfte mit FE-Methoden ist stets zu beachten, dass die Lösung netz- und elementabhängig ist. Da in der Praxis üblicherweise gewählte Elementnetze nicht ausreichend engmaschig sind, um eine zutreffende Verteilung der Querkkräfte am Auflager zu ermitteln, empfiehlt es sich stattdessen mit Lasteinzugsflächen zu arbeiten [15].

3 Durchstanzwiderstand von Flachdecken

3.1 Allgemeines

Bei den Beratungen zum Nationalen Anhang von DIN EN 1992-1-1 stellte sich heraus, dass die Regelungen zum Durchstanzen teilweise erheblich von denen in DIN 1045-1 abweichen. Um das vorhandene Sicherheitsniveau zu beurteilen, wurden die Bemessungsgleichungen zum Durchstanzen anhand von Versuchsergebnissen oder Parameterstudien überprüft. In den Bemessungsgleichungen von DIN EN 1992-1-1 sind teilweise nationale Anpassungsfaktoren (NDP: national determined parameter) vorgesehen, um unterschiedliche klimatische Anforderungen oder Erfahrungen mit der Bemessungsgleichung oder das nationale Sicherheitsbedürfnis zu regeln. Darüber hinaus können zusätzliche Regeln und Empfehlungen angegeben werden, die allerdings nicht im Widerspruch zu DIN EN 1992-1-1 stehen dürfen (NCI: non-contradictory complementary information). Da beide Öffnungsklauseln zur Anpassung an das aus DIN 1045-1 bekannte Sicherheitsniveau nicht ausreichten, waren weitergehende Änderungen im Nachweiskonzept erforderlich.

3.2 Durchstanzwiderstand ohne Durchstanzbewehrung

In DIN EN 1992-1-1, Abschnitt 6.4.4 wird die Durchstanztragfähigkeit für Platten ohne Durchstanzbewehrung geregelt. Die Bestimmungsgleichung nach DIN EN 1992-1-1 (Gleichung 6.47) entspricht grundsätzlich der Gleichung (105) in DIN 1045-1. Unterschiede bestehen in den beiden Vorfaktoren $C_{Rd,c}$ und k_1 , die in DIN EN 1992-1-1 kleiner sind als in DIN 1045-1. Durch die unterschiedlichen Rundschnittlängen (DIN EN 1992-1-1 im Abstand $2,0d$, DIN 1045-1 im Abstand $1,5d$) ergeben sich jedoch etwa gleich große Widerstände. Für eine Anwendung in Deutschland wurde der auf die Querschnittsfläche (u_1d) des kritischen Rundschnitts bezogene Durchstanzwiderstand nach DIN EN 1992-1-1 übernommen:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k \left(100 \rho_l f_{ck} \right)^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \geq \left(v_{min} + k_1 \sigma_{cp} \right) \quad (7)$$

Der Vorfaktor $C_{Rd,c}$ ist für Flachdecken mit $0,18/\gamma_c$ anzusetzen. Für den Maßstabsfaktor $k = 1 + \sqrt{(200/d)} \leq 2,0$ ist d in [mm] anzugeben und der Längsbewehrungsgrad $\rho_l = \sqrt{(\rho_{ly} \rho_{lz})} \leq \min(0,02; 0,5 f_{cd}/f_{yd})$ ist auf einer Plattenbreite entsprechend der Stützenabmessung zuzüglich $3d$ je Seite zu ermitteln. Aufgrund der geringen Druckzonenhöhe ist eine Druckbewehrung bei Platten im Durchstanzbereich kaum oder gar nicht wirksam, daher wird im NA(D) eine zusätzliche Begrenzung des Längsbewehrungsgrades auf $0,5 f_{cd}/f_{yd}$ eingeführt. Mit dem empirischen Beiwert $k_1 = 0,10$ wird eine günstig wirkende Betonnormalspannung aus Vorspannung σ_{cp} erfasst. Die anrechenbare Druckspannung ist nach [31] zusätzlich auf $2,0 \text{ N/mm}^2$ zu begrenzen.

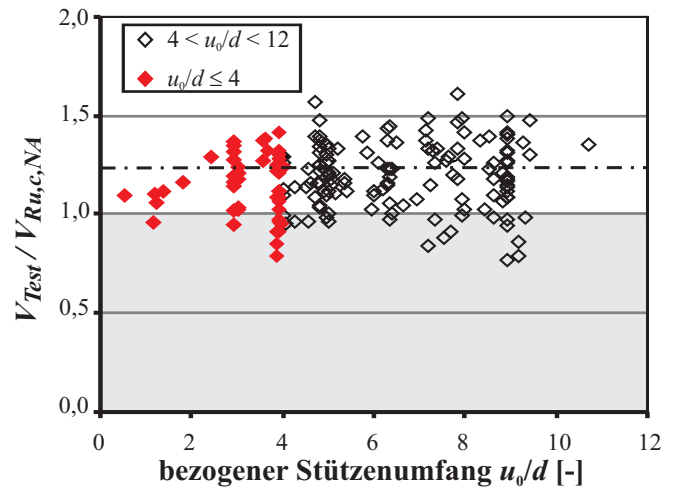
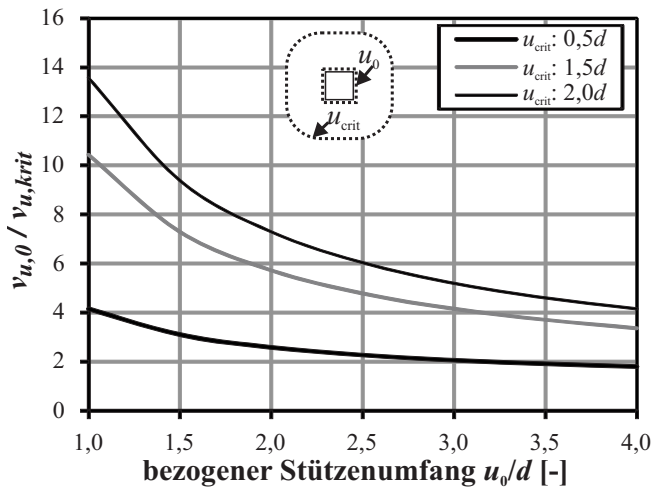


