

Einfluss exzentrischer Belastungen auf das Durchstantragverhalten

Jan Ungermann, Matthias Kalus, Josef Hegger

*Institut für Massivbau,
RWTH Aachen University,
Mies-van-der-Rohe-Straße 1, 52074 Aachen, Germany*

jungermann@imb.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Der Durchstanznachweis stellt bei der Bemessung von punktförmig gestützten Platten infolge der konzentrierten Lasteinleitung oftmals den maßgebenden Nachweis dar. Dabei ist in der Regel der Einfluss zusätzlich wirkender Biegemomente zu berücksichtigen. Während das Durchstanzen zentrisch belasteter Platten vielfach untersucht wurde, liegen zu exzentrischen Beanspruchungen – insbesondere für Einzelfundamente – nur wenige Untersuchungen vor. In einem Forschungsvorhaben wurden daher 14 exzentrisch belastete und vier zentrisch belastete Durchstanzversuche an Einzelfundamenten im Realmaßstab durchgeführt. Die Untersuchungen belegen einen signifikanten Einfluss von Lastexzentrizitäten auf das Durchstantragverhalten. Mit zunehmender Ausmitte nehmen die Verformungen überproportional zu, der Durchstanzkegel bildet sich nur noch unvollständig aus und die Durchstanztragfähigkeit reduziert sich signifikant. Dabei treten Lastumlagerungen von der höherbelasteten Fundamenthälfte, in der die Schubrisse schon weit fortgeschritten sind, zur weniger belasteten Hälfte auf. Das Bauteilversagen tritt bei exzentrischer Beanspruchung folglich nicht mit der vollständigen Schubrissebildung auf der höherbelasteten Fundamenthälfte ein, vielmehr finden Lastumlagerungen auf die weniger belastete Hälfte statt. Dies kann anhand von Dehnungsmessungen am Stützenanschnitt belegt werden, die zudem eine reduzierte Ausbildung des mehraxialen Druckspannungszustandes aufzeigen. Die abschließende Auswertung des Ansatzes zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Beanspruchungen der stabilen Fassung des neuen Eurocode 2 zeigt Optimierungspotential hinsichtlich der Berücksichtigung des Einflusses exzentrischer Beanspruchungen auf das Tragverhalten von Einzelfundamenten.

Keywords: Durchstanzen, exzentrische Belastungen, Einzelfundamente

Abstract

The punching shear verification is often the decisive verification in design of flat slabs and footings due to the concentrated load introduction. As result of imperfections and asymmetric loadings, the influence of additionally acting bending moments needs to be considered. While the punching shear behavior of centrally loaded slabs has been studied many times, only a few studies are available for eccentric loads, especially for footings. Therefore, 14 eccentrically and four centrally loaded punching shear tests of footings were conducted in a research project. Hereby, a significant influence of load eccentricities on the punching shear behavior is revealed, resulting in increased deformation, incomplete formation of a punching shear cone and a significant reduction in punching shear capacity with increasing eccentricity. This results in load redistributions from the higher loaded side with significant shear cracking to the less loaded side. Therefore, the failure of the slab does not comply with the shear crack formation on the higher loaded side for eccentric loading, instead load redistribution takes place to the less loaded side. This can be verified by strain measurements at the column-footing connection, which also show a reduced formation of a multi-axial compressive state. Finally, the evaluation of the design approach of the stable version of new Eurocode 2 for considering the non-uniform stress distribution shows potential for optimizing the consideration of the influence of unbalanced moments on the load-bearing behavior of footings.

Keywords: punching shear, unbalanced moments, column bases

1 Einleitung

Nach umfangreichen Untersuchungen zum Durchstantragverhalten von zentrisch belasteten Einzelfundamenten (z. B. [1–8]) und Flachdecken (z. B. [9–19]) mit und ohne Durchstanzbewehrung sind neben den Einflüssen aus Betondruckfestigkeit und Längsbewehrungsgrad auch geometrische Größen (z. B. Schubschlankheit) von entscheidender Bedeutung für das Tragverhalten. Die Annahme einer ideal zentrisch belasteten Stütze stellt in der Praxis aufgrund auftretender Lastexzentrizitäten infolge herstellungsbedingter Imperfektionen und planmäßigen Ausmitten jedoch einen Sonderfall dar. Während das Tragverhalten von schlanken Flachdecken unter exzentrisch angreifender Stützenlast bei Rand- und Eckstützen experimentell untersucht wurde (z.B. [20–26]), ist das Tragverhalten von Einzelfundamenten mit exzentrischer Belastung bisher nur wenig erforscht. Einige wenige Untersuchungen wurden von Kordina und Nölting [27, 28] sowie von Zhang et. al [29] durchgeführt. Während Kordina und Nölting [27, 28] den Einfluss exzentrischer Belastung an Einzelfundamenten mit sechs einaxialen und einer zwei axialen Lastausmitte für eine statische Nutzhöhe von $d \leq 0,34$ m untersuchten, führten Zhang et. al [29] drei Versuche ($d = 0,14$ m) mit gleicher einaxialer Lastausmitte und variierenden Längsbewehrungsgraden ohne Referenzversuche durch. Folglich repräsentieren die wenigen Untersuchungen keine baupraktischen Abmessungen. Bei Zhang et. al ist eine Auswertung des Lasteinflusses durch den fehlenden Referenzversuch zudem nicht möglich.

