

Durchstanzen von Fundamenten nach NA(D) zu Eurocode 2

M. Ricker, C. Siburg, J. Hegger

Zusammenfassung Die Durchstanzbemessung von Fundamenten hat sich nach Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) [1] und zugehörigem Nationalen Anhang für Deutschland NA(D) [2] im Vergleich zu DIN 1045-1 [3] grundlegend geändert. Neben den allgemein anerkannten Einflussgrößen wie die Betondruckfestigkeit, den Längsbewehrungsgrad und die statische Nutzhöhe hat bei Fundamenten insbesondere die Schubslankheit einen wichtigen Einfluss auf die Durchstanztragfähigkeit. Anlässlich der verbindlichen Normenumstellung am 1. Juli 2012 von DIN 1045-1 auf DIN EN 1992-1-1 und dem zugehörigen Nationalen Anhang für Deutschland NA(D) werden die Bemessungsgleichungen zusammen mit erläuternden Hintergrundinformationen vorgestellt.

Foundation punching design according to German Annex of Eurocode 2

Abstract The punching shear design of footings according to Eurocode 2 (DIN EN 1992-1-1) [1], and the corresponding National Annex for Germany NA(D) [2], has changed substantially in comparison to the German norm DIN 1045-1 [3]. In addition to the generally accepted parameters for the punching shear resistance, i.e. the concrete compression strength, the flexural reinforcement ratio, and the effective static depth, the shear span ratio also affects the punching shear capacity of footings. To coincide with the mandatory transition from DIN 1045-1 to DIN EN 1992-1-1 and the corresponding National Annex for Germany NA(D), by the 1st July 2012, the following describes the design equations together with explanatory background information.

1 Einleitung

Die Bemessungsgleichungen in Normen wie z.B. DIN 1045-1 [5] oder SIA 262:2003 [4] und auch die Modelle zur Beschreibung des Durchstanzwiderstands (z.B. [5],[6],[7]) wurden anhand von Durchstanzversuchen an Flachdeckenausschnitten hergeleitet und später für Fundamente – meist oh-

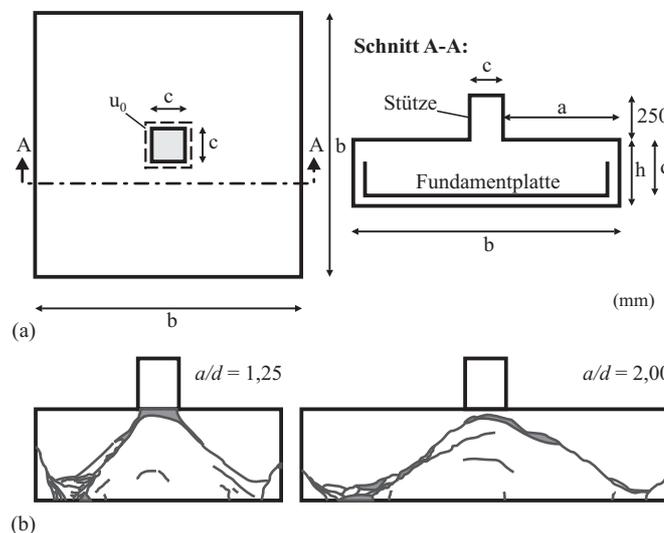


Bild 1. Geometrie der Versuchskörper (a) und Versagensrisse in Versuchen (b)
Fig. 1. Geometry of the test specimens (a) and failure cracks observed in tests (b)

ne größere Anpassungen – übernommen. Das Tragverhalten von Fundamenten unterscheidet sich jedoch deutlich von Flachdecken, da Einzelfundamente und Bodenplatten in der Regel im Verhältnis zu ihrer Spannweite deutlich größere Plattendicken aufweisen und zudem einen Teil der Stützenlast direkt in den Baugrund ableiten. Aus Durchstanzversuchen an Einzelfundamenten ist bekannt, dass die Schubslankheit a/d einen maßgebenden Einfluss auf die Schubrisse (Bild 1) und die Tragfähigkeit des Einzelfundamentes hat [8],[9],[10]. Hierbei sind a der Abstand vom Stützenanschnitt zum Fundamentrand und d die statische Nutzhöhe der Fundamentplatte. Die Bemessung von Fundamenten mit den für Flachdecken hergeleiteten Durchstanzmodellen kann zu einer Überschätzung der Tragfähigkeit und damit zur Unterschreitung der geforderten Sicherheit führen [11],[12].

Zur Einführung von DIN EN 1992-1-1 [1] zusammen mit dem Nationalen Anhang für Deutschland NA(D) [2] wurde die Durchstanzbemessung von Flachdecken und Fundamenten anhand eigener Durchstanzversuche und Versuchen aus der Literatur überprüft und an das in Deutschland übliche – und auch DIN 1045-1 zugrunde liegende Sicherheitsniveau – angepasst [13],[14]. In diesem Beitrag werden die neuen Bemessungsregeln zum Durchstanzen von Fundamenten nach DIN EN 1992-1-1 zusammen mit den Regelungen des Deutschen Anhangs NA(D) vorgestellt und weitere Hintergrundinformationen gegeben.

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

2.1 Allgemeines

Beim Durchstanzen von Einzelfundamenten sind phänomenologisch die gleichen Versagensmechanismen wie bei

Dr.-Ing. Marcus Ricker

HALFEN GmbH, Technical Product Management
Liebigstraße 14
40764 Langenfeld
marcus.ricker@halfen.de

Dipl.-Ing. Carsten Siburg

Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB)
der RWTH Aachen
Mies-van-der-Rohe-Straße 1
52074 Aachen
csiburg@imb.rwth-aachen.de

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Josef Hegger

Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB)
der RWTH Aachen
jhegger@imb.rwth-aachen.de

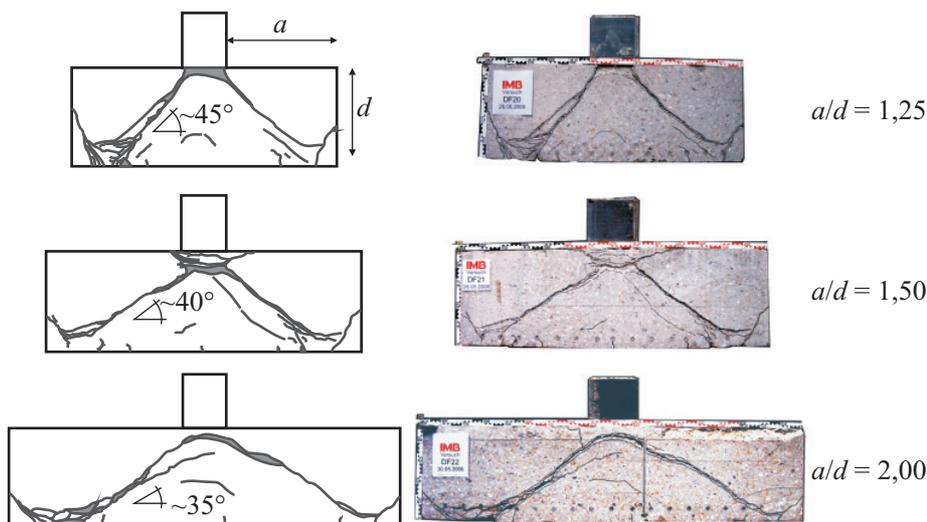


Bild 2. Sägeschnitte von verschiedenen Durchstanzversuchen an Fundamenten mit unterschiedlicher Schlankheit
 Fig. 2. Crack patterns in the sections of test specimens with various shear slenderness

Flachdecken zu beobachten. Diese können in ein Versagen ohne und mit Durchstanzbewehrung unterteilt werden. Ist eine Durchstanzbewehrung angeordnet, lässt sich zusätzlich ein Versagen innerhalb und außerhalb der Durchstanzbewehrung sowie auf Maximaltragfähigkeitsniveau am Stützenanschnitt unterscheiden. Die verschiedenen Durchstanzversagensarten wurden bereits in dem vorangegangenen Beitrag für Flachdecken [15] vorgestellt und ausführlich beschrieben.

2.2 Untersuchungen zur Durchstanztragfähigkeit von Einzelfundamenten

Im Rahmen von Forschungsvorhaben am Institut für Massivbau (IMB) der RWTH Aachen wurden Durchstanzversuche an gedrunenen Einzelfundamenten mit a/d -Verhältnissen zwischen 1,25 und 2,00 durchgeführt. Ein Teil der Einzelfundamente waren auf einem Sandkörper gebettet und wurden in Zusammenarbeit mit dem Institut für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Verkehrswasserbau (GiB) der RWTH Aachen durchgeführt. Bei den restlichen Versuchskörpern wurde eine gleichmäßige Sohlspannung simuliert, indem die Fundamentunterseite in 16 oder 25 Lasteinleitungspunkten durch hydraulische Pressen belastet wurde. Die gleichmäßige Beanspruchung der Fundamentsohle wurde durch einen gemeinsamen Ölkreislauf für alle Pressen sichergestellt. Die verwendeten Versuchsstände und weiterführende Informationen zu den Versuchsständen können [9],[10],[16],[19] entnommen werden. Weiterhin wurden zur gezielten Untersuchung des Tragverhaltens numerische Simulationen mit dem Finite-Elemente-Programmsystem Abaqus [17] durchgeführt, die in [18] oder [19] beschrieben sind.