Bild 7. Verhältnis der Schubspannungen entlang des Stützenumfang $v_{u,0}$ und dem kritischen Rundschnitt $v_{u,krit}$ in Abhängigkeit des u_0/d Verhältnisses und der Entfernung des kritischen Rundschnitts zur Stütze

Fig. 7. Ratio of shear stresses at column perimeter and at different perimeters in dependence of the related column perimeter (left) and comparison of test results with the punching shear capacity without shear reinforcement according to the German annex of DIN EN 1992-1-1 (right)

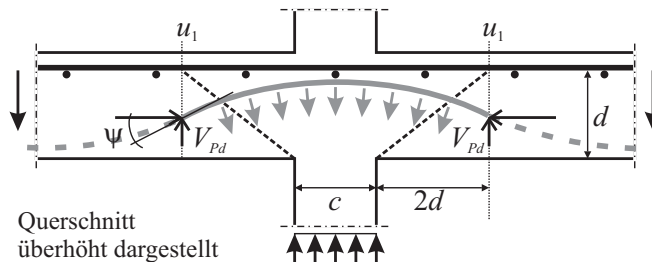


Bild 8. Berücksichtigung des Vertikalanteils aus Vorspannung nach DIN EN 1992-1-1

Fig. 8. Vertical component of the inclined tendons according DIN EN 1992-1-1

Im Unterschied zu DIN 1045-1 sind nach DIN EN 1992-1-1 für Druckspannungen positive Werte in σ_{cp} einzusetzen. Im Allgemeinen gilt $\gamma_c = 1,5$ für den Teilsicherheitsbeiwert des Beton.

Durch den im Abstand $2,0d$ angeordneten kritischen Rundschnitt ergeben sich besonders bei kleinen Stützenumfängen sehr große Beanspruchungen am Stützenrand, wie das Verhältnis von $v_{u,0}/v_{u,krit}$ in Bild 7, links, verdeutlicht. Je kleiner der bezogene Stützenumfang u_0/d wird, desto größer ist das Verhältnis aus Beanspruchung am Stützenrand $v_{u,0}$ zur Spannung im kritischen Rundschnitt $v_{u,krit}$. Dieser Effekt war bei früheren Normen mit kürzerem Abstand zum kritischen Rundschnitt nicht so ausgeprägt, sodass im NA(D) eine zusätzliche Beschränkung der Tragfähigkeit von Flachdecken bei kleinen u_0/d -Verhältnissen erforderlich ist [4]. Bei Verhältnissen $u_0/d < 4$ ist der Vorfaktor dann wie folgt zu modifizieren:

$$u_0/d \geq 4: C_{Rd,c} = 0,18/\gamma_c \quad (8)$$

$$u_0/d < 4: C_{Rd,c} = \frac{0,18}{\gamma_c} \left(0,1 \frac{u_0}{d} + 0,6 \right) \geq \frac{0,15}{\gamma_c}$$

Der Vergleich von Versuchsergebnissen mit dem Bemessungsansatz nach NA(D) in Abhängigkeit des Parameters u_0/d in Bild 7, rechts, belegt, dass die Reduzierung des Vorfaktors eine sichere Bemessung auch für kleine u_0/d -Verhältnisse ermöglicht.

Zusätzlich gilt die in DIN EN 1992-1-1 eingeführte Mindestquerkrafttragfähigkeit $v_{min} = (0,0525/\gamma_c)k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$. Im NA(D)

wurde die Anwendung der Mindestquerkrafttragfähigkeit auf statische Nutzhöhen mit $d \leq 600$ mm eingeschränkt und für statische Nutzhöhen von $d > 800$ mm auf $v_{min} = (0,0375/\gamma_c)k^{3/2}f_{ck}^{1/2}$ reduziert. Nach Vergleichsrechnungen werden bei kleinen Längsbewehrungsgraden und gleichzeitig höheren Betonfestigkeiten mit der Mindestquerkrafttragfähigkeit größere Tragfähigkeiten erzielt. Zwischenwerte dürfen interpoliert werden.

Bei Deckenplatten mit Vorspannung darf ein günstiger Einfluss der vertikalen Komponente V_{pd} von geneigten Spanngliedern, die die Querschnittsfläche des betrachteten Rundschnitts schneiden, berücksichtigt werden (Bild 8). Es dürfen jedoch nur die Spannglieder angerechnet werden, die innerhalb eines Abstandes bis maximal $0,5d$ vom Stützenrand angeordnet sind.

3.3 Durchstanzbewehrung in Flachdecken

In DIN EN 1992-1-1 wird die erforderliche Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung einmal im Rundschnitt u_1 (im Abstand $2,0d$) bestimmt und dann in allen weiteren Rundschnitten angeordnet, bis der Nachweis ohne Querkraftbewehrung außerhalb der Durchstanzbewehrung gelingt.

$$v_{Rd,cs} = 0,75v_{Rd,c} + 1,5(d/s_r)A_{sw}f_{ywd,ef}(1/u_1d)\sin \alpha \quad (9)$$

Hierin sind s_r der radiale Abstand der Durchstanzbewehrungsreihen und A_{sw} die Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung in einer Bewehrungsreihe um die Stütze. Durch Umstellen der Gleichung (9) ergibt sich die erforderliche Durchstanzbewehrung entlang des Rundschnitts zu:

$$A_{sw} = \frac{(v_{Ed} - 0,75v_{Rd,c})du_1}{1,5(d/s_r)f_{ywd,ef}\sin \alpha} \quad (10)$$

Da der Rundschnitt u_1 unverändert bleibt und nicht wie in DIN 1045-1 für jede Bewehrungsreihe neu bestimmt wird, ist nach DIN EN 1992-1-1 in jeder Reihe die gleiche Durchstanzbewehrungsmenge vorzusehen. Um die schlechtere Verankerung von Bügeln in dünnen Decken [16] zu berücksichtigen, ist der wirksame Bemessungswert