Daher wurden insgesamt 18 Durchstanzversuche an Einzelfundamenten ohne Durchstanzbewehrung [30–32], aufgeteilt in vier Versuchsreihen, durchgeführt. Innerhalb jeder Serie wurde die Lastexzentrizität systematisch von $e/b = 0$ bis $e/b = 1/6$ erhöht. Hierbei fand eine systematische Abstufung der ein- und zwei axialen Lastausmitten in vier Versuchsreihen jeweils mit einem Referenzversuch statt, um die Einflüsse unterschiedlicher Schubschlankheiten ($a_x/d = 1,25$ bis $a_x/d = 2,07$), Stützgeometrien ($c_x/c_y = 1,0$ und $c_x/c_y = 2,0$) und -größen ($u_o/d = 3,0$ und $u_o/d = 4,15$) unter exzentrischen Belastungen zu charakterisieren. Dieser Beitrag stellt die wesentlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens dar.

2 Experimentelle Untersuchungen

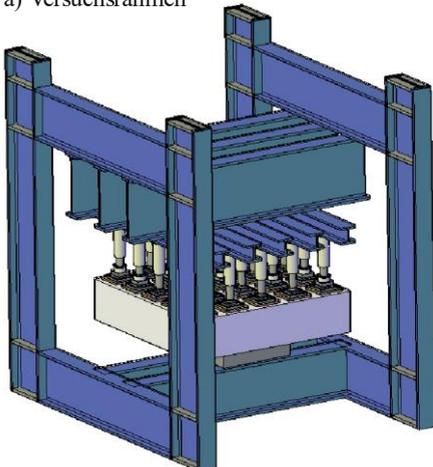
2.1 Allgemeines

Das Forschungsvorhaben umfasste insgesamt 18 Versuche an Einzelfundamenten ohne Durchstanzbewehrung, unterteilt in vier Serien (EF1 bis EF4). Die geometrischen Randbedingungen der Serien unterschieden sich jeweils nur in einem Parameter in Bezug zur Referenzserie EF2 und sind in Tab. 1 zusammengefasst.

2.2 Versuchsbeschreibung

Die Versuchskörper wurden hierbei mit der Sohlfläche nach oben auf der Stütze stehend mit 25 symmetrisch angeordneten Zylindern belastet (Bild 1 a)).

a) Versuchsrahmen



b) Sohldruckverteilung bei einer zwei axialen Lastexzentrizität

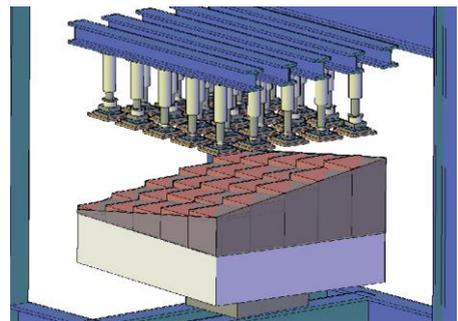


Bild 1: Darstellung des Versuchsaufbaus und der linearen Sohldruckverteilung

Somit wurde eine gleichmäßige Sohlpressung simuliert. Das Aufbringen einer linear veränderlichen Sohldruckverteilung wurde durch eine abgestufte Laststeuerung der 25 Zylinder realisiert (Bild 1 b)).

Tab. 1: Geometrische Versuchsparameter der durchgeführten Versuche

Versuch	h	d_m	c_x	b_x	b_y	c_x/c_y	u_0/d	a_1/d	$f_{c,cyl}$	ρ_1	e_x/b_x	e_y/b_y	V_{test}	Parameter	
	[m]	[m]	[m]	[m]	[m]	[-]	[-]	[-]	[MPa]	[%]	[-]	[-]	[kN]		
EF1-0		0,598					3,01	1,25	24,5	0,79	0	0	7136	a ₁ /d	
EF1-1/18		0,600					3,00	1,25	22,2	0,79	1/18	0	6311		
EF1-1/9	0,65	0,597	0,45	1,95	1,95	1,0	3,02	1,26	24,8	0,80	1/9	0	5610		
EF1-1/6		0,598					3,01	1,26	20,7	0,79	1/6	0	4004		
EF1-1/9Z		0,599					3,01	1,25	23,9	0,78	1/18	1/18	5432		
EF1-1/6Z		0,600					3,00	1,25	21,9	0,78	1/12	1/12	5634		
EF2-0		0,600					3,00	2,00	23,4	0,77	0	0	5334	Referenz	
EF2-1/18		0,599					3,01	2,00	21,5	0,77	1/18	0	3785		
EF2-1/9	0,65	0,600	0,45	2,85	2,85	1,0	3,00	2,00	21,5	0,77	1/9	0	3683		
EF2-1/6		0,599					3,01	2,00	21,2	0,77	1/6	0	3175		
EF2-1/9Z		0,600					3,00	2,00	21,8	0,76	1/18	1/18	3944		
EF2-1/6Z		0,599					3,01	2,00	22,3	0,77	1/12	1/12	3597		
EF3-0		0,600					3,00	2,00	20,8	0,74	0	0	4317	c _x /c _y	
EF3-1/9	0,65	0,600	0,60	3,00	2,70	2,0	3,00	2,00	23,4	0,74	1/9	0	2810		
EF3-1/6		0,600					3,00	2,00	24,6	0,73	1/6	0	3130		
EF4-0		0,579					4,15	2,07	19,7	0,76	0	0	5757	u ₀ /d	
EF4-1/9	0,63	0,579	0,60	3,00	3,00	1,0	4,15	2,07	26,1	0,76	1/9	0	3937		
EF4-1/6		0,578					4,15	2,08	24,3	0,76	1/6	0	3518		

h : Fundamentdicke; d_m : Mittelwert der statischen Nutzhöhe; c_x, c_y : Kantenlänge der Stütze in x- und y-Richtung; b_x, b_y : Kantenlänge des Fundamentes in x- und y-Richtung; c_x/c_y : Verhältniswert der Stützengeometrie; u_0/d : bezogener Stützenumfang; a_1/d : Schubslankheit; $f_{c,cyl}$: mittlere Zylinderdruckfestigkeit; ρ_1 : gemittelter Längsbewehrungsgrad; $e_x/b_x, e_y/b_y$: auf Kantenlänge des Fundamentes bezogene Ausmitte in x- und y-Richtung; V_{test} : Bruchlast.