Die Rissbildung im Platteninnern wurde durch Sägeschnitte in Nähe des Stützenanschnitts dokumentiert. Die Sägeschnitte von auf Sand gebetteten und von mit hydraulischen Pressen gleichförmig beanspruchten Versuchskörpern belegen, dass für die untersuchten Randbedingungen die Bettung keinen signifikanten Einfluss auf die Neigung des Versagensriss hat. In Bild 2 sind die Sägeschnitte von drei gleichförmig beanspruchten Einzelfundamenten dargestellt. Es können unterschiedliche Risswinkel beobachtet werden, die mit der Schubslankheit a/d korreliert sind. Für die gedrunenen Einzelfundamente mit einem kleinen

a/d -Verhältnis von 1,25 werden deutlich steilere Rissneigungen als für die schlankeren Einzelfundamente ($a/d = 2,0$) beobachtet, während die aufnehmbare Querkraft mit zunehmender Schubslankheit abnimmt. Aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen zum Durchstanzen von auf Sand gebetteten und gleichförmig belasteten Einzelfundamenten können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden [19]:

1. Der Durchstanzwiderstand und die Neigung des Versagensrisses wird signifikant von der Schubslankheit a/d beeinflusst. Die aufnehmbare Querkraft nimmt mit zunehmendem a/d -Verhältnis ab.

2. Durch die Anordnung einer Durchstanzbewehrung lässt sich die aufnehmbare Querkraft erheblich steigern. Die Effektivität der Durchstanzbewehrung wird jedoch von der Schubslankheit a/d beeinflusst. Die Wirksamkeit der Durchstanzbewehrung wird mit abnehmendem a/d -Verhältnis reduziert.

3. Wenn die Durchstanztragfähigkeit im Vergleich zum Grundbruchwiderstand nicht zu klein ist, erreichen auf Sand gebettete Einzelfundamente höhere Durchstanztragfähigkeiten als gleichförmig beanspruchte Einzelfundamente. Dies lässt sich mit einer Konzentration der Bodenpressungen im Bereich der Stütze erklären.

Anhand der Auswertung eigener und fremder Durchstanzversuche an Einzelfundamenten wurde in [15] und [19] das Sicherheitsniveau einer Durchstanzbemessung nach DIN 1045-1, DIN EN 1992-1-1, SIA 262:2003 und weiterer Modelle überprüft sowie ein erweiterter Bemessungsansatz zur Ermittlung des Durchstanzwiderstands von Einzelfundamenten abgeleitet. Für die Regelungen im Deutschen Anhang NA(D) zu DIN EN 1992-1-1 wurde dieses Modell dann vereinfacht übernommen.

2.3 Einwirkende Schubspannung entlang des kritischen Rundschnitts

Wie in DIN 1045-1 darf auch bei einer Berechnung nach DIN EN 1992-1-1 die Bodenreaktionskraft unterhalb des Durchstanzkegels abzüglich des Fundamenteigengewichts von der einwirkenden Querkraft abgezogen werden. Experimentelle Untersuchungen bestätigen, dass die Annahme einer gleichmäßigen Bodenpressung, wie sie in vielen Bemessungsnormen getroffen wird, in den meisten Fällen zu einer sicheren Bemessung führt [11],[12].

Bedingt durch die Bodenpressungen und die im Vergleich zu Flachdecken geringere Schubslankheit ist bei Fundamenten der Durchstanzkegel deutlich steiler geneigt als bei Flachdecken. Je nach Schubslankheit und Größe der Bodenpressung ist daher die Lage des maßgebenden Rundschnittes nicht von vorneherein bekannt. Im Entwurf zum British Standard von 1982 [20] wurde deshalb die Lage des kritischen Rundschnittes als Variable eingeführt, so dass sich die auf den kritischen Rundschnitt bezogene Durchstanztragfähigkeit mit dem Abstand zur Stütze bzw. mit der Neigung des Durchstanzkegels ändert. Der Wert, der zur kleinsten aufnehmbaren Stützenkraft führt, ist für die Be-

messung maßgebend. Der maximale Abstand des kritischen Rundschnittes war dabei auf $1,5d$ beschränkt und wurde später, als die Regelung Eingang in Model Code 90 [21] fand, auf $2,0d$ erhöht. Der variable Abstand des Nachweisschnittes wurde in der aktuellen Fassung von DIN EN 1992-1-1 direkt aus Model Code 90 übernommen. Die resultierenden Bodenpressungen innerhalb des iterativ ermittelten, kritischen Rundschnittes dürfen dabei vollständig von der einwirkenden Querkraft abgezogen werden. Nach DIN EN 1992-1-1 ergibt sich somit entlang des kritischen Rundschnittes für eine zentrische Belastung folgende resultierende Spannung:

$$v_{Ed} = \beta \frac{V_{Ed,red}}{ud} = \beta \frac{V_{Ed} - \Delta V_{Ed}}{ud} \quad (1)$$

Hierbei sind V_{Ed} die einwirkende Querkraft, $\Delta V_{Ed} = \sigma_b A_{crit}$ die Summe der Bodenpressungen innerhalb des betrachteten Rundschnittes abzüglich des Eigengewichtes des Fundaments (mit σ_b als mittlere Bodenpressung innerhalb des betrachteten Rundschnittes und A_{crit} als Fläche innerhalb des betrachteten kritischen Rundschnittes), u der Umfang des betrachteten kritischen Rundschnittes, d die statische Nutzhöhe und β ein Lasterhöhungsbeiwert zur Berücksichtigung einer Momenten-Querkraft-Interaktion. Bei Einzelfundamenten mit der Grundrissfläche A kann bei Annahme einer gleichmäßigen Verteilung der Bodenpressungen folgende Gleichung für $V_{Ed,red}$ angegeben werden:

$$\beta V_{Ed,red} = \beta V_{Ed} (1 - A_{crit}/A) \quad (2)$$

Gemäß den Angaben im NA(D) ist für den Lasterhöhungsbeiwert ein Mindestwert von $\beta \geq 1,1$ anzunehmen. Analog zu Flachdecken kann der Lasterhöhungsfaktor β durch den Ansatz einer (quasi-)vollplastischen Schubspannungsverteilung aus der Momentenbeanspruchung entlang des kritischen Rundschnittes ermittelt werden (vgl. z.B. [15]). Für eine einaxiale Momentenbeanspruchung ergibt sich für die maximale Schubspannung entlang des kritischen Rundschnittes:

$$v_{Ed} = \left[1 + k \frac{M_{Ed} u}{V_{Ed,red} W} \right] \frac{V_{Ed,red}}{ud} = \beta \frac{V_{Ed,red}}{ud} \quad (3)$$

Hierbei sind k der Anteil des Moments, der über Schubspannungen in die Platte eingeleitet wird (geeignete Werte sind in DIN EN 1992-1-1 in Abhängigkeit der Stützgeometrie tabelliert), $W = \int_0^u |e| dl$ eine Größe, die analog dem statischen Moment für den jeweils betrachteten Rundschnitt zu berechnen ist, und e der Abstand von der Schwerelinie des kritischen Rundschnittes zum betrachteten Abschnitt dl des kritischen Rundschnittes. Weitere Informationen können [15] oder [19] entnommen werden.

Zur Bestimmung des maßgebenden Abstands des kritischen Rundschnittes von der Lasteinleitungsfläche a_{crit} ist eine iterative Berechnung erforderlich, da sich die vom kritischen Rundschnitt u eingeschlossene Fläche mit zunehmendem Abstand a_{crit} vergrößert. Dadurch wird der Anteil der Bodenpressung ΔV_{Ed} größer, der von der einwirkenden Stützkraft V_{Ed} abgezogen werden darf. Die für die Durchstanzbemessung maßgebende Einwirkung ($V_{Ed,red} = V_{Ed} - \Delta V_{Ed}$) wird somit reduziert. Allerdings wird für Fundamente mit zunehmendem Abstand von der Lasteinleitungsfläche die längs des kritischen Rundschnittes aufnehmbare Schubspannung aufgrund des abnehmenden mehraxialen Spannungs-

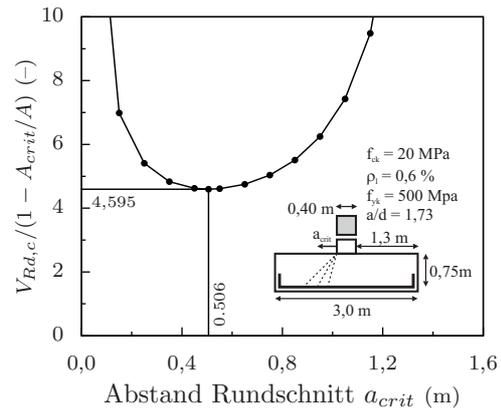


Bild 3. Iterative Ermittlung des Abstandes a_{crit} von der Lasteinleitungsfläche
Fig. 3. Iterative calculation of the distance a_{crit} between the critical perimeter and the column face

zustands kleiner, was in der Durchstanzgleichung durch den Quotienten $(2d)/a_{crit}$ berücksichtigt wird. Für die Durchstanzbemessung ist der Abstand a_{crit} maßgebend, der unter Berücksichtigung dieser beiden Effekte den kleinsten Tragwiderstand ergibt (Bild 5). Der maximale Abstand a_{crit} ist auf $2,0d$ zu begrenzen.