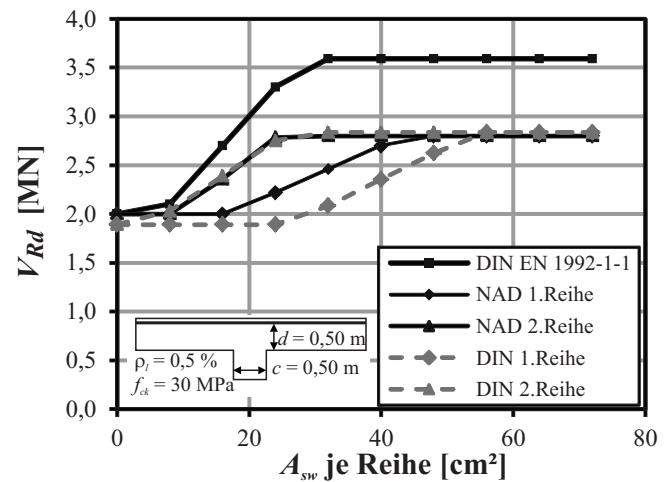
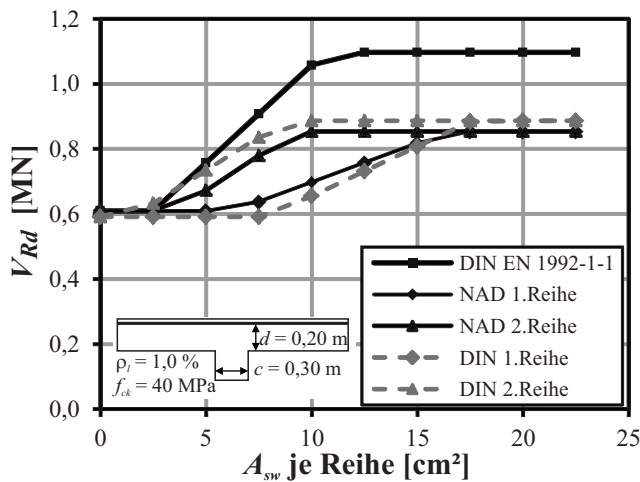


Bild 9. Vergleich der Durchstanzzlast in Abhängigkeit der Durchstanzbewehrungsmenge je Reihe
Fig. 9. Plots of punching shear resistance of flat slabs with shear reinforcement

der Streckgrenze des Bügels auf $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$ zu reduzieren. Außerdem ist der Bügeldurchmesser auf $d_s \leq 0,05d$ zu begrenzen. Der Betontraganteil für die Durchstanzbewehrung in Flachdecken $v_{Rd,c}$ wird nach Gleichung (7) bestimmt. Da der Einfluss einer Vorspannung auf die Durchstanztragfähigkeit mit Durchstanzbewehrung noch nicht abschließend geklärt ist, sollte der Vorwert zu $k_1 = 0,05$ angenommen werden [31].

Die Überprüfung von Gleichung (9) anhand von Versuchsergebnissen ergab, dass die erforderliche Durchstanzbewehrungsmenge nach DIN EN 1992-1-1 in den ersten beiden Rundschnitten unterschätzt wird. Im Vergleich dazu wird die nach DIN 1045-1 erforderliche Durchstanzbewehrungsmenge analog zur einwirkenden Schubkraft mit größerer Entfernung zur Stütze abgestuft. Bei den Beratungen zum NA(D) wurde daher entschieden, die Durchstanzbewehrungsmenge der ersten Reihe (im Abstand $0,3d$ bis $0,5d$ zum Rand der Lasteinleitungsfläche) mit dem Faktor $\kappa_{sw,1} = 2,5$ und für die zweite Reihe im maximalen Abstand $0,75d$ zur ersten Reihe um den Faktor $\kappa_{sw,2} = 1,4$ zu erhöhen. Ab der dritten Reihe darf $\kappa_{sw} = 1,0$ gesetzt werden.

In Bild 9 sind die Ergebnisse einer Parameterstudie an Innenstützen mit quadratischen Querschnitt für zwei baupraktische Fälle mit einer kleinen (Bild 9, links) und einer großen Deckendicke (Bild 9, rechts) dargestellt. Für unterschiedliche Durchstanzbewehrungsmengen je Reihe wurde der maßgebende Durchstanzwiderstand bestimmt. Während für eine geringe Durchstanzbewehrung die Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung maßgebend ist, kann durch eine Vergrößerung der Durchstanzbewehrung die Tragfähigkeit bis zur Maximaltragfähigkeit gesteigert werden. Nach DIN EN 1992-1-1 werden die größten Traglaststeigerungen erzielt. Da in DIN 1045-1 der Bügelquerschnitt mit einem Betontraganteil bestimmt wird, der von der Rundschnitlänge abhängt, nimmt die erforderliche Bewehrung zur zweiten Reihe hin ab. Im NA(D) wurde die nach DIN EN 1992-1-1 ermittelte Bewehrungsmenge mit den oben genannten Faktoren vergrößert. Für beide untersuchten Parameterkonstellationen in Bild 9 zeigt sich, dass die Summe der nach NA(D) bestimmten Bügelbewehrung in der ersten und zweiten Reihe in etwa der erforderlichen Menge nach DIN 1045-1 entspricht, bzw. teilweise unterschreitet.

In Bild 10 werden die Bruchlasten von 38 Durchstanzversuchen mit einem Versagen innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs mit der Tragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 (Bild 10, links) und dem modifiziertem Ansatz für den NA(D) (Bild 10, rechts) verglichen. In den Diagrammen ist das Verhältnis von Bruchlast zur rechnerischen Tragfähigkeit ($V_{Test}/V_{Ru,sy,code}$) über der statischen Nutzhöhe aufgetragen. Die Auswertung für den Eurocode Ansatz ergibt einen Mittelwert von 0,92 bei einem 5%-Quantilwert von 0,60. Die Vorfaktoren $\kappa_{sw,1} = 2,5$ und $\kappa_{sw,2} = 1,4$ für den Ansatz im NA(D) wurden so festgelegt, dass der 5%-Quantilwert den Wert 1,00 erreicht und damit eine sichere Bemessung gegeben ist.