Dazu wurden jeweils ein bis fünf Zylinder in Abhängigkeit der zu realisierenden Exzentrizität in jeweils gleichmäßig belastete Druckstufen zusammengefasst (9 Druckstufen für zweiaxiale Ausmitten in Bild 1 b)). Die unterschiedlichen Druckstufen wurden mit Proportionalventilen in einem einzelnen Ölkreislauf realisiert. Das infolge der ungleichmäßigen Sohldruckspannung entstehende Moment wurde durch gebogene Biegebewehrungsstäbe aus hochfestem Stahl mit Gewinde im Versuchsrahmen verankert (detaillierte Beschreibung in [30, 31]).

Zur Untersuchung der Bruchkinematik erfolgte die Messung der Verformungen jeweils an den Außencken des Fundamentes und der Stützen sowie auf den zwei höchstbelasteten Hauptachsen und der höchstbelasteten Diagonale mit induktiven Wegaufnehmern. Zusätzlich wurde die Dickenänderung der Platte zur Untersuchung der inneren Schubrisse auf einer Haupt- und einer Diagonalachse auf der Fundamenthälfte mit Lastexzentrizität (lastnah) korrespondierend mit den Durchbiegungsmessungen aufgezeichnet. Neben der Messung der Stützeindrungen wurden die Betondehnungen in der Druckzone und die Dehnungen in der Biegezugbewehrung mit Dehnungsmessstreifen erfasst.

An der Stützen-Fundament-Verbindung wurden zudem Dehnungsmessungen mittels speziell angefertigten Dehnungsmessgeräten sowie quasi-kontinuierliche faseroptische Messungen mittels Glasfasern durchgeführt, um neue Erkenntnisse zur Ausbildung des Druckrings zu gewinnen. Dieser sich beim Durchstanzen einstellende mehraxiale Druckspannungszustand am Stützenanschnitt (Druckring) führt zu einer höheren Querkrafttragfähigkeit verglichen mit dem einaxialen Querkraftabtrag. Daher

leisten die neuen Erkenntnisse einen wesentlichen Beitrag zum Verständnis des Durchstantragsversagens, sowohl für zentrische als auch für exzentrische Belastungen. Die ausführliche Darstellung der Messtechnik und aller Ergebnisse ist in [30–32] dargestellt.

2.3 Last-Verformungsverhalten

Während der Lastaufbringung wurde das Verformungsverhalten der Versuchskörper kontinuierlich gemessen. Die in Bild 2 dargestellten Diagramme untersuchen den Einfluss einaxialer Lastausmittungen auf das Last-Verformungsverhalten der Serie EF1 sowie den Einfluss der Schubschlankheit auf das Last-Verformungsverhalten für die zweiaxiale Ausmitte von $e/b = 1/6$ anhand von EF1-1/6Z und EF2-1/6Z. Dargestellt sind jeweils die relativen Verformungen zwischen den äußeren Messstellen in den Fundamentecken (W5-W8) und den inneren Wegaufnehmern (W1-W4) am Stützenanschnitt (vgl. Erläuterung in Bild 2). Die lastnahen Verformungen (jeweils in der rechten Diagrammseite in Bild 2) basieren bei den einaxialen Ausmittungen auf dem Mittelwert der Wegaufnehmer W6 und W7 sowie W2 und W3, während W5 und W8 sowie W1 und W4 zur Bestimmung der relativen lastfernen Verformung (jeweils in der linken Diagrammseite) herangezogen werden. Bei den zweiaxialen Ausmittungen erfolgt die Bestimmung der lastnahen Verformung mit W7/W3 und die der lastfernen mit W5/W1. Zusätzlich wird basierend auf W6 und W8 das Verformungsverhalten senkrecht zur Ausmittenhauptachse („Ecken“) untersucht.

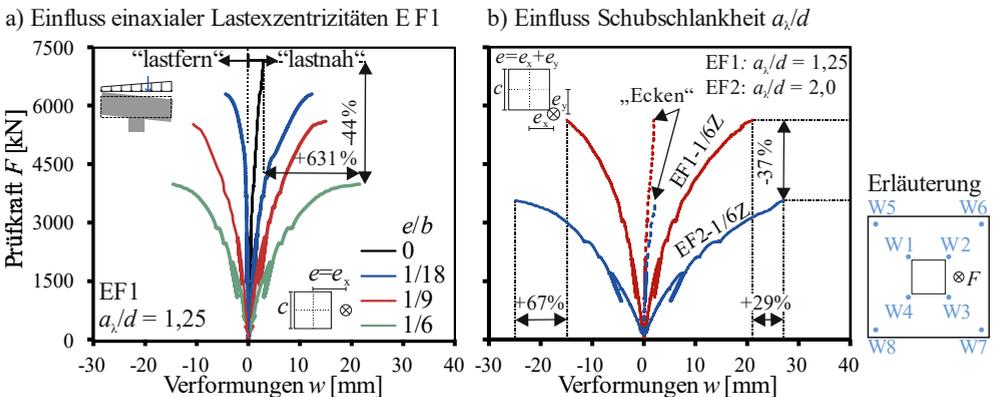


Bild 2: Last-Verformungskurven zur Beurteilung ausgewählter Einflussfaktoren

Die in Bild 2 a) dargestellten Last-Verformungskurven der baugleichen Versuchskörper der Versuchsserie EF1 verdeutlichen den signifikanten Einfluss der Lastexzentrizitäten auf das Tragverhalten von Einzelfundamenten. Während die Tragfähigkeit bei der größten einaxialen Ausmitte $e/b = 1/6$ um etwa 44 % abnimmt, erhöht sich die Verformung auf der höherbelasteten Fundamenthälfte („lastnah“) um mehr als das sechsfache (631 %). Auf der anderen Fundamenthälfte („lastfern“) entstehen hingegen infolge der linearen Sohldruckverteilung negative Verformungen, die betragsmäßig kleiner sind als die Verformungen auf der lastnahen Seite.