Variiert man die Schubslankheit a/d eines Fundaments, ändert sich auch der Abstand a_{crit} des maßgebenden Nachweisschnittes. Mit zunehmender Slankheit ergeben sich größere Werte für den Abstand des kritischen Rundschnittes von der Lasteinleitungsfläche a_{crit} . Dieser Effekt stimmt mit den Beobachtungen aus Versuchen überein. Die Fundamentslankheit a/d ist mit dem kürzesten Abstand zwischen der Lasteinleitungsfläche und dem Fundamentrand zu ermitteln. Für Bodenplatten entspricht a dem kleinsten Abstand vom Stützenanschnitt zum Nullpunkt der radialen Plattenbiegemomente. Bei Bodenplatten mit einem regelmäßigen Stützenraster kann a zu $0,22l$ (hierbei ist l die Stützweite) abgeschätzt werden.

Nach Vergleichsrechnungen ist der Wert für a_{crit} in den meisten Fällen deutlich kleiner als $2,0d$, wodurch rechnerisch die bei Fundamenten im Vergleich zu Flachdecken deutlich steilere Neigung des Durchstanzkegels berücksichtigt wird. Gemäß der A1-Änderung zum Nationalen Anhang für Deutschland [22] darf für schlanke Fundamente mit einem a/d -Verhältnis größer als $2,0$ und für Bodenplatten zur Vermeidung einer iterativen Berechnung ein konstanter Abstand des Nachweisschnittes von $1,0d$ vom Rand der Lasteinleitungsfläche verwendet werden. Die innerhalb des kritischen Rundschnittes im Abstand von $1,0d$ aufintegrierten Bodenpressungen dürfen dabei zu 50% von der einwirkenden Querkraft V_{Ed} abgezogen werden.

Für eine Bemessung ist somit im allgemeinen Fall folgende Ungleichung zu erfüllen:

$$\beta V_{Ed,red} = \beta (V_{Ed} - \Delta V_{Ed}) \leq V_{Rd} = v_{Rd} u d \quad (4)$$

Hierbei sind V_{Ed} im praktischen Fall die auf das Einzelfundament oder die Bodenplatte einwirkende Stützkraft, V_{Rd} die im kritischen Rundschnitt aufnehmbare Querkraft und v_{Rd} die längs des kritischen Rundschnittes aufnehmbare Schubspannung. Für Einzelfundamente kann bei Annahme einer gleichmäßigen Pressungsverteilung $V_{Ed,red}$ nach Gleichung (2) ermittelt werden.

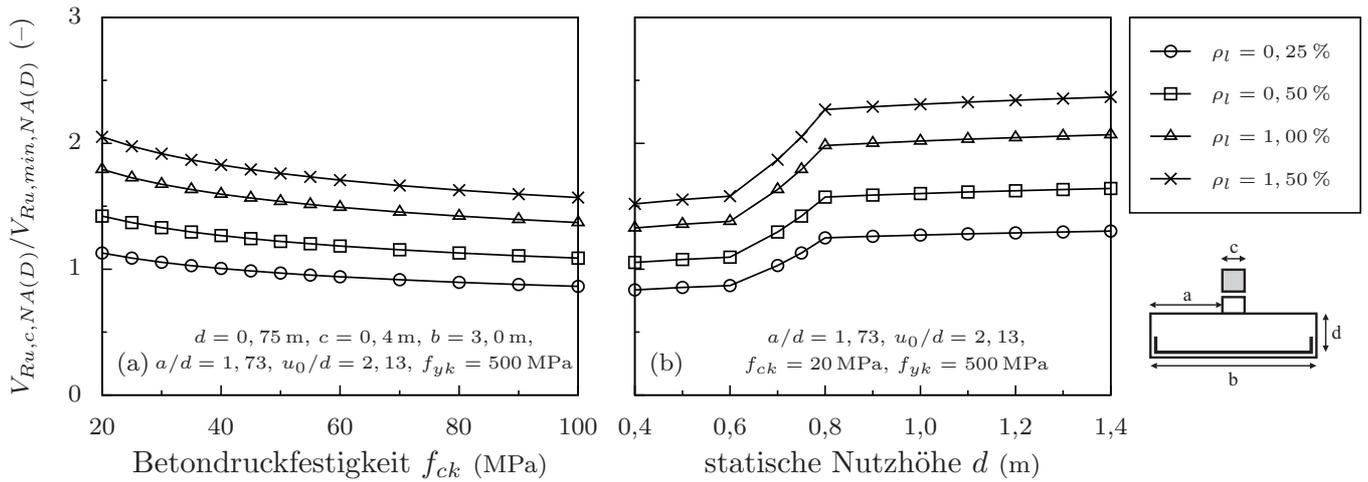


Bild 4. Vergleich der Mindestdurchstantragfähigkeit $V_{Ru,min,NA(D)}$ mit der Durchstantragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung $V_{Ru,c,NA(D)}$
 Fig. 4. Comparison between the punching shear resistance of footings $V_{Ru,c,NA(D)}$ and the corresponding minimum shear resistance $V_{Ru,min,NA(D)}$

2.4 Durchstanzwiderstand von Fundamenten ohne Durchstanzbewehrung

Der Bemessungswert der aufnehmbaren Schubspannung längs des kritischen Rundschnitts ergibt sich für ein Fundament ohne Durchstanzbewehrung nach [1],[2] einschließlich der A1-Änderung [22] wie folgt:

$$v_{Rd,c} = C_{Rd,c} k (100 \rho_l f_{ck})^{1/3} \frac{2d}{a_{crit}} \geq v_{min} \frac{2d}{a_{crit}} \quad (5)$$

Hierbei sind $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_C$ der national festgelegte empirischer Vorfaktor für Einzelfundamente und Bodenplatten ($\gamma_C = 1,5$), d die statische Nutzhöhe, a_{crit} der Abstand vom Rand der Lasteinleitungsfläche zum kritischen Rundschnitt, $k = 1 + \sqrt{200/d} \leq 2,0$ der Maßstabsfaktor der statischen Nutzhöhe (d in mm) und f_{ck} die charakteristische Zylinderdruckfestigkeit des Betons. Der Längsbewehrungsgrad $\rho_l = \sqrt{(\rho_{ly} \cdot \rho_{lz})} \leq \min(0,02; 0,5 f_{cd}/f_{yd})$ ist auf einer Plattenbreite entsprechend der Stützenabmessung zuzüglich eines Plattenbereichs mit einer Breite von $3d$ je Seite zu ermitteln. Analog zu Flachdecken wird der Längsbewehrungsgrad auf 2 % und zusätzlich im NA(D) zur Vermeidung von Druckbewehrung auf $0,5 f_{cd}/f_{yd}$ begrenzt.

Zusätzlich wird im NA(D) eine von DIN EN 1992-1-1 abweichende Mindestdurchstantragfähigkeit angegeben, die analog zur Mindestquerkrafttragfähigkeit nach DIN-Fachbericht 102 [23] für den Betonbrückenbau definiert wurde:

$$v_{min} = (0,0525/\gamma_C) k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d \leq 600 \text{ mm} \quad (6)$$

$$v_{min} = (0,0375/\gamma_C) k^{3/2} f_{ck}^{1/2} \quad \text{für } d > 800 \text{ mm} \quad (7)$$

Die Mindestdurchstantragfähigkeit kann bei kleinen Bewehrungsgraden in Verbindung mit hohen Betondruckfestigkeiten zu größeren Tragfähigkeiten als Gleichung (5) führen. Für die bei Fundamenten üblichen Betondruckfestigkeiten und Längsbewehrungsgrade wird v_{min} jedoch nicht maßgebend oder führt nur zu vernachlässigbar höheren Tragfähigkeiten (Bild 4). Eine genauere Bewertung dieser Regelung ist hier nicht möglich, da in der Literatur keine Durchstanzversuche zu finden sind, für die das Kriterium v_{min} maßgebend wird.

Für schlanke Fundamente mit $a/d > 2,0$ und Bodenplatten darf gemäß NA(D) ein kritischer Rundschnitt in einem kon-

stanten Abstand von $1,0d$ vom Rand der Lasteinleitungsfläche verwendet werden. Diese Vereinfachung führt zwar zu einer sicheren Bemessung, ist allerdings mechanisch nicht konsistent und kann zu unsteten Übergängen beim Tragwiderstand führen. In Bild 5 wird anhand eines Beispiels verdeutlicht, wie sich die vereinfachte Annahme eines konstanten Rundschnittabstandes von $1,0d$ auf die ansetzbare Abzugsfläche für die Bodenpressungen und den Durchstanzwiderstand auswirkt. Für Fundamente mit einer