Analog zu DIN 1045-1 unterscheiden sich die Bemessungsgleichungen zur Bestimmung der Durchstanzbewehrung aus Bügeln und Schrägstäben nur durch einen Beiwert für die höhere Wirksamkeit der Schrägstäbe. Schrägstäbe kreuzen den Durchstanzriss unabhängig von seiner Neigung und verzögern somit eine Einschnürung der Druckzone [15][16]. Aufgrund der besseren Verankerung erreichen Schrägstäbe auch bei dünnen Platten die Streckgrenze.

$$v_{Rd,cs} = 0,75v_{Rd,c} + 0,80A_{sw}f_{ywd}(1/u_1d)\sin \alpha \quad (11)$$

Wie in DIN 1045-1 darf die Stahlspannung der Schrägstäbe bis zu ihrer Streckgrenze f_{ywd} ausgenutzt werden. Die Regelungen zur baulichen Durchbildung sowie die Begrenzung des Schrägstabdurchmessers mit $d_s \leq 0,08d$ sind in DIN EN 1992-1-1 (Bild NA.9.10) dargestellt und identisch zu DIN 1045-1. Für Durchstanzbewehrung zulässige Bügelformen und die Abstände können Bild 11 entnommen werden. Von der Durchstanzbewehrung müssen mindestens 50 % der Längsbewehrung in radialer oder tangentialer Richtung umschlossen werden. Querkraftzulagen sind als Durchstanzbewehrung nicht zugelassen.

3.4 Maximaltragfähigkeit

In DIN EN 1992-1-1 ist die maximale Durchstanztragfähigkeit durch ein Versagen der Betondruckstrebe am Stützenrand (Rundschnitt u_0 in Bild 2) begrenzt. Nach Beobachtungen aus Durchstanzversuchen ist es jedoch nicht das Versagen der stützennahen Betondruckstrebe,

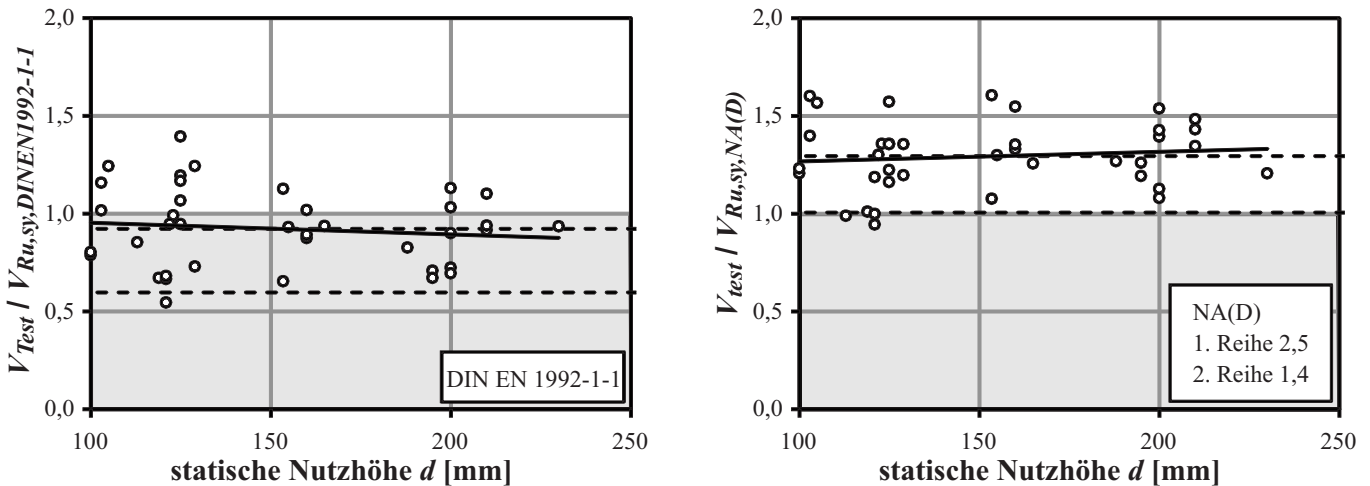


Bild 10. Vergleich der Bruchlasten V_{Test} von 38 Versuchen mit dem Bemessungsansatz aus DIN EN 1992-1-1 und dem NA(D) ($V_{Ru, sy, NA}$) für die Tragfähigkeit innerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs ($f_{ck} = f_{c, Test} - 4$)

Fig. 10. Comparison of 38 punching tests and the shear capacity according DIN EN 1992-1-1 ($V_{Ru, sy, EN 1992-1-1}$) (left) and according to the German annex ($V_{Ru, sy, NA}$) (right), ($f_{ck} = f_{c, Test} - 4$)

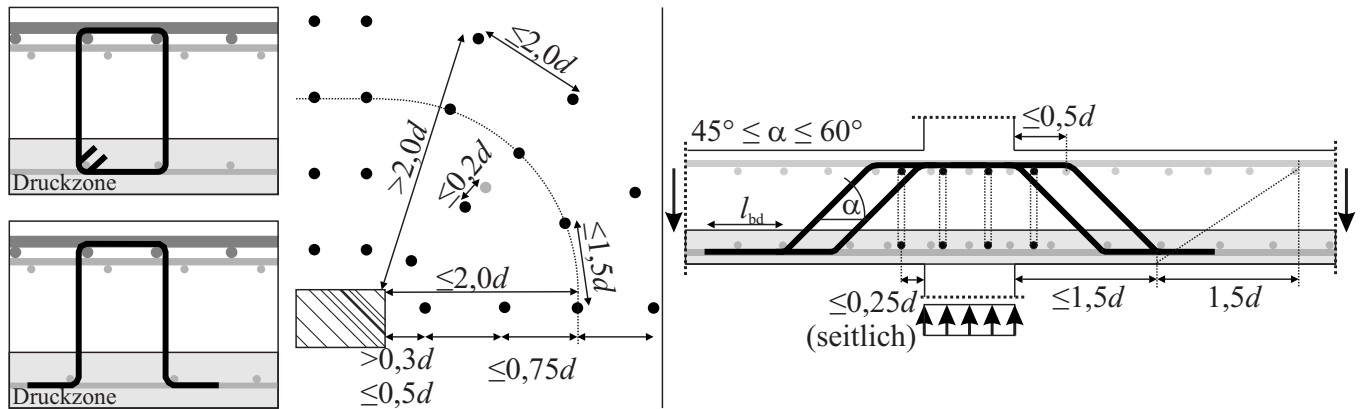


Bild 11. Zulässige Durchstanzbewehrungsformen und Abstände nach DIN EN 1992-1-1 für Bügel (links) und Schrägstäbe (rechts)

Fig. 11. Spacing of links for approved stirrups (left) and bend up bars (right)

sondern das Durchstanzen wird durch ein Versagen der Betondruckzone infolge mehraxialer Beanspruchung und gleichzeitig großer Rotation am Anschnitt Stütze-Platte eingeleitet [4][5][9].