Bereits in vorangegangenen Untersuchungen [3, 33, 34] wurde festgestellt, dass die Durchstantragfähigkeit von Einzelfundamenten mit und ohne Durchstantragsbewehrung mit abnehmender Schubschlankheit ansteigt. Der Vergleich der Last-Verformungskurven der zweiaxial belasteten Versuchskörper EF2-1/6Z und EF1-1/6Z in Bild 2 b) bestätigen diesen Trend erwartungsgemäß auch für exzentrische Belastungen. Neben einer um 37 % geringeren Tragfähigkeit war zudem eine 29 % höhere Verformung auf der lastnahen Seite bei dem schubslanken Versuchskörper (EF2-1/6Z) festzustellen. Die Verformungskurven der „Ecken“ stellen die Messwerte auf der Diagonalachse senkrecht zur Ausmittenhauptachse dar. Infolge der hier gleichmäßig wirkenden Sohldruckverteilung entspricht das Verformungsverhalten der „Ecken“ dem der zentrischen Referenzversuche.

Folglich vergrößern kleinere Schubschlankheiten die Tragfähigkeiten und vermindern die Verformungen. Exzentrisch wirkende Belastungen führen zu reduzierten Durchstantragfähigkeiten bei gleichzeitig signifikant höheren Verformungen.

2.4 Schubrissbildung

Zur Untersuchung der Versagensart wurde nach dem Versuch die Rissbildung auf der Fundamentsohle und die innere Rissbildung anhand von Sägeschnitten dokumentiert (Bild 3 a - d)). Zusätzlich wurden die Zuwächse der Plattendicke infolge der inneren Schubrissbildung durch Dickenmessungen bestimmt, die in Bild 3 e) und f) dargestellt sind.

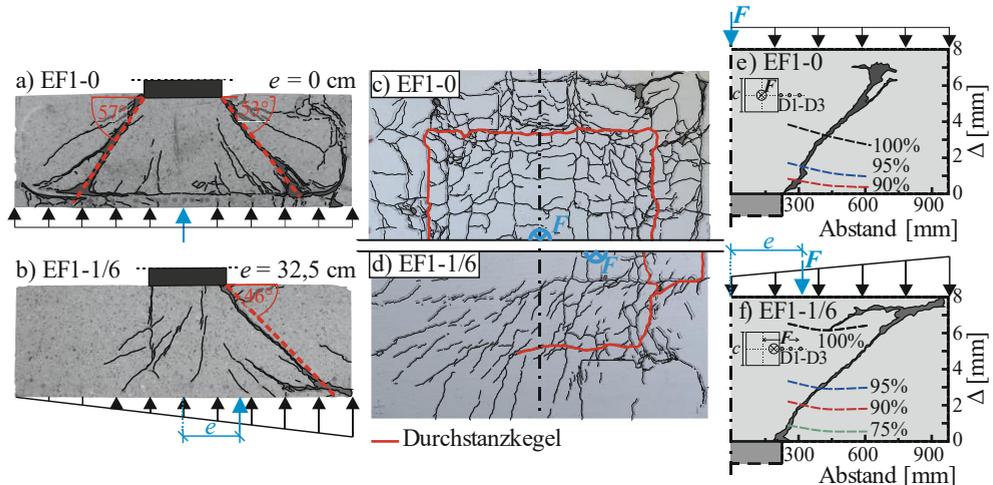


Bild 3: Rissbildung und Messung der Dickenänderung für ausgewählte Versuche

Erwartungsgemäß bildet sich der Durchstantragkegel bei dem Referenzversuch EF1-0 ohne Lastexzentrizität vollständig und nahezu symmetrisch mit einer gemittelten Neigung von $\alpha \approx 55^\circ$ aus (Bild 3 a), c)). Die Zunahme der Plattendicke, die als Anhaltspunkt für die Schubrissöffnung gedeutet wird, ist im Versuch EF1-0 in Bild 3 e) mit einer geringen Schubschlankheit von $a/d = 1,25$ überwiegend gleichmäßig verteilt mit leicht höheren Werten in Stützennähe. Das Versagen kündigt sich bei EF1-0 mit einer Dickenänderung von ~ 1 mm bei $V/V_{\text{test}} = 90\%$ an und steigt bis zum Bruch auf etwa 4 mm an. Im Gegensatz dazu waren bei den zentralen belasteten Versuchskörpern mit größerer Schubschlankheit $a/d \approx 2,0$ (EF2-0, EF3-0, EF4-0) bis zum Bruch nur geringe Dickenänderungen zu beobachten. Der Schubriss bildete sich hier folglich schlagartig und mit einer geringeren Neigung von $\alpha \approx 40^\circ$ aus [30, 31, 35]. Dieser Einfluss der Schubschlankheit war ebenfalls in vorangegangenen Vorhaben [33, 34] festgestellt worden.