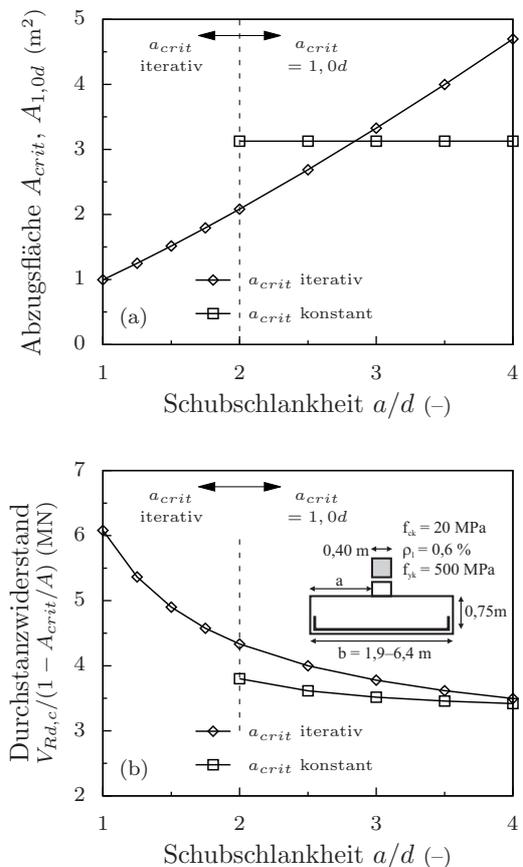


Bild 5. Auswirkungen eines konstanten Abstands für den kritischen Rundschnitt (für a/d -Verhältnisse größer 2,0 zulässig) auf die Fläche innerhalb des kritischen Rundschnittes (a) und den Durchstanzwiderstand (b)
 Fig. 5. Effect of a constant distance of the critical section (allowable for ratios a/d greater than 2,0) on the area inside the critical section (a) and on the punching shear resistance (b)

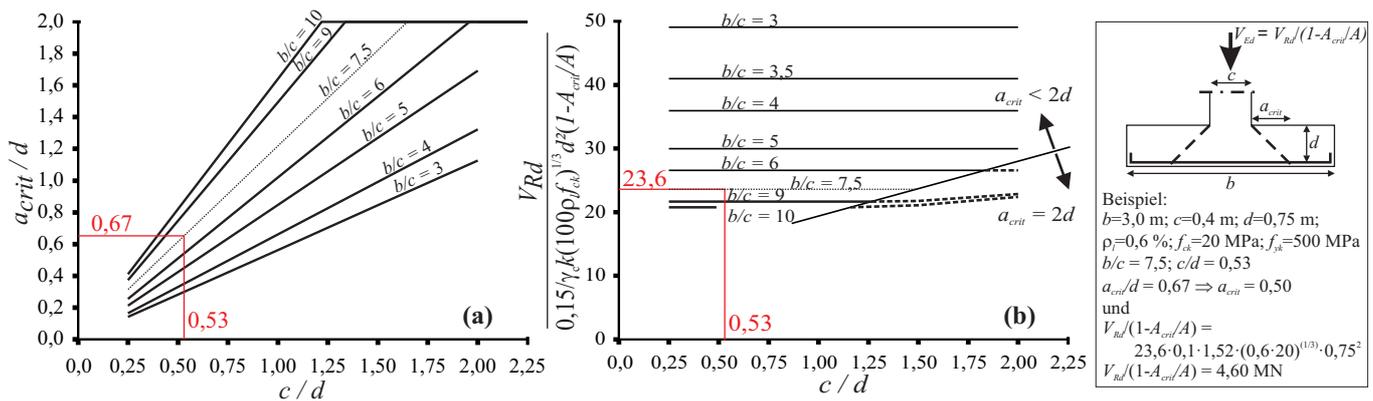


Bild 6. Maßgebender Rundschnittabstand (a) und Durchstanzwiderstand (b) nach DIN EN 1992-1-1 für quadratische Einzelfundamente
 Fig. 6. Critical section (a) and punching shear resistance (b) for square footings according to DIN EN 1992-1-1

Schubslankheit von $a/d = 2,0$ führt die Annahme eines konstanten Abstands des kritischen Rundschnitt im Vergleich zu der iterativen Berechnung zu einer größeren Fläche innerhalb des kritischen Rundschnittes (Bild 5 a). Da jedoch im Unterschied zur iterativen Berechnung bei dem vereinfachten Ansatz nur 50% der Bodenpressungen in Abzug gebracht werden dürfen, ist die aufnehmbare Stützenlast geringer. Mit größerer Schubslankheit nähern sich die Durchstanzwiderstände beider Verfahren wieder an (Bild 5 b).

In Bild 6 sind die Ergebnisse einer Parameterstudie an quadratischen Einzelfundamenten mit quadratischen Stützen und iterativer Ermittlung des Abstands des kritischen Rundschnitts dargestellt. Für verschiedene Verhältnisse aus Fundamentbreite zu Stützenbreite b/c und Stützenbreite zu stati-

scher Nutzhöhe $c/d = 2,0$ wurde der maßgebende Abstand des kritischen Rundschnitts zur Stütze ermittelt. Die bezogene aufnehmbare Stützenkraft ist eine Funktion des Verhältnisses b/c , aber nahezu unabhängig vom Verhältnis c/d . In Bild 6 a kann in Abhängigkeit von b/c und c/d das Verhältnis a_{crit}/d und Bild 6 b direkt die bezogene aufnehmbare Stützenkraft entnommen werden.

In Bild 7 ist der Quotient aus Versuchsbruchlast V_{test} und rechnerischer Tragfähigkeit $V_{Ru,c,NA(D)}$ nach [1],[2] für 120 Versuche über der statischen Nutzhöhe, dem Längsbewehrungsgrad, der Betondruckfestigkeit und der Schubslankheit aufgetragen. Das Rechenmodell erfasst für die vorliegenden Versuche den Einfluss der Betondruckfestigkeit und des Biegebewehrungsgrads nahezu trendfrei (Bild 7 c und d), wohingegen der Einfluss der statischen Nutzhöhe und

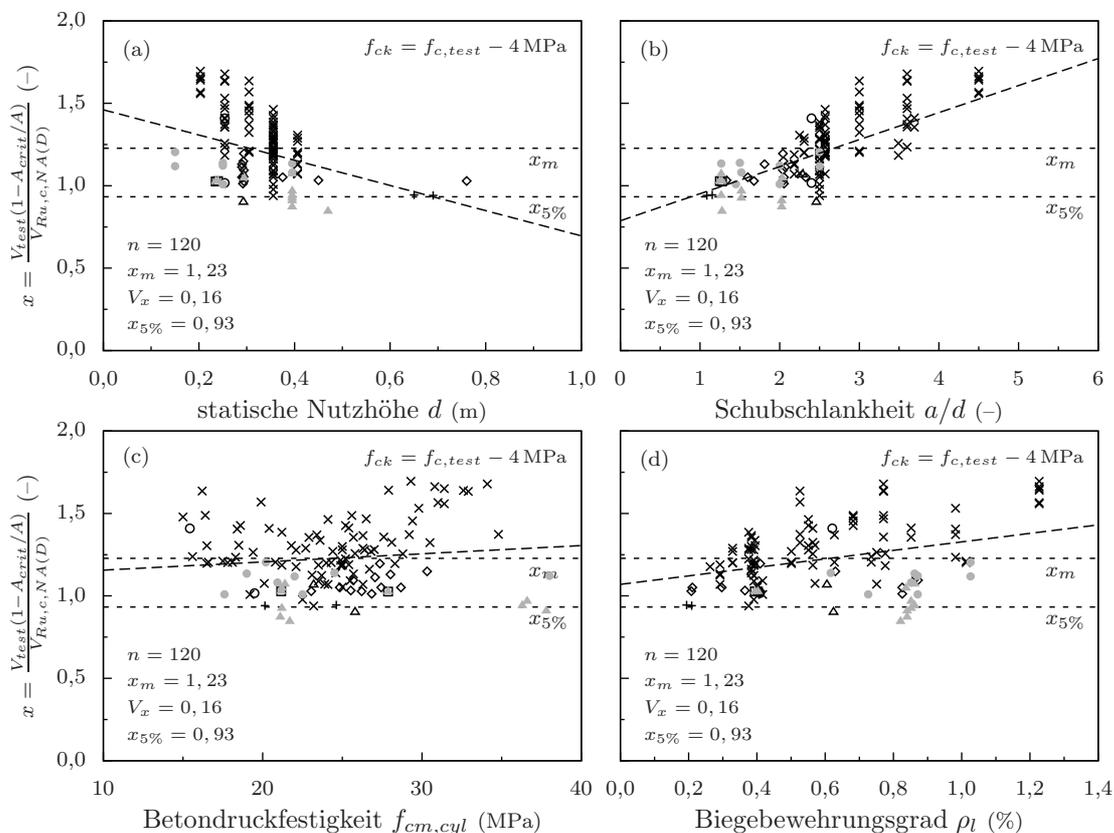


Bild 7. Versuchsnachrechnungen von Durchstanzversuchen an Einzelfundamenten ohne Durchstanzbewehrung mit dem Ansatz nach DIN EN 1992-1-1 und zugehörigem NA(D); der Abstand des kritischen Rundschnitts wurde iterativ ermittelt
 Fig. 7. Comparison between punching tests on footings and punching shear resistance according to DIN EN 1992-1-1 and corresponding NA(D); the distance of the critical perimeter was determined iteratively