Zur Überprüfung der Bemessungsgleichungen wurde eine statistische Auswertung von Versuchen aus der Literatur [9] [16]-[30] (Tabelle 2) durchgeführt. Die Datenbasis wurde ebenfalls zur Validierung der Durchstanzbemessungsgleichung zur Maximaltragfähigkeit nach DIN 1045-1 verwendet [15] und um neuere Versuche und Informationen ergänzt. Bei der Versuchsauswahl wurde darauf geachtet, dass ausreichend Querkraftbewehrung mit Bügelformen nach DIN EN 1992-1-1 (identische Regelung wie in DIN 1045-1) vorhanden war und der maßgebende Versagensriss im unmittelbaren stützennahen Bereich lokalisiert werden konnte.

Die Auswertung der Versuche in Bild 12, links belegt, dass der Ansatz nach DIN EN 1992-1-1 das geforderte Sicherheitsniveau deutlich unterschreitet. Außerdem werden insbesondere die Einflüsse aus bezogenem Stützenumfang und der Betondruckfestigkeit nicht zutreffend erfasst. Die Auswertung der Versuche lässt zudem erkennen, dass die Maximaltragfähigkeit von der Rotation der Platte und der zulässigen Rissbreite beeinflusst wird, die hauptsächlich durch den Längsbewehrungsgrad gesteuert werden.

Um diese Parameter zu erfassen und den Einfluss der Betondruckfestigkeit besser abzuschätzen, wird in Analogie zu DIN 1045-1 die maximale Tragfähigkeit als Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung bestimmt. Nach NA(D) wird die maximale Durchstanztragfähigkeit für Bügel oder Schrägstäbe in Flachdecken im kritischen Rundschnitt u_1 im Abstand $2,0d$ von der Stütze ermittelt:

$$v_{Rd, max} = 1,4 v_{Rd, c} \quad (12)$$

Durch den Nachweis im Abstand $2,0d$ ist die Stützengeometrie nur noch von untergeordneter Bedeutung, da eventuelle Spannungsspitzen bis zum betrachteten Rundschnitt bereits abgeklungen sind (Bild 12, rechts).

In Bild 13 werden die Ergebnisse einer Parameterstudie dargestellt. Für die gewählte Flachdecke mit Bügeln als Durchstanzbewehrung ergibt der Ansatz nach DIN EN 1992-1-1 für größere bezogene Stützenumfang u_0/d sowie größere Betondruckfestigkeiten signifikant höhere maximale Durchstanzwiderstände. Die Anpassungen für den NA(D) nach Gleichung (12) berechnen dagegen Traglasten analog zu DIN 1045-1.

Der Vorfaktor von 1,40 (anstelle von 1,50 im Abstand von $1,5d$ nach DIN 1045-1) wurde an 45 Versuchen zur Maximaltragfähigkeit kalibriert (Bild 12, rechts). Die statistische

Tabelle 2. Versuche zur maximalen Durchstantragfähigkeit und Auswertung zur maximalen Durchstantragfähigkeit nach NA(D)
 Table 2. Details of test specimens and comparison of test results with the punching resistance according NA(D)

Nr. im Versuchsbericht	Forscher	Quelle	$f_{c,cyl}$	ρ_l	d	Stützenform	Stützenabmessung	V_{Test}	$V_{Rk,max}$	$V_{Test}/V_{Rk,max}$
			N/mm ²	%	mm		mm	MN	MN	-
B12	Elst.; Hogn.	[17]	44,8	3,00	114	q	254	0,787	0,699	1,13
A-S2-82	Andersson	[18]	27,2	1,05	120	k	300	0,459	0,429	1,07
A-S2-83	Andersson	[18]	23,4	1,06	119	k	300	0,459	0,400	1,15
5	Franz	[19]	26,9	1,09	129	k	210	0,432	0,434	0,99
6	Franz	[19]	21,0	1,09	129	k	210	0,427	0,393	1,09
7	Franz	[19]	21,8	1,09	129	k	210	0,353	0,399	0,88
8	Franz	[19]	26,8	1,13	125	k	210	0,432	0,415	1,04
10	Franz	[19]	21,7	0,80	125	k	210	0,363	0,340	1,07
11	Franz	[19]	23,7	0,70	125	k	210	0,343	0,336	1,02
P3	Marti	[20]	34,0	1,39	152	k	300	0,875	0,759	1,15
SC8	Seible	[21]	33,6	1,17	121	q	305	0,592	0,545	1,09
SC9	Seible	[21]	33,6	1,17	121	q	305	0,596	0,545	1,09
P22	Müller, F.X.	[27]	32,9	1,31	153,5	k	300	1,040	0,746	1,39
4	Broms	[30]	17,2	0,58	150	q	250	0,415	0,430	0,96
5	Broms	[30]	19,6	0,71	150	q	250	0,434	0,486	0,89
S1.1s	Tolf	[22]	24,1	0,86	97	k	125	0,261	0,204	1,28
S1.2s	Tolf	[22]	24,8	0,85	99	k	125	0,259	0,212	1,22
S2.1s	Tolf	[22]	19,3	0,86	195	k	250	0,894	0,751	1,19
S2.2s	Tolf	[22]	19,7	0,86	195	k	250	0,851	0,757	1,12
3	Chana	[23]	37,0	0,79	200	q	300	1,139	1,108	1,03
4	Chana	[23]	40,9	0,79	200	q	300	1,302	1,149	1,13
5	Chana	[23]	34,5	0,85	210	q	400	1,382	1,314	1,05
7	Chana	[23]	36,4	0,85	210	q	400	1,429	1,341	1,07
8	Chana	[23]	35,7	0,85	210	q	400	1,327	1,332	1,00
9	Chana	[23]	38,3	0,84	188	q	300	1,135	1,032	1,10
P1-II	Beutel	[16]	26,2	0,81	190	q	400	1,055	1,000	1,05
P2-II	Beutel	[16]	29,8	0,81	190	q	400	1,109	1,052	1,05
2V20	Lee	[25]	77,3	1,96	160	q	290	1,450	1,339	1,08
2V21	Lee	[25]	78,3	1,96	160	q	290	1,480	1,345	1,10
2V22	Lee	[25]	77,9	1,96	160	q	290	1,690	1,343	1,26
5V	Oliveira	[26]	61,5	1,30	103	q	120	0,423	0,388	1,09
P17	Müller,F.X.	[27]	29,6	1,31	153,5	k	300	0,860	0,716	1,20
P19	Müller,F.X.	[27]	33,2	1,31	153,5	k	300	0,800	0,748	1,07
PF1	Lips	[28]	31,1	1,50	209	q	130	1,040	0,957	1,09
PF2	Lips	[28]	30,4	1,51	208	q	260	1,560	1,296	1,20
PF3	Lips	[28]	37,1	1,50	209	q	520	2,240	1,802	1,24
PF4	Lips	[28]	32,5	1,54	274	q	340	2,670	2,169	1,23
PF5	Lips	[28]	33,4	1,50	354	q	440	4,720	3,428	1,38
EM1	Beutel	[9]	29,8	1,96	160	q	290	1,233	0,946	1,30
V2	Ladner	[29]	30,2	1,31	240	k	300	1,784	1,477	1,21
V4	Ladner	[29]	27,4	1,31	240	k	300	1,799	1,423	1,26
S_V2	Vollum	[24]	24,0	1,28	174	q	270	0,843	0,845	1,00
S_V3	Vollum	[24]	27,2	1,28	174	q	270	0,903	0,888	1,02
S_V4	Vollum	[24]	27,2	1,28	174	q	270	0,906	0,888	1,02
S_V5	Vollum	[24]	23,2	1,28	174	q	270	0,872	0,834	1,05