Mit Vergrößerung der Lastexzentrizitäten nahm die relative Biegebeanspruchung in der lastnahen Fundamenthälfte zu, während sie in der lastfernen Hälfte kleiner wurde. Dies führte schon bei geringen Ausmitten ($e/b > 1/18$) zu nicht vollständig ausgebildeten Bruchkegeln, die sich mit zunehmender Ausmitte auf etwa die Hälfte reduzierten [30–32, 35]. Bei EF1-1/6 (Bild 3 b)) bildete sich kein Schubriss mehr in der lastfernen Fundamenthälfte aus und die Rissbildung auf der Fundamentsohle konzentrierte sich in der Lage der Lastresultierenden (Bild 3 d)). Zudem bildete sich auf der lastfernen Fundamenthälfte vom Stützenanschnitt ausgehend ein auf über 70 % der Höhe senkrecht verlaufender Biegeschubriss, der sich etwas geneigt bis zur Lage der Biegezugbewehrung fortsetzt (Bild 3 b)). Dieser Riss entsteht infolge der höheren Beanspruchung der Druckstreben auf der lastnahen Seite. Die für das Gleichgewicht der Druckstreben notwendigen Zugkräfte, die auf der lastfernen Seite verankert werden, erzeugen eine Biegebeanspruchung auf der lastfernen Seite mit Zugspannungen auf der Fundamentoberseite. Zudem entstehen entlang der verankerten Bewehrung Spaltzugspannungen infolge des einseitigen Eindringens der Stütze. Die Ergebnisse der Dickenmessungen in Bild 3 f) zeigen eine frühere Schubrissbildung (bei 75 %) im Vergleich zum zentralen Referenzversuch (90 %) und eine größere Dickenänderung bei Bruchlast (~ 7 mm im Vergleich zu ~ 4 mm).

2.5 Druckdehnungen am Stützenanschnitt

Zur Messung der Dehnungen im Druckring wurden speziell angefertigte Dehnungsmessgeräte (tangential und radial) und ein faseroptisches Messsystem (tangential) verwendet. Die Ergebnisse der tangentialen und radialen Dehnungsmessungen am Stützenanschnitt im Fundamentinneren und die Positionen

der Messtechnik sind in Bild 4 für EF2-0 und EF2-1/6 dargestellt und für alle Versuche ausführlich in [31, 32] beschrieben. Zusätzlich sind die Stützeindringungen auf der lastnahen Fundamenthälfte (rote Linie) im Vergleich zu den Ergebnissen von EF1-0 und EF1-1/6 dargestellt (blaue Linie, Bild 4 c), d), i)

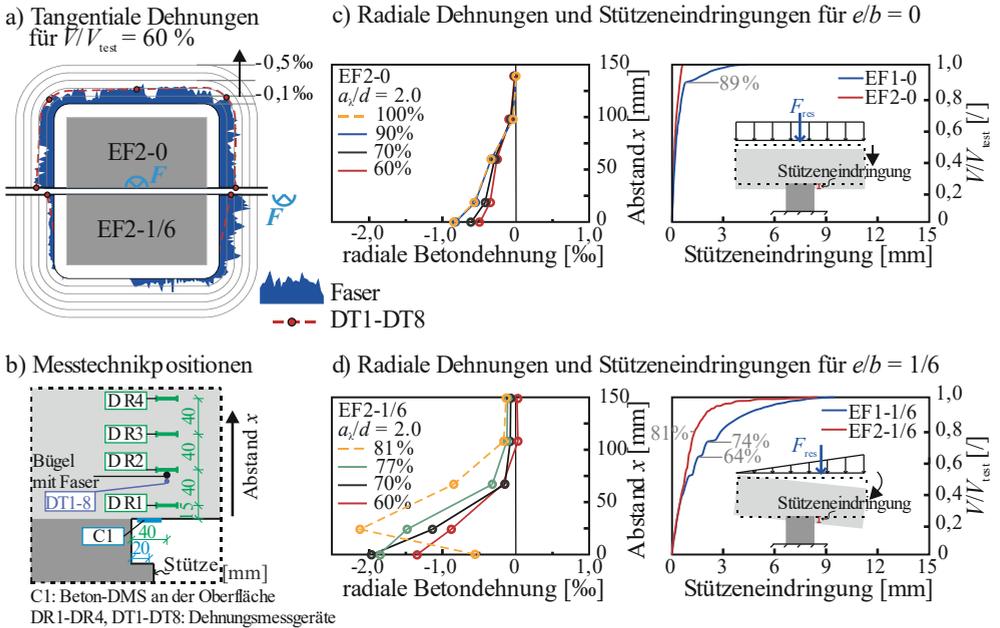


Bild 4: Dehnungen am Stützenanschnitt

Die gemessenen tangentiale Druckdehnungen ($\varepsilon_{ct} < 0$) der Faser (blaue Flächen in Bild 4 a)) sowie die Messungen der Dehnungsmessgeräte (punktuelle Messungen linear interpoliert, rot gestrichelte Linie) zeigen eine gute Übereinstimmung für die dargestellte Laststufe $V/V_{\text{test}} = 60\%$. Während sich für den zentralen Referenzversuch EF2-0 erwartungsgemäß eine gleichmäßige Dehnungsverteilung mit einer maximalen Druckdehnung $\varepsilon_{ct} \approx -0,2\text{‰}$ einstellt, ist für EF2-1/6 kein umlaufender Druckring mehr erkennbar (Bild 4 a)). Die Druckdehnungen nehmen ab etwa der Hälfte der Stützenbreite parallel zur Lastexzentrizität ab und auf der lastfernen Seite sind nur noch geringe Druckdehnungen erkennbar.