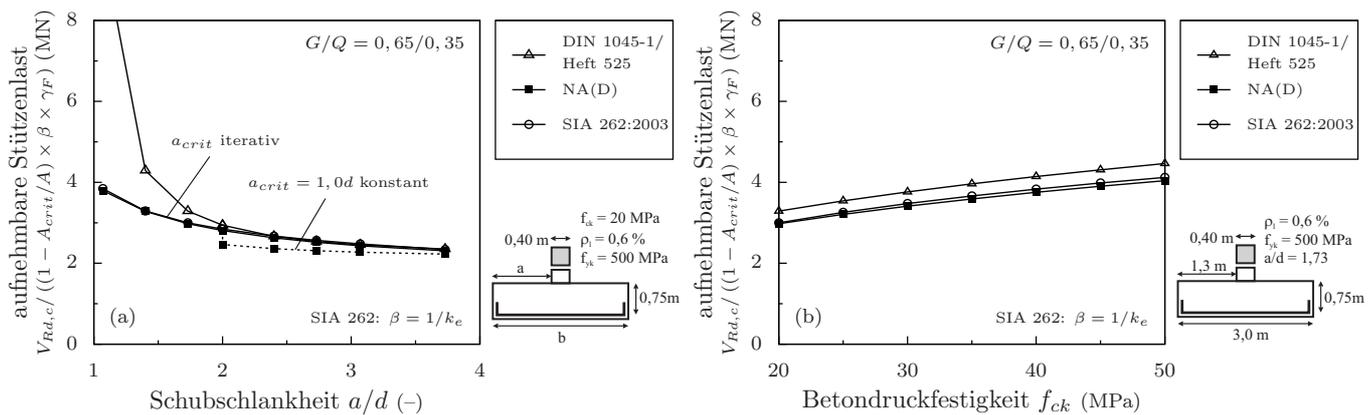


Bild 8. Aufnehmbare Stützenlast in Abhängigkeit der Schubschlankheit a/d (a) und der Zylinderdruckfestigkeit des Betons f_{ck} (b) für Einzelfundamente ohne Durchstanzbewehrung

Fig. 8. Effect of the shear slenderness a/d (a) and the concrete compressive strength f_{ck} (b) on the maximum column force according to various codes for footings without shear reinforcement

der Schubschlankheit nicht trendfrei abgebildet wird (Bild 7 a und b). Die Streuung ist insgesamt relativ gering, was auch an dem Variationskoeffizient von $V_x = 0,16$ ersichtlich ist. Eine weitere Reduktion der Streuung ist bei Berücksichtigung der Schubschlankheit a/d als weiteren Einflussparameter möglich (vgl. [13],[19]). Für die statistische Auswertung wurde eine LN-Normalverteilung verwendet. Um ein ausreichendes Sicherheitsniveau zu erreichen, wird im NA(D) der national regelbare Vorfaktor für Fundamente abweichend zu dem für Flachdecken vorgeschlagenen Wert auf $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_c$ reduziert. Der mit 0,93 etwas kleine 5%-Quantilwert wurde aufgrund der geringen Streuung und der vereinfachten Auswertung mit einer 5%-Quantile in den Beratungen zum NA(D) als akzeptabel angesehen. Bei Anwendung der NA(D)-Gleichung darf der in DIN EN 1992-1-1 geforderte Druckstrebnachweis am Stützenanschnitt entfallen. Die bei Fundamenten typischen kleinen u_0/d -Verhältnisse wurden bei der Herleitung des Vorfaktors $C_{Rd,c}$ bereits berücksichtigt. Eine Abminderung des Vorfaktors $C_{Rd,c}$ für kleine u_0/d -Verhältnisse – wie bei Flachdecken – ist deshalb bei Fundamenten nicht erforderlich.

Zum Durchstanznachweis bei Bodenplatten waren die Angaben im NA(D) nicht eindeutig und wurden daher im Rahmen der A1-Änderung zum NA(D) [22] überarbeitet und an die Durchstanzbemessung von Einzelfundamenten angeglichen. Da – soweit den Autoren bekannt – bisher keine experimentellen Untersuchungen zum Durchstanzverhalten von Bodenplatten durchgeführt wurden, wurden die Bemessungsgleichungen so kalibriert, dass sich für Bodenplatten das gleiche Sicherheitsniveau wie bei einer Berechnung nach DIN 1045-1 ergibt.

Die Durchstanztragfähigkeit von balkenartigen Fundamenten sollte, soweit diese Versagensart maßgebend wird, mit Gleichung (5) nachgewiesen werden. Der Abstand des kritischen Rundschnitts vom Stützenanschnitt a_{crit} ist dabei iterativ zu ermitteln.

Anhand einer Vergleichsrechnung werden in Bild 8 die Durchstanztragfähigkeiten für Einzelfundamente ohne Durchstanzbewehrung nach DIN 1045-1 (mit einem reduzierten Rundschnitt im Abstand $1,0d$ gemäß DAfStb-Heft 525 [24]), DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit den Regelungen des NA(D) und der schweizerischen SIA 262:2003 miteinander verglichen. Als Referenzbauteil für die Parameterstudie wird ein Einzelfundament der Abmessungen

$3,0\text{ m} \times 3,0\text{ m} \times 0,8\text{ m}$ mit einem Bewehrungsgrad von 0,5 % und einer Betonfestigkeit von 20 MPa gewählt. Die Stütze ist zentrisch angeordnet und hat einen quadratischen Querschnitt mit einer Seitenlänge von 0,4 m. Für die Vergleichsrechnungen wird ein für Hochbauten übliches G/Q -Verhältnis von 0,65/0,35 angesetzt. Zur besseren Vergleichbarkeit werden die rechnerischen Durchstanzwiderstände auf Gebrauchslastniveau über dem jeweils variierten Parameter aufgetragen. Die iterative Berechnung nach SIA 262 wird mit den Bemessungswerten der Materialfestigkeiten durchgeführt. Für die Berechnungen nach deutscher und europäischer Norm mit deutschem Anhang wird jeweils der konstante Lasterhöhungsfaktor für Innenstützen von 1,05 bzw. 1,10 berücksichtigt. SIA 262 verwendet zur Berücksichtigung einer Momenten-Querkraft-Interaktion anstelle eines Lasterhöhungsfaktors einen reduzierten kritischen Rundschnitt, der in der iterativen Berechnung berücksichtigt wird. Für Innenstützen wird in der Norm ein Reduktionsfaktor von $k_e = 0,9$ angegeben.

Der Einfluss der Schubschlankheit a/d wird in Bild 8 a verglichen. Aufgrund der vergleichsweise großen Abzugsfläche der Bodenpressungen berechnen DIN 1045-1/Heft 525 für a/d -Verhältnisse kleiner als etwa 2,0 deutlich größere Tragfähigkeiten als die beiden anderen Bemessungsvorschriften. Die sich für kleinere a/d -Verhältnisse ergebenden geringeren Tragfähigkeiten nach DIN EN 1992-1-1 und zugehörigem NA(D) sowie SIA 262 sind jedoch in guter Übereinstimmung mit den Beobachtungen in neueren Durchstanzversuchen an gedungenen Fundamenten (vgl. Abschnitt 2.2). Mit zunehmender Schubschlankheit a/d gleichen sich die rechnerischen Tragfähigkeiten der drei Normen an. In Bild 8 b sind die Durchstanzwiderstände auf Gebrauchslastniveau über der Betondruckfestigkeit aufgetragen. Im untersuchten Anwendungsbereich ermitteln alle drei Normen aufnehmbare Stützenlasten in ähnlicher Größenordnung, wobei DIN 1045-1/Heft 525 wiederum etwas höhere Lasten als die beiden anderen Normen ermittelt. Dies kann vermutlich auf die vergleichsweise große Abzugsfläche für die Bodenpressungen zurückgeführt werden. Für das gewählte a/d -Verhältnis von 1,73 ergibt sich bei einer Berechnung nach DIN EN 1992-1-1 ein iterativ ermittelter Abstand des kritischen Rundschnitts vom Stützenrand von $a_{crit} = 0,67d$ im Vergleich zu dem konstanten Wert von $1,0d$ bei einer Berechnung nach DIN 1045-1/Heft 525.

2.5 Durchstanzwiderstand von Fundamenten mit Durchstanzbewehrung

2.5.1 Allgemeines

Die Durchstanztragfähigkeit von Fundamenten mit Durchstanzbewehrung wird nach DIN EN 1992-1-1 analog zur Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken nachgewiesen. Die Auswertung von Durchstanzversuchen an Flachdecken [15] belegen jedoch, dass die Bemessungsgleichungen nach DIN EN 1992-1-1 zur Bestimmung der maximalen Durchstanztragfähigkeit und der Durchstanzbewehrungsmenge das geforderte Sicherheitsniveau signifikant unterschreiten. Daher wurden die Bemessungsgleichungen für durchstanzbewehrte Fundamente nach [1],[2] unter Berücksichtigung aktueller Forschungsergebnisse überarbeitet.

2.5.2 Maximaltragfähigkeit

Zur Überprüfung der Maximaltragfähigkeit von Einzelfundamenten und Bodenplatten stehen insgesamt zehn Versuche zur Verfügung, von denen acht Versuchskörper mit Bügeln und je ein Versuch mit Schrägstäben und Betonstahlstäben mit aufgeschweißten Ankerköpfen als Durchstanzbewehrung versehen waren. Der Vergleich von Durchstanzversuchen an Einzelfundamenten mit Durchstanzbewehrung mit der nicht modifizierten rechnerischen Maximaltragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 ergibt zwar einen sehr großen Mittelwert, aber auch eine sehr große Streuung [19]. Ähnlich wie bei schlankeren und dünneren Platten mit Durchstanzbewehrung [14],[15],[27] erscheint die Verwendung der Druckstrebentragfähigkeit eines Balkens zur Bestimmung der Maximaltragfähigkeit von durchstanzbewehrten Fundamenten nicht geeignet.