$f_{c,cyl}$: Zylinderdruckfestigkeit; ρ_l : Längsbewehrungsgrad; d : statische Nutzhöhe;
 Stützenform q: quadratisch, k: kreisförmig; V_{Test} : Bruchlast aus Versuch; $V_{Rk,max}$:
 Maximaltragfähigkeit nach DIN EN1992-1-1/NA mit Vorfaktor 1,4

Anzahl	45
Mittelwert	1,11
Standardabweichung	0,11
5% - Quantilwert	0,93

Auswertung der Versuche ergibt für den neuen Ansatz einen Mittelwert von 1,11, eine Standardabweichung von 0,11 und einen 5%-Quantilwert von 0,93 (bei einer Auswertung mit $f_{ck} = f_{cm} - 4$ MPa). Damit unterschreitet der

5%-Quantilwert den geforderten Wert von 1,00. Dies wurde bei den Beratungen zum nationalen Anhang jedoch akzeptiert, da das aus DIN 1045-1 bekannte Sicherheitsniveau nicht unterschritten wurde und ausreichend gute

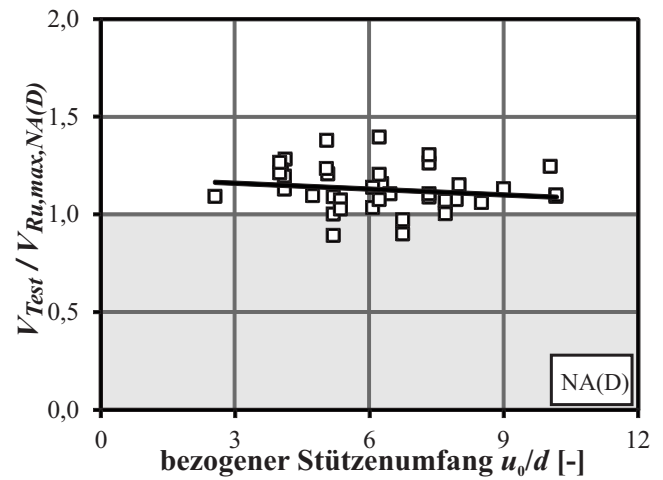
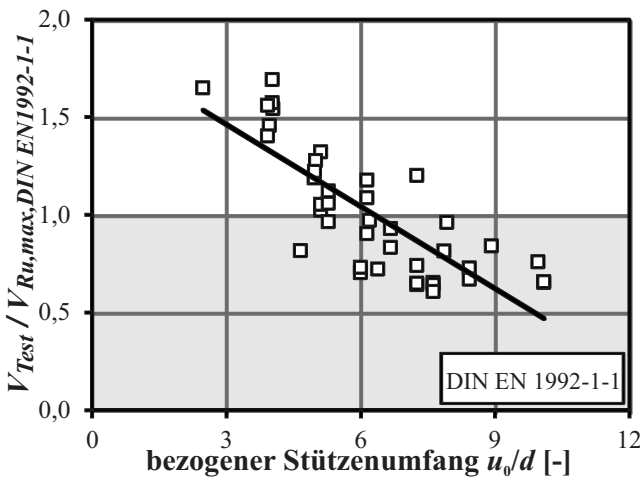


Bild 12. Vergleich des Berechnungsansatzes für $V_{Rd,max,code}$ nach DIN EN 1992-1-1 und dem für den deutschen Anhang modifiziertem Berechnungsansatz mit 45 Versuchen ($f_{ck} = f_{c,Test} - 4$)

Fig. 12. Comparison of 45 punching tests with the maximum punching resistance according to DIN EN 1992-1-1 (left) and NA(D) (right), ($f_{ck} = f_{c,Test} - 4$)