Aus den radialen Dehnungen in Bild 4 c), d) lassen sich in Kombination mit den gemessenen Stützeindringungen auf der lastnahen Fundamenthälfte folgende Erkenntnisse zum Versagensmechanismus ableiten. Während die radialen Druckdehnungen bei EF2-0 bis zur Bruchlast nahezu linear ansteigen und das Durchstantragversagen schlagartig einsetzt, werden die radialen Druckdehnungen an der Fundamentoberseite bei EF2-1/6 ab $V/V_{\text{test}} = 81\%$ kleiner und im Inneren des Fundamentes steigen sie weiter an. Diese Entwicklung geht mit einem nichtlinearen Anstieg der Stützeindringungen für $V/V_{\text{test}} = 81\%$ bei EF2-1/6 einher, bei EF2-0 steigen sie bis zur Maximallast weiterhin linear an. Das Versagen setzt bei EF2-0 folglich mit der Druckzonenschädigung am Stützenanschnitt ein. Bei exzentrisch belasteten Fundamenten findet dagegen eine Spannungumlagerung nach Schädigung der Druckzone statt, sodass eine weitere Traglaststeigerung mit großen Verformungen möglich ist.

Der Vergleich der Stützeindringungen der Serien EF1 und EF2 in Bild 4 c), d) zeigt zudem für die gedregenen Versuchskörper der Serie EF1 einen ausgeprägt nichtlinearen Anstieg vor Erreichen der Bruchlast. Die Auswertung der radialen Dehnungen bestätigt [31], dass bei den gedregenen Versuchskörpern größere Spannungumlagerungen möglich sind. Im Gegensatz zu den schlankeren Fundamenten treten diese Spannungumlagerungen zudem auch beim zentral belasteten Referenzversuch EF1-0 auf, wie es der nichtlineare Verlauf der Stützeindringung ab $V/V_{\text{test}} = 89\%$ in Bild 4 c) belegt. Dies steht im Einklang mit den Erkenntnissen von Ricker, der in einem früheren Forschungsvorhaben [33, 34] einen Lastabtrag in Form von Druckkegelschalen für kleine Schubschlankheiten feststellte.

3 Bewertung aktueller Bemessungsansätze zum Einfluss der Lastexzentrizität

Bild 5 a) zeigt den Vergleich des Ansatzes zur Berücksichtigung ungleichmäßiger Beanspruchungen gemäß der stabilen Fassung des neuen Eurocode 2 [36] β_{prEC2} (rote Linie, Gleichung (1)) mit dem experimentell bestimmten Faktor β_{test} . Dieser ist definiert als Verhältniswert der Bruchlasten von den zentrisch belasteten Referenzversuchen zu den exzentrisch belasteten ($\beta_{test} = V_{m,test,c}/V_{m,test,ec}$). Die Definition von e_b und b_b zeigt Bild 5 b).

$$\beta_{prEC2} = 1 + 1,1 \cdot \frac{e_b}{b_b} \quad (1)$$

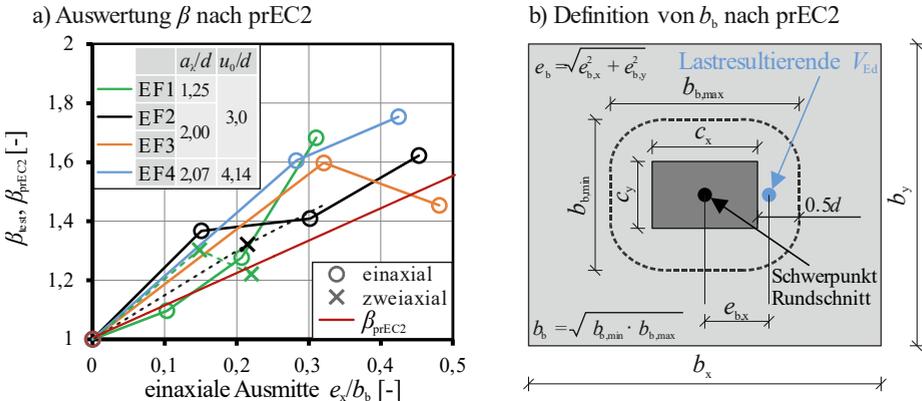


Bild 5: Vergleich der Bruchlasten mit den Bemessungsansätzen

Der direkte Bezug des Ansatzes nach prEC2 zu e_b/b_b erlaubt die vergleichende Darstellung der Versuchsergebnisse. Die Versuchsergebnisse in Bild 5 a) zeigen für einaxiale Ausmitten einen ausgeprägteren Einfluss der Momenten-Querkraft-Interaktion auf die Tragfähigkeit bei kleinen Ausmitten ($e_b/b_b \leq 0,25$) für die größere Schubschlankheit $a_k/d = 2,0$ (EF2-EF4). EF3-1/6 wird als Ausreißer eingestuft. Bei größeren Ausmitten ist der Einfluss auch bei den gedungenen Versuchskörpern der Serie EF1 ausgeprägter (EF1-1/6), während der Einfluss für kleine Ausmitten geringer ist. Die Auswirkungen zwei axialer Ausmitten liegen im Streubereich der anderen Einflussparameter. Insgesamt zeigt der Ansatz im Vergleich mit den experimentell ermittelten Datenpunkten tendenziell eine Unterschätzung der tatsächlichen Lastreduktion.