Weiterhin wird bedingt durch die bei Fundamenten üblichen, niedrigen Betondruckfestigkeiten und den oftmals im Vergleich zur statischen Nutzhöhe kleinen Stützenumfang der Nachweis der Maximaltragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 häufig auch für Fundamente ohne Durchstanzbewehrung maßgebend [19]. Rechnerisch kann dann die Tragfähigkeit durch die Anordnung einer Durchstanzbewehrung nicht weiter gesteigert werden. Dies steht jedoch im deutlichen Widerspruch zu den verfügbaren Versuchsergebnissen [8],[9],[10],[16],[25].

Für den NA(D) wurde daher ein anderer Ansatz zur Berechnung der Maximaltragfähigkeit von Fundamenten abgeleitet. Wie in DIN 1045-1 wurde die Maximaltragfähigkeit als ein Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung definiert. Die Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung wird dabei nach Abschnitt 2.4 bestimmt, um den Einfluss der Schubslankheit a/d zumindest indirekt über die davon abhängige unterschiedliche Neigung des Versagensrisses auch bei der Ermittlung der Maximaltragfähigkeit zu erfassen. Die Nachrechnung der Maximaltragfähigkeitsversuche nach Deutschem Anhang ergibt die in Bild 9 über der Schubslankheit a/d aufgetragenen Verhältniswerte $V_{test}/V_{Ru,max,NA(D)}$.

Solange keine weiteren Versuche vorliegen, wird die Maximaltragfähigkeit von Fundamenten in Analogie zu Flachdecken als 1,4-facher Wert der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung definiert:

$$v_{Rd,max} = 1,4 v_{Rd,c} \quad (8)$$

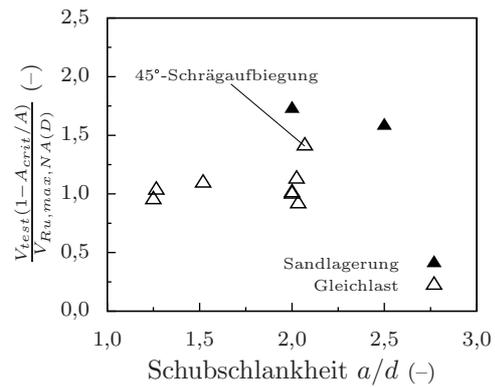


Bild 9. Nachrechnung von zehn Versuchen zur Maximaltragfähigkeit von Fundamenten mit den Gleichungen nach EN 1992-1-1 und zugehörigem NA(D)

Fig. 9. Comparison between ten punching tests on footings and maximum punching shear resistance according to EN 1992-1-1 and corresponding NA(D)

Hierbei ist $v_{Rd,c}$ die längs des kritischen Rundschnitts ohne Durchstanzbewehrung aufnehmbare Schubspannung nach Gleichung (5).

In Bild 10 wird die Maximaltragfähigkeit nach DIN 1045-1/Heft 525, DIN EN 1992-1-1 in Verbindung mit dem NA(D) und SIA 262 verglichen. Es wird dabei vorausgesetzt, dass die in dem Referenzfundament vorhandene Durchstanzbewehrungsmenge ausreicht, um ein vorzeitiges Versagen innerhalb und außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs zu verhindern. Da alle drei Normen die Maximaltragfähigkeit als Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung beschreiben, ergeben sich die gleichen Tendenzen wie für Fundamente ohne Durchstanzbewehrung (vgl. Bild 8).

Der Einfluss der Schubslankheit a/d wird in Bild 10 a verglichen. DIN 1045-1/Heft 525 berechnen aufgrund des größeren Abzugswertes für die Bodenpressungen bei gedrunge- nen Fundamenten ($a/d < 2,0$) deutlich größere Tragfähigkeiten als die beiden anderen Normen. In Bild 10 b ist die maximale Durchstanztragfähigkeit über der charakteristischen Betondruckfestigkeit f_{ck} aufgetragen. Die Tendenzen sind in beiden Diagrammen die gleichen wie für die Fundamente ohne Durchstanzbewehrung: DIN 1045-1/Heft 525 errechnen etwas höhere Tragfähigkeiten als die beiden anderen Bemessungsvorschriften. Für das gewählte a/d -Verhältnis von 1,73 ergibt sich bei einer Berechnung nach DIN 1045-1/Heft 525 eine vergleichsweise große Abzugsfläche für die Bodenpressungen und daraus resultierend relativ größere Tragwiderstände.

2.5.3 Bemessung der Durchstanzbewehrung

DIN 1045-1 ermittelt die erforderliche Durchstanzbewehrungsmenge mit einem 45°-Fachwerkmodell und einem variablen Betontraganteil. Zusätzlich ist durch die erste Bewehrungsreihe abzüglich eines geringen Betontraganteils nahezu die gesamte Querkraft aufzunehmen. Diese Forderung führt in der ersten Durchstanzbewehrungsreihe zu sehr großen erforderlichen Stahlquerschnitten, die sich oftmals nur schwer oder gar nicht einbauen lassen. Die Bestimmungsgleichung zur Ermittlung der Durchstanzbewehrungsmenge in Flachdecken nach DIN EN 1992-1-1 zusammen mit dem NA(D) (vgl. [15]) ergibt in der ersten Reihe ebenfalls deutlich vergrößerte Bewehrungsmengen, so dass dieser Ansatz wie auch der aus DIN 1045-1 für Fundamente

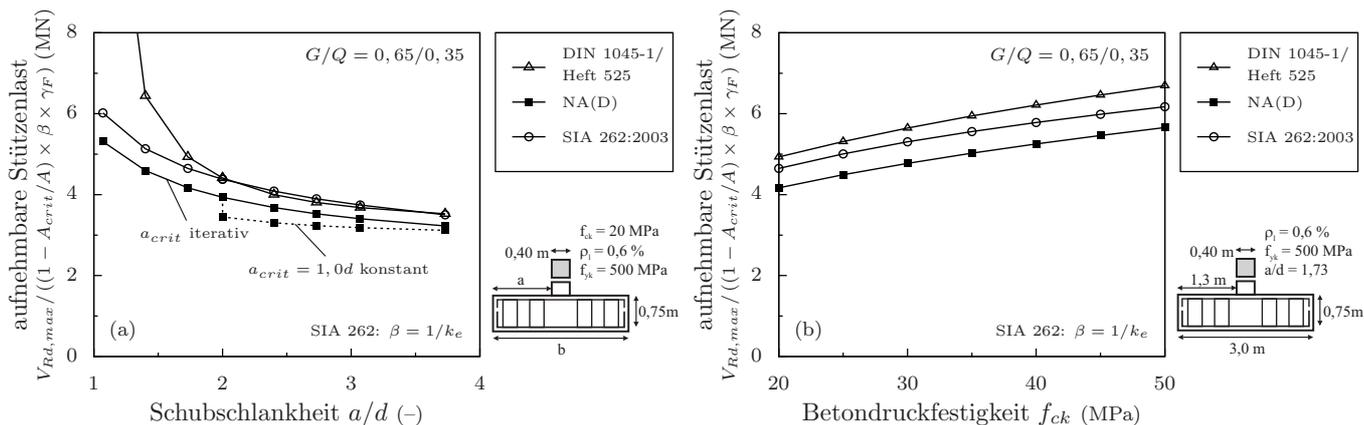


Bild 10. Aufnehmbare Stützenlast in Abhängigkeit der Schubslankheit a/d (a) und der Zylinderdruckfestigkeit des Betons f_{ck} (b) für Fundamente mit Durchstanzbewehrung

Fig. 10. Effect of the shear slenderness a/d (a) and the concrete compressive strength f_{ck} (b) on the maximum column force according to various codes for footings with shear reinforcement

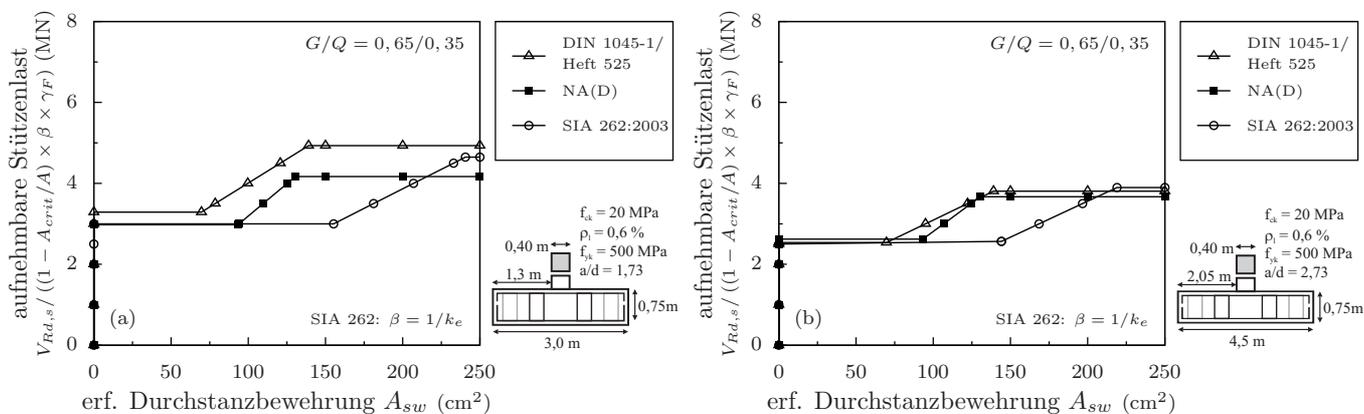


Bild 11. Vergleich der erforderlichen Durchstanzbewehrungsmengen für ein gedrungenes Fundamente (a) und ein schlankeres Fundament (b)