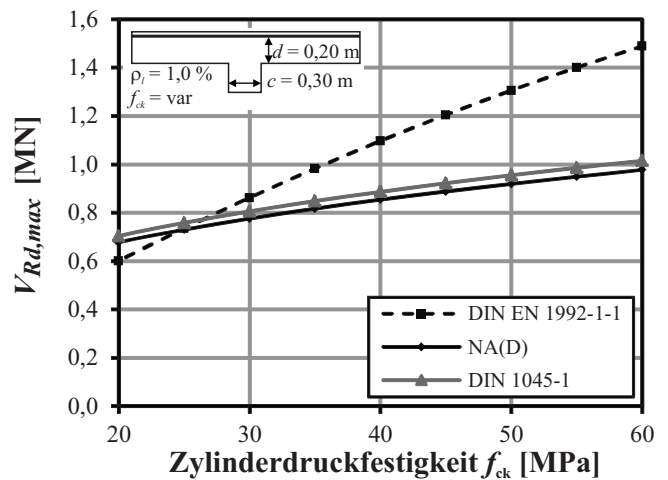
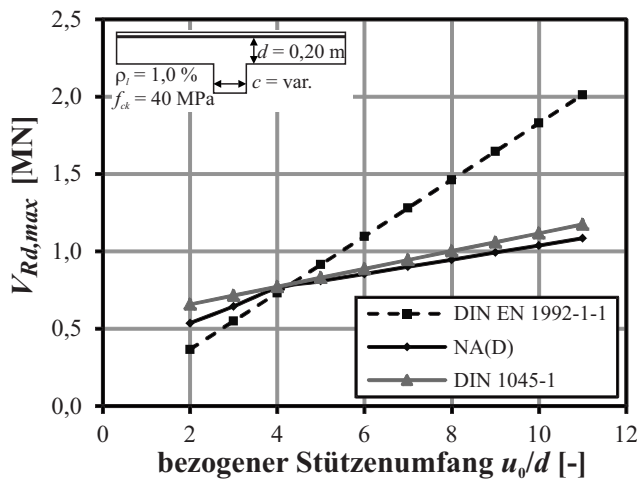


Bild 13. Vergleich der maximalen Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken
Fig. 13. Plots of the maximum punching shear resistance of flat slabs

Erfahrungen mit der baulichen Durchbildung einer Durchstanzbewehrung aus Bügeln vorliegen. Der Einfluss einer günstig wirkenden Betondruckspannung σ_{cp} infolge Vorspannung ist nicht durch Versuche abgesichert und darf bei der Bestimmung der Maximaltragfähigkeit nicht in Ansatz gebracht werden ($k_1 = 0$) [6] [31].

3.5 Tragfähigkeit außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs

Die Durchstanzbewehrung ist so lange anzuordnen, bis der Nachweis außerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches mit der Querkrafttragfähigkeit der liniengelagerten Platte gelingt. Die erforderliche Länge des äußeren Rundschnittes u_{out} ermittelt sich zu:

$$u_{out} = \frac{\beta V_{Ed}}{v_{Rd,c} d} \quad (15)$$

Der äußere Rundschnitt befindet sich im Abstand $1,5d$ von der äußersten Durchstanzbewehrungsreihe. Die Tragfähigkeit $v_{Rd,c}$ entspricht der Querkrafttragfähigkeit ohne Querkraftbewehrung mit dem im NA(D) festgelegten Vorfaktoren $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_C$.

$$v_{Rd,c} = 0,15 / \gamma_C k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} + 0,12 \sigma_{cp} \geq (v_{min} + 0,12 \sigma_{cp}) \quad (14)$$

Eine Übergangsfunktion zur Vermeidung eines sprunghaften Übergangs auf den Querkraftwiderstand wie in DIN 1045-1 oder ein für den äußeren Rundschnitt bei Rand- und Eckstützen reduzierter Lasterhöhungsfaktor β_{red} wie in Heft 525 des DAfStb wird nicht definiert. Wegen der im Vergleich zu Heft 525 geringeren Lasterhöhungsfaktoren β scheint dies aber auch nicht erforderlich.

3.6 Mindestbewehrung

Grundsätzlich ist eine Mindestquerkraftbewehrung im Durchstanzbereich anzuordnen, wenn Durchstanzbewehrung zur Steigerung der Tragfähigkeit erforderlich ist. Die Mindestbewehrung dient vor allem zur Begrenzung möglicher Schrägrissbreiten im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit. Im Unterschied zu DIN 1045-1 wird im NA(D) die Minstdurchstanzbewehrung auf den Wirkungsbe-
reich ($s_r \cdot s_t$) eines einzelnen Stabes bezogen. Es gilt:

$$A_{sw,min} = A_s \sin \alpha = \frac{0,08}{1,5} \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{yk}} s_r s_t \quad (15)$$

Bei vertikalen Bügeln mit $\alpha = 90^\circ$ und $\sin\alpha = 1,0$ gilt $A_{sw,min} = A_s$, bei Schrägstäben ist zu beachten, dass der vertikal wirksame Anteil in Gleichung (15) mit $A_s \sin\alpha$ berücksichtigt wird und als radialer Abstand $s_r = 1,0d$ anzusetzen ist. Der Vergleich mit dem Mindestdurchstanzbewehrungsgrad nach DIN 1045-1 führt zu nahezu identischen Bewehrungsquerschnitten.

4 Zusammenfassung

Aufgrund von Sicherheitsdefiziten bei der Durchstanzbemessung nach DIN EN 1992-1-1 wurden die Bemessungsgleichungen für eine Anwendung in Deutschland angepasst, sofern eine Unterschreitung des geforderten und aus DIN 1045-1 bekannten Sicherheitsniveaus vorlag. Anhand von Parameterstudien und Auswertungen von Durchstanzversuchen kann folgendes festgestellt werden:

- Die Durchstanztragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung ergibt für mittlere und große u_0/d Verhältnisse nach DIN EN 1992-1-1 und DIN 1045-1 nahezu identische Tragfähigkeiten. Für Verhältnisse $u_0/d < 4,0$ wurden im NA(D) geringfügige Anpassungen beim empirischen Vorfaktor $C_{Rd,c}$ vorgenommen.
- Die Durchstanztragfähigkeit innerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches wird nach DIN EN 1992-1-1 deutlich überschätzt. Daher wird im NA(D) die Durchstanzbewehrungsmenge in der ersten und zweiten Reihe erhöht. Der Vergleich mit den Regelungen aus DIN 1045-1 ergibt für den NA(D) geringfügig geringere Bewehrungsmengen.
- Die maximale Durchstanztragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 führt zu teilweise deutlichen Unterschreitungen des geforderten Sicherheitsniveaus. Daher wurde im NA(D) die Maximaltragfähigkeit in Anlehnung an DIN 1045-1 als Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung festgelegt.

Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010, Januar 2011
- [2] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau, Januar 2011
- [3] DIN 1045-1:2008: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion. Berlin, 2008
- [4] Hegger, J.; Häusler, F.; Ricker, M.: Zur Durchstanzbemessung von Flachdecken nach Eurocode 2. Beton- und Stahlbetonbau 103, Heft 2, 2008, S. 93–102
- [5] Hegger, J.; Walraven, J.C.; Häusler, F.: Zum Durchstanzen von Flachdecken nach Eurocode 2. Beton- und Stahlbetonbau 105, Heft 4, 2010, S. 206–215
- [6] Hegger, J.; Ricker, M.; Häusler, F.; Tuchlinski, D.: Versuche zum Durchstanzen im Bereich von Randstützen mit und ohne Durchstanzbewehrung. Bauingenieur Band 82, Juni 2007, S. 270–278
- [7] Hegger, J.; Ricker, M.: Zur Bemessung des Durchstanzens im Bereich von Randstützen. Bauingenieur Band 82, April 2007, S. 177–184
- [8] Hegger, J.; Ricker, M.; Häusler, F.: Zur Durchstanzbemessung von ausmittigt beanspruchten Stützenknoten und Einzelfundamenten nach Eurocode 2. Beton- und Stahlbetonbau 103, Heft 11, 2008, S. 723–734
- [9] Hegger, J.; Häusler, F.; Ricker, M.: Zur maximalen Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken. Beton- und Stahlbetonbau 102, Heft 11, 2007, S. 770–777
- [10] Muttoni, A.: Punching Shear Strength of reinforced concrete slabs without transverse reinforcement. ACI Structural Journal (105), July–August 2008, S. 440–450
- [11] Guandalini, S.; Burdet, O.L.; Muttoni, A.: Punching Tests of Slabs with low reinforcement ratios. ACI Structural Journal (106), January–February 2009, S. 87–95
- [12] Ruiz, M.F.; Muttoni, A.: Applications of critical shear crack theory to punching of reinforced concrete slabs with transverse reinforcement. ACI Structural Journal (106), July–August 2009, S. 485–494
- [13] Mast, P.E.: Stresses in flat plates near columns. ACI Structural Journal 67, 1970, S. 761–768
- [14] Hegger, J.; Siburg, C.: Hintergründe und Nachweise zum Durchstanzen nach Eurocode 2 – NAD. Beitrag in: Goris; Hegger (Hrsg): Stahlbeton Aktuell 2011, Bauwerk Verlag GmbH ISBN 978-3-89932-286-6, 2011, S. E1–E43
- [15] Hegger, J.; Beutel, R.: Hintergründe und Anwendungshinweise zur Durchstanzbemessung nach DIN 1045-1. Bauingenieur Band 77, 2002, S. 535–549
- [16] Beutel, R.; Hegger, J.: The effect of anchorage on the effectiveness of the shear reinforcement in the punching zone. Cement & Concrete Composites, 2002, S. 539–549
- [17] Elstner, R. C.; Hognestad, E.: Shearing strength of reinforced concrete slabs. ACI -Journal, vol.28, no. 1 1956, S. 527–542
- [18] Andersson, J.L.: Punching of concrete slabs with shear reinforcement. Royal Institute of Technology Stockholm, Civil Engineering 1963, S. 212
- [19] Franz, G.: Versuche an Stahlbetonkörpern der Flachdecke im Stützenbereich - Versuchsreihe 1. TH Karlsruhe, Institut für Beton- und Stahlbeton, 1963
- [20] Marti, P.; Pralong, J.; Thürlimann, B.: Schubversuche an Stahlbetonplatten. Institut für Bautechnik und Konstruktion ETH-Zürich, Bericht Nr. 7305-2, 1977
- [21] Seible, F.; Ghali, A.; Dilger, W. H.: Preassembled shear reinforcing units for flat plates. ACI Structural Journal (77), no. 1, 1980, S. 28–35
- [22] Tolf, P.: Plattjocklekens inverkan pa betongplattors halffasthet vid genomstansning-- Försökmed cirkulära plattor. Institutionen för Byggnadsstatik, Stockholm, 1989
- [23] Chana, P.S.; Desai, S.B.: Design of shear reinforcement against punching. The structural engineer, vol. 70, no. 9 1992
- [24] Vollum, R. L.; Abdel-Fattah, T.; Eder, M.; Elghazouli, A.Y.: "Design of ACI-type punching shear reinforcement to Eurocode 2," Magazine of Concrete Research, 62-01, pp. 3–16, 2010
- [25] Lee, S.C.; Teng, S.; Morley, C.T.: Punching shear tests on high strength concrete slabs. Proceedings Utilization of high strength/high performance concrete, Norway, Sandefjord 20–24 June 1999, S. 401–410
- [26] Oliveira, D. R. C.; Melo, G. S.: Inclined stirrups as shear reinforcement in high performance concrete flat slabs. Proceedings Utilization of high strength/high performance concrete, Norway, Sandefjord 20–24 June 1999, S. 507–516
- [27] Müller, F.-X.; Muttoni, A.; Thürlimann, B.: Durchstanzversuche an Flachdecken mit Aussparungen. ETH Zürich, Institut für Baustatik und Konstruktion, Band 7305, Heft 5 1984
- [28] Lips, S.; Fernandez-Ruiz, M.; Muttoni, A.: Experimental Investigation on the punching strength and the deformation capacity of shear reinforced slabs. ACI Structural Journal. (Submitted for publication 2012)
- [29] Ladner, M.: Untersuchungsbericht: Durchstanzversuche an Flachdeckenausschnitten. Materialprüfstelle Hochschule Technik+Architektur Luzern, Bericht 419 (1996) und 419-1 (1999)
- [30] Broms, C. E.: Shear reinforcement for deflection ductility of flat plates. ACI – Structural Journal (87), no. 5, pages 696–705, 1985
- [31] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Heft 600: Erläuterungen zum Eurocode 2. In Vorbereitung, Veröffentlichung 2012