4 Fazit

Die Versuchsergebnisse belegen einen signifikanten Einfluss exzentrischer Beanspruchungen auf das Durchstantragverhalten von Einzelfundamenten ohne Durchstanzbewehrung. Die wesentlichen Ergebnisse durchgeführten Durchstanzversuche an Einzelfundamenten lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Mit zunehmenden Lastexzentrizitäten bis zum Übergang zur klaffenden Fuge ($e/b = 1/6$) wird die Tragfähigkeit auf bis zu ~60% des zentrischen Referenzwerts reduziert.
- Der Durchstanzkegel bildet sich unter größeren Lastausmitten zunehmend nur noch einseitig aus. Dabei verläuft der maßgebende Schubriss ausgehend von der Fundamentsohle auf der lastnahen Seite geringfügig flacher als bei zentrischer Beanspruchung.
- Das Verformungsverhalten des Fundaments wurde maßgeblich durch die Lastausmitte und die daraus resultierende Schiefstellung der Fundamentplatte beeinflusst. Mit steigender Ausmitte nahmen die Verformungen der lastnahen Fundamenthälfte überproportional zu, während die Verformungen auf der lastfernen Seite negativ wurden.
- Die Ergebnisse der radialen und tangentialen Dehnungen am Stützenanschnitt ergaben zwei unterschiedliche Versagensarten bei zentrischer Belastung der Versuchskörper. Während bei den gedungenen Versuchskörpern der Serie EF1 eine sukzessive Schädigung der Druckzone festzustellen war, die eine Spannungumlagerung erzeugt, ging bei den schlankeren Versuchskörpern die Schädigung der Druckzone hingegen mit der schlagartigen Bildung des maßgebenden Schubrisses einher.

- Eine vorzeitige Schädigung der Druckzone mit Spannungsumlagerungen war zudem für die exzentrisch belasteten Versuchskörper erkennbar. Größere Umlagerungen waren auch hier für die gedungenen Versuchskörper festzustellen.
- Der Einfluss exzentrischer Belastungen auf die Durchstantragfähigkeit von Einzelfundamenten kann durch den prEC2 zwar grundsätzlich adäquat berücksichtigt werden, es zeigt sich jedoch auch Optimierungspotential.

Dank

Die vorgestellten Versuche wurden im Rahmen des Forschungsprojekts zum „Durchstantragverhalten von exzentrisch belasteten Einzelfundamenten“ (Projektnummer 396630727, HE2637/31-1) der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) durchgeführt. Die Autoren bedanken sich für die Förderung des Projekts. Außerdem gilt der Dank der Kerschgens Werkstoffe & Mehr GmbH, der Badische Stahlwerke GmbH und der Stahlwerk Annahütte Max Aicher GmbH & Co. KG für die kooperative Zusammenarbeit und die Unterstützung des Projekts.

5 Quellen

- [1] *Richart, F.E.*: Reinforced Concrete Wall and Column Footings – Part 1. *In: Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 45 (1948), Iss. 2, pp. 97-127. <https://doi.org/10.14359/12107>.
- [2] *Hallgren, M.; Kinnunen, S.; Nylander, B.*: Punching Shear Tests on Column Footings. *In: Nordic Concrete Research*, Vol. 21 (1998), Iss. 1, pp. 1-22.
- [3] *Siburg, C.; Hegger, J.*: Experimental investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings with structural dimensions. *In: Structural Concrete*, Vol. 15 (2014), Iss. 3, pp. 331-339. <https://doi.org/10.1002/suco.201300083>.
- [4] *Talbot, A.N.*: Reinforced Concrete Wall Footings and Column Footings. University of Illinois, Urbana, Illinois, USA 1913.
- [5] *Simões, J.T.; Bujnak, J.; Fernández Ruiz, M. et al.*: Punching shear tests on compact footings with uniform soil pressure. *In: Structural Concrete*, Vol. 17 (2016), Iss. 4, pp. 603-617. <https://doi.org/10.1002/suco.201500175>.
- [6] *Hegger, J.; Ricker, M.; Ulke, B. et al.*: Investigations on the punching behaviour of reinforced concrete footings. *In: Engineering Structures*, Vol. 29 (2007), pp. 2233-2241. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.11.012>.
- [7] *Hegger, J.; Ricker, M.; Sherif, A.G.*: Punching Strength of Reinforced Concrete Footings. *In: ACI Structural Journal*, Vol. 106 (2009), Iss. 5, pp. 706-716.
- [8] *Hegger, J.; Sherif, A.; Ricker, M.*: Experimental Investigations on Punching Behavior of Reinforced Concrete Footings. *In: ACI Structural Journal*, Vol. 103 (2006), Iss. 4, pp. 604-613.
- [9] *Graf*: Versuche über die Widerstandfähigkeit von Eisenbetonplatten unter konzentrierter Last nahe einem Auflager. Stuttgart, Technische Hochschule Stuttgart, 1933.
- [10] *Elstner, R.C.; Hognestad, E.*: Shearing Strength of Reinforced Concrete Slabs. *In: Journal of the American Concrete Institute*, Vol. 28 (1956), Iss. 1, pp. 29-58. <https://doi.org/10.14359/11501>.
- [11] *Gomes, R.B.; Regan, P.E.*: Punching Resistance of RC Flat Slabs with Shear Reinforcement. *In: Journal of Structural Engineering*, Vol. 125 (1999), Iss. 6, pp. 684-692.
- [12] *Beutel, R.; Hegger, J.*: Punching behaviour of Shear Reinforced Flat Slabs at Interior columns - Effective and Economic Shear Systems. *In: Silfwerbrand, J.; Hassanzadeh, G. (eds.): International Workshop on Punching Shear Capacity of RC Slabs – Dedicated to Professor Sven Kinnunen*, Stockholm, Sweden, 2000, pp. 171-179.
- [13] *Regan, P.E.; Samadian, F.*: Shear reinforcement against punching in reinforced concrete flat slabs. *In: The Structural Engineer*, Vol. 79 (2001), Iss. 10, pp. 24-31.
- [14] *Fernández Ruiz, M.; Muttoni, A.; Kunz, J.*: Strengthening of Flat Slabs Against Punching Shear Using Post-Installed Shear Reinforcement. *In: ACI Structural Journal*, Vol. 107 (2010), Iss. 4, pp. 434-442.
- [15] *Lips, S.*: Punching of Flat Slabs with Large Amounts of Shear Reinforcement. Lausanne, Switzerland, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, PhD-Thesis, 2012.
- [16] *Sagaseta, J.; Tassinari, L.; Fernández Ruiz, M. et al.*: Punching of flat slabs supported on rectangular columns. *In: Engineering Structures*, Vol. 77 (2014), pp. 17-33. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.07.007>.