Fig. 11. Comparison of the shear reinforcement required for a compact (a) and a more slender footing (b)

als nicht praxistgerecht angesehen werden kann. Für Fundamente wurde daher zur Ermittlung des Durchstanzwiderstands innerhalb des durchstanzbewehrten Bereiches ein modifizierter Ansatz angegeben. In Anlehnung an das Aufhängefachwerk aus den allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für Doppelkopfanker [26] ist die einwirkende Querkraft $V_{Ed,red}$ von den im Bereich zwischen $0,3d$ und $0,8d$ angeordneten Bewehrungsreihen aufzunehmen. Ein Betontraganteil wird nicht berücksichtigt. Bei Annahme einer gleichmäßig verteilten Bodenpressung ergibt sich folgende Tragfähigkeit der durchstanzbewehrten Zone:

$$V_{Rd,s} = f_{ywd,ef} A_{sw,0,8d} \quad (9)$$

Hierbei sind $f_{ywd,ef} = 250 + 0,25d \leq f_{ywd}$ der wirksame Bemessungswert der Stahlspannung der Durchstanzbewehrung mit d in Millimeter (mm) und $A_{sw,0,8d}$ die Querschnittsfläche der Durchstanzbewehrung innerhalb eines Bereiches zwischen $0,3d$ und $0,8d$ vom Stützenanschnitt. Die einwirkende Querkraft V_{Ed} darf zur Bestimmung der Durchstanzbewehrungsmenge $A_{sw,0,8d}$ um die entlastenden Bodenpressungen mit $\Delta V_{Ed} = A_{crit} \sigma_b$ reduziert werden. Die Fläche A_{crit} ist die Fläche innerhalb des kritischen Rundschnitts im Abstand a_{crit} vom Stützenanschnitt, wobei a_{crit} mit Gleichung (5) zur Bestimmung des Durchstanzwiderstandes ohne Durchstanzbewehrung zu ermitteln ist und σ_b ist die mittlere Sohlspannung innerhalb der Fläche A_{crit} . Alternativ ist für schlanke

Fundamente mit $a/d > 2,0$ und Bodenplatten auch der vereinfachte Ansatz mit Abzug von 50% der Bodenpressungen innerhalb eines konstanten Abstandes $1,0d$ zur Stütze möglich.

Sind mehr als zwei Reihen Durchstanzbewehrung notwendig, ist der erforderliche Bewehrungsquerschnitt der weiteren Reihen außerhalb von $0,8d$ für 33 % der einwirkenden Querkraft unter Berücksichtigung der effektiven Streckgrenze $f_{ywd,ef}$ zu bemessen. Die Bodenpressung innerhalb der betrachteten Bewehrungsreihe darf dabei vollständig von der einwirkenden Querkraft abgezogen werden.

In Bild 11 wird die aufnehmbare Stützenlast nach DIN 1045-1, NA(D) und SIA 262 in Abhängigkeit der Durchstanzbewehrungsmenge in den ersten beiden Bewehrungsreihen für ein gedrungenes und ein schlankeres Einzelfundament verglichen. SIA 262 verwendet zur Berücksichtigung einer Moment-Querkraft-Interaktion einen reduzierten kritischen Rundschnitt (vgl. Abschnitt 2.4). Die errechnete Durchstanzbewehrung ist ebenfalls auf diesen verkürzten Rundschnitt zu beziehen, so dass sich bei einem Abminderungsfaktor von $k_e = 0,90$ für Innenstützen insgesamt eine erforderliche Durchstanzbewehrungsmenge für die ersten beiden Reihen von $2 \times A_{sw}/k_e$ ergibt.

Für die beiden gewählten Beispielfundamente liegt die Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung nach allen drei Normen auf dem gleichen Niveau. Für das gedrungene Fundament errechnet DIN 1045-1/Heft 525 eine etwas kleinere

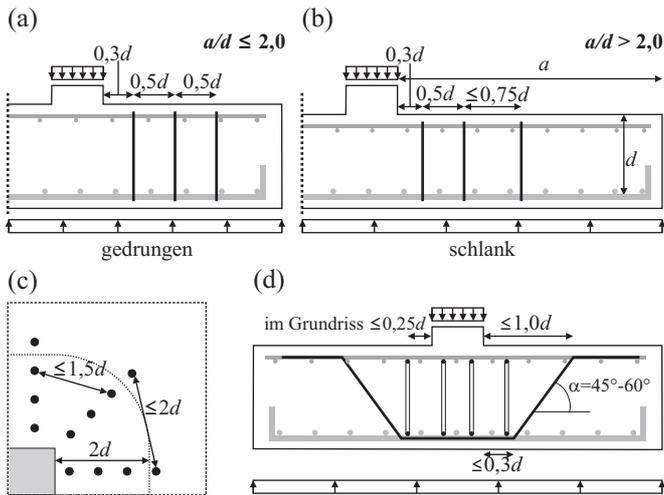


Bild 12. Zulässige radiale Bügelabstände für gedrungene (a) und schlanke Fundamenten (b), zulässige tangentielle Bügelabstände im Grundriss (c) sowie zulässige Abstände für Schrägstäbe (d)
 Fig. 12. Allowable radial spacing of stirrups for compact (a) and slender (b) footings, allowable tangential spacing of stirrups (c), and allowable spacing of bent-up bars (d)

erforderliche Durchstanzbewehrungsmenge als DIN EN 1992-1-1 mit NA(D) (Bild 11 a). Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich bei einer Berechnung nach DIN 1045-1 für a/d -Verhältnisse kleiner als 2,0 vergleichsweise große Abzugsflächen für die Bodenpressungen und damit große aufnehmbare Querkräfte ergeben. Für das schlankere Fundament ermitteln beide Rechenvorschriften nahezu die gleiche erforderliche Durchstanzbewehrungsmenge (Bild 11 b). Nach SIA 262 ist die Durchstanzbewehrung mit einem 45°-Fachwerkmodell für die gesamte einwirkende Querkraft zu bemessen (volle Schubdeckung). Dieses konservative Vorgehen führt zu deutlich größeren Bewehrungsmengen als die Berechnungen der beiden anderen Normen. Die Maximaltragfähigkeit ist erreicht, wenn eine Vergrößerung des Querschnitts der Durchstanzbewehrung keine weitere Traglaststeigerung bewirkt. Für das gedrungene Fundament ist die Maximaltragfähigkeit nach DIN EN 1992-1-1 mit NA(D) etwas geringer als nach den beiden anderen Bemessungsvorschriften. Wohingegen für das schlankere Fundament die Maximaltragfähigkeiten nach allen drei Normen auf nahezu gleichem Niveau liegen (vgl. Abschnitt 2.5.2).

Werden Schrägstäbe als Durchstanzbewehrung verwendet, kann aufgrund der höheren Verankerungsqualität die Stahlspannung bis zur Streckgrenze f_{ywd} ausgenutzt werden. In Anlehnung an Heft 525 des DAfStb [24] darf die effektive Querschnittsfläche des Schrägstabes mit einem Faktor von 1,3 erhöht werden, da der Schrägstab den Stanzkegel unabhängig von seiner Neigung schneidet und sich so ein günstigeres Tragverhalten einstellt. Wie bei einer Durchstanzbewehrung aus lotrecht angeordneten Bügeln darf bei Anordnung von Schrägstäben die einwirkende Querkraft um die Sohlpressung innerhalb des kritischen Rundschnitts (mit Gl. (5) zu ermitteln) reduziert werden. Die Durchstanztragfähigkeit der Schrägstäbe ergibt sich zu:

$$V_{Rd,s} = 1,3 f_{ywd} A_{sw,schräg} \sin \alpha \quad (10)$$

Hierbei sind $A_{sw,schräg}$ die Querschnittsfläche und f_{ywd} die Bemessungstreckgrenze der Schrägstäbe.

2.5.4 Tragfähigkeit außerhalb des durchstanzbewehrten Bereichs
 Der Nachweis der Durchstanztragfähigkeit außerhalb der Durchstanzbewehrung bestimmt die erforderliche Länge des durchstanzbewehrten Bereiches. Der Nachweis ist in einem Rundschnitt u_{out} im Abstand 1,5d von der äußersten Bewehrungsreihe mit der Querkrafttragfähigkeit der liniengelagerten Platte (Gleichung (6.2) aus DIN EN 1992-1-1 und $C_{Rd,c} = 0,15/\gamma_C$) zu erbringen. Die Bodenpressungen innerhalb der äußersten Bewehrungsreihe wirken entlastend und dürfen von der einwirkenden Querkraft abgezogen werden.

2.6 Mindestdurchstanzbewehrung

Für Einzelfundamente und Bodenplatten ist eine Mindestdurchstanzbewehrung nicht erforderlich, da das Bemessungskonzept keinen Betontraganteil vorsieht und daher die einwirkende Querkraft über das Aufhängefachwerk in der Fundamentplatte weitergeleitet wird.