- [17] *Hegger, J.; Sherif, A.G.; Kueres, D. et al.*: Efficiency of Various Punching Shear Reinforcement Systems for Flat Slabs. In: *ACI Structural Journal*, Vol. 114 (2017), Iss. 3, pp. 631-642. <https://doi.org/10.14359/51689434>.
- [18] *Schmidt, P.; Kueres, D.; Bosbach, S. et al.*: Punching Strength of Flat Slabs with Shear Reinforcement - Experimental Investigations with Varying Shear Reinforcement Ratios. In: *Derkowski, W.; Gwozdziwicz, P.; Hojdys, L. et al.* (eds.): *Concrete - Innovations in Materials, Design and Structures – Proceedings of the 2019 fib Symposium*. International Federation for Structural Concrete (fib), Krakow, Poland, 2019, pp. 1669-1676.
- [19] *Schmidt, P.; Kueres, D.; Hegger, J.*: Contribution of concrete and shear reinforcement to the punching shear resistance of flat slabs. In: *Engineering Structures*, Vol. 203 (2020), pp. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109872>.
- [20] *Zaghlool, E.R.F.*: Strength and behaviour of corner and edge column-slab connections in reinforced concrete flat plates, The University of Calgary, PhD-Thesis, 1971.
- [21] *Beukel, A. van den*: Punching Shear at Inner, Edge and Corner Columns. In: *HERON*, Vol. 21 (1976), Iss. 3, pp. 1-30.
- [22] *Gilbert, S.G.; Glass, C.*: Punching failure of reinforced concrete flat slabs at edge columns. In: *The Structural Engineer* (1987), Volume 65B, No. 1, S. 16-28.
- [23] *Narasimhan, N.*: Shear Reinforcement in RC Column Heads. London, Great Britain, University of London, PhD-Thesis, 1971.
- [24] *Sudarsana, I.K.*: Punching shear in edge and corner column slab connections of flat plate structures. Ottawa, Canada, University of Ottawa, PhD-Thesis, 2001.
- [25] *Hegger, J.; Tuchlinski, D.*: Zum Durchstanzen von Flachdecken - Einfluß der Momenten-Querkraft-Interaktion und der Vorspannung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 101 (2006), Heft 10, 742–753. <https://doi.org/10.1002/best.200600508>.
- [26] *Hegger, J.; Ricker, M.; Häusler, F. et al.*: Versuche zum Durchstanzen im Bereich von Randstützen mit und ohne Durchstanzbewehrung. In: *Bauingenieur* 82 (2007), Heft 6, S. 270-278.
- [27] *Kordina, K.; Nölting, D.*: Tragverhalten von ausmittig beanspruchten Einzelfundamenten aus Stahlbeton. Abschlussbericht zum DFG - Forschungsvorhaben Ko 204/27 + 30. Technische Universität Braunschweig, Braunschweig, Germany Ausgabe 1981.
- [28] *Kordina, K.; Nölting, D.*: Tragfähigkeit durchstanzgefährdeter Stahlbetonplatten - Entwicklung von Bemessungsvorschlägen – DAFStb-Heft 371. Ernst & Sohn, 1986.
- [29] *Zhang, W.-X.; Li, B.; Hwang, H.-J. et al.*: Punching shear strength of reinforced concrete column footings under eccentric compression: Experiment and analysis. In: *Engineering Structures*, Vol. 198 (2019), p. 109509. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109509>.
- [30] *Ungermann, J.; Schmidt, P.; Hegger, J.*: Einfluss exzentrischer Belastungen auf das Tragverhalten von Einzelfundamenten. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 117 (2021), Heft 1, S. 24-36. <https://doi.org/10.1002/best.202100076>.
- [31] *Ungermann, J.; Schmidt, P.; Classen, M. et al.*: Eccentric punching tests on column bases – new insights into the inner concrete strain development. In: *Engineering Structures*, Vol. 262 (2022), p. 114273. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114273>.
- [32] *Ungermann, J.; Schmidt, P.; Christou, G. et al.*: Eccentric punching tests on column bases – influence of column geometry. In: *Structural Concrete*, Vol. 23 (2022), Iss. 3, pp. 1316-1332. <https://doi.org/10.1002/suco.202100744>.
- [33] *Hegger, J.; Ziegler, M.; Ricker, M. et al.*: Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten von gedrungenen, punktgestützten Platten am Beispiel von Fundamenten – Numerische Untersuchungen. RWTH Aachen, Aachen Ausgabe 2009.
- [34] *Ricker, M.*: Numerische Untersuchungen zum Durchstanzen von gedrungenen Einzelfundamenten. In: *Bauingenieur* 86 (2011), S. 443-453.
- [35] *Hegger, J.; Ungermann, J.*: Versuchsbericht zu Durchstanzversuchen an exzentrisch belasteten Einzelfundamenten (DFG-GZ HE2637/31-1). RWTH Aachen University, Aachen Ausgabe 2022.
- [36] prEN 1992-1-1/2021-09: Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General rules for buildings, bridges and civil engineering structures. 2021.