2.7 Konstruktive Durchbildung

Zur Sicherstellung einer möglichst schlupfarmen Verankerung der Durchstanzbewehrung in der Fundamentplatte ist der Durchmesser der Bügel auf die statische Nutzhöhe der Platte mit $\sigma_w \leq 0,05d$ abzustimmen. Aufgrund der bei Fundamenten steileren Neigung des Versagensrisses ist die Durchstanzbewehrung in mindestens zwei Reihen mit im Vergleich zu Flachdecken kleineren Abständen um die Stütze anzuordnen. Für den NA(D) wurde festgelegt, dass die erste Reihe im Abstand von 0,5d und die zweite Reihe nicht weiter als 0,8d vom Stützenanschnitt anzuordnen ist. Bei schlanken Einzelfundamenten mit $a/d > 2,0$ oder Bodenplatten darf der radiale Abstand ab der zweiten Reihe auf 0,75d erhöht werden (Bild 12 b). Für gedrungene Einzelfundamente ist der radiale Abstand s_r zwischen den ersten drei Bewehrungsreihen auf 0,5d zu begrenzen (Bild 12 a). Innerhalb eines Abstandes von 2,0d zum Stützenanschnitt sind die tangentialen Abstände der Durchstanzbewehrung auf $s_t \leq 1,5d$ begrenzt. Ist außerhalb von 2,0d noch eine weitere Durchstanzbewehrungsreihe erforderlich, darf der tangentielle Abstand auf 2,0d erhöht werden (Bild 12 c). Wie in Flachdecken ist eine schlupfarme Ausführung der Bügelverankerung sicherzustellen. Dies kann erreicht werden, indem mindestens 50 % der erforderlichen Längsbewehrung durch die Bügel umschlossen wird. Dabei ist, wie für eine Bügelbewehrung üblich, ein Längsstab je Bügelecke anzuordnen.

Die Verankerung von Schrägstäben mit den horizontalen Abbiegungen innerhalb der Längsbewehrungslagen ist effektiver als bei einer Bügelbewehrung, daher sind Schrägstäbe mit Stabdurchmesser $\sigma_w \leq 0,08d$ zulässig. Im Grundriss dürfen die aufgebogenen Stäbe bis maximal 0,25d neben der Stütze als Durchstanzbewehrung angerechnet werden. Die Neigung α der Aufbiegung gegenüber der Plattenebene sollte zwischen 45° und 60° liegen. Aufgrund der steileren Neigung des Versagensrisses wird von den Autoren empfohlen, die stützennahe Abbiegung in einem Bereich bis maximal 0,3d und die äußere Abbiegung in einem Bereich bis maximal 1,0d vom Stützenanschnitt anzuordnen (Bild 12 d).

3 Zusammenfassung

Die Durchstanzbemessung von Fundamenten wird in DIN EN 1992-1-1 und dem Nationalen Anhang für Deutschland NA(D) neu geregelt. Während häufig in anderen Normen die Bemessungsgleichungen für Flachdecken mit klei-

nen Änderungen für Fundamente übernommen wurden, hat nach neueren Untersuchungen die Schubslankheit neben den bekannten Einflussfaktoren wie der Betondruckfestigkeit, dem Biegebewehrungsgrad oder dem Maßstabeffekt einen wesentlichen Einfluss auf die Fundamenttragfähigkeit. Die wichtigsten Anpassungen zur Durchstanzbemessung von Fundamenten können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Neigung des Durchstanzkegels nimmt mit abnehmender Schubslankheit zu. Dieser Effekt wird durch die in DIN EN 1992–1–1 vorgegebene iterative Ermittlung des Abstands des kritischen Rundschnitts vom Stützenanschnitt realitätsnah berücksichtigt.
- Nach NA(D) ergeben sich für gedrungene Fundamente ohne und mit Durchstanzbewehrung kleinere Bruchlasten als nach DIN 1045–1. Mit zunehmender Schubslankheit a/d gleichen sich die rechnerischen Tragfähigkeiten an.
- Nach Vergleichen mit Versuchen unterschätzt die maximale Durchstanztragfähigkeit nach DIN EN 1992–1–1, die

analog zur Druckstreben­tragfähigkeit eines Balken geregelt ist, das in Deutschland übliche Sicherheitsniveau deutlich. Im NA(D) wird daher die Maximaltragfähigkeit von Fundamenten als Vielfaches der Tragfähigkeit ohne Durchstanzbewehrung bestimmt.

- Für eine praxisgerechte Bewehrungsanordnung am Stützenanschnitt wird im NA(D) der erforderliche Bewehrungsquerschnitt für Fundamente mit einem Aufhängewerk im Bereich $0,3d$ bis $0,8d$ bestimmt.
- Außerhalb der Durchstanzbewehrung ist die Querkrafttragfähigkeit des Fundaments im Abstand $1,5d$ zur äußersten Bewehrungsreihe nachzuweisen.

Die vorgestellten Untersuchungen wurden aus Mitteln der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und des Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) finanziert, denen an dieser Stelle herzlich gedankt sei.

Literatur

- [1] DIN EN 1992–1–1: 2011–01. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung DIN EN 1992–1–1:2004 + AC:2010
- [2] DIN EN 1992–1–1/NA: 2011–01. Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [3] DIN 1045–1:2008–08. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 1: Bemessung und Konstruktion.
- [4] SIA 262: 2003–04. Betonbau. – Schweizer Norm SN 505 262
- [5] *Muttoni, A.*: Punching Shear Strength of Reinforced Concrete Slabs without Transverse Reinforcement. In: *ACI Structural Journal* 105 (2008), S. 440–450
- [6] *Fernandez Ruiz, M.; Muttoni, A.*: Applications of the critical shear crack theory to punching of R/C slabs with transverse reinforcement. In: *ACI Structural Journal* 106 (2009), S. 485–494
- [7] *Andrä, H.-P.*: Zum Tragverhalten des Auflagerbereichs von Flachdecken. Dissertation Universität Stuttgart, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen, 1982
- [8] *Dieterle, H.; Rostásy, F. S.*: Tragverhalten quadratischer Einzelfundamente aus Stahlbeton. In: *Schriftenreihe des DAfStb*, Heft 387. Berlin: Ernst & Sohn, 1987, S. 5–91
- [9] *Hegger, J.; Ricker, M.; Sherif, A.G.*: Punching strength of reinforced concrete footings. In: *ACI Structural Journal* 106 (2009), S. 706–716
- [10] *Hegger, J.; Ziegler, M.; Ricker, M.; Kürten, S.*: Experimentelle Untersuchungen zum Durchstanzen von gedrun­genen Fundamenten unter Berücksichtigung der Boden-Bauwerk-Interaktion. In: *Bauingenieur* 85 (2010), S. 87–96
- [11] *Hegger, J.; Ricker, M.; Ulke, B.; Ziegler, M.*: Untersuchungen zum Durchstanzverhalten von Stahlbetonfundamenten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006), Nr. 4, S. 233–243
- [12] *Hegger, J.; Ricker, M.; Ulke, B.; Ziegler, M.*: Investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings. In: *Engineering Structures* 29 (2007), S. 2233–2241
- [13] *Hegger, J.; Ricker, M.; Häusler, F.*: Zur Durchstanzbemessung von ausmittig beanspruchten Stützenknoten und Einzelfundamenten nach Eurocode 2. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), S. 723–734
- [14] *Hegger, J.; Häusler, F.; Ricker, M.*: Zur Durchstanzbemessung von Flachdecken nach Eurocode 2. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 103 (2008), Heft 2, S. 93–102
- [15] *Siburg, C.; Häusler, F.; Hegger, J.*: Durchstanzen von Flachdecken nach NA(D) zu Eurocode 2. In: *Bauingenieur* 87 (2012), S. 216–225
- [16] *Hegger, J.; Sherif, A.G.; Ricker, M.*: Experimental investigations on punching behavior of reinforced concrete footings. In: *ACI Structural Journal* 103 (2006), S. 604–612
- [17] Dassault Systèmes Simulia Corp.: Abaqus Version 6.7-EF Documentation. Providence, RI, USA: Dassault Systèmes, 2007
- [18] *Ricker, M.*: Numerische Untersuchungen zum Durchstanzen von gedrun­genen Einzelfundamenten. In: *Bauingenieur* 86 (2011), S. 443–453
- [19] *Ricker, M.*: Zur Zuverlässigkeit der Bemessung gegen Durchstanzen bei Einzelfundamenten. Dissertation RWTH Aachen, Lehrstuhl und Institut für Massivbau (IMB), 2009
- [20] BS 8110 Draft Februar 1982. The structural use of concrete (draft revision of CP 110)
- [21] CEB-FIP Model Code 1990 193. Design Code
- [22] E DIN EN 1992–1–1/NA/A1:2012–06: Nationaler Anhang – National festgelegte Parameter – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1–1/NA: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Veröffentlichung als Weißdruck geplant in 12/2012
- [23] DIN-Fachbericht 102 März 2009. Betonbrücken
- [24] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb: Erläuterungen zu DIN 1045–1. Berlin: Beuth, 2010 (Schriftenreihe des DAfStb. Heft 525, 2. Auflage)
- [25] *Timm, M.*: Durchstanzen von Bodenplatten unter rotationssymmetrischer Belastung. Dissertation Technische Universität Carolo-Wilhelmina, Braunschweig, 2003
- [26] Zulassung NR. Z-15.1–213: HDB System Durchstanzbewehrung nach DIN 1045–1. Berlin: Deutsches Institut für Bautechnik, 2008
- [27] *Hegger, J.; Häusler, F.; Ricker, M.*: Zur maximalen Durchstanztragfähigkeit von Flachdecken. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 102 (2007), S. 770–777