

Experimentelle Untersuchung voll- und teilflächig gedrückter Stahlbetonkörper

Bassem Tabka^{1*}, Peter Mark¹

¹Ruhr-Universität Bochum, Lehrstuhl für Massivbau & Konstruktionsteilprüfung (KIBKON), Bochum.

Kurzfassung

Der Beitrag behandelt experimentelle Ergebnisse zum Einfluss der Spaltzugbewehrung bei teilflächenbelasteten Betonbauteilen. Im Fokus der Untersuchungen stehen die Bewehrungsmenge und -form, deren konstruktive Durchbildung sowie die Exzentrizität der Lastfläche. Darüber hinaus werden Untersuchungen zum Einfluss der Querdehnungsbehinderung infolge Lagerung der Versuchskörper auf die Ergebnisse vorgestellt. Die Prüfkörper sind Quader und Zylinder, deren Lagerung direkt auf stählerne Lastplatten der Prüfmaschine, auf mit Lagerfett gefetteten PTFE-Schichten, Hartholzfaserplatten oder ein Vergussmörtelbett erfolgt. Die Druckprüfung wird weggeregelt je nach erwarteter Bruchkraft in einer 6 bzw. 20 MN Universal-Prüfmaschine der Versuchseinrichtung des Instituts für Konstruktiven Ingenieurbau der Ruhr-Universität Bochum (KIBKON) durchgeführt.

Die Menge der Spaltzugbewehrung wird sowohl in Quer- als auch in Längsrichtung variiert. Als Bewehrung dienen konventionelle Bügel und U-Stecker. Die Ergebnisse der Untersuchungen zeigen, dass erhöhte Bewehrungsmengen im Vergleich zur Bewehrungsform und deren Verteilung im Querschnitt hinsichtlich einer Tragfähigkeitssteigerung eine geringere Rolle spielen. Abschließend werden die experimentell erzielten mit den rechnerischen Tragfähigkeiten basierend auf gängigen Bemessungsansätzen verglichen und Empfehlungen für die Praxis abgeleitet.

1. Einleitung

Die Einleitung konzentrierter Druckkräfte in Betonbauteile über Lastflächen, die kleiner sind als die zur Verfügung stehende Bauteilfläche kommt in der Praxis vielfältig vor, z. B. bei Lagern, Längsfugen von Tübbings und Vorspannsystemen. Die Teilflächenbelastung kann entsprechend der lokalen Möglichkeiten zur Spannungsausbreitung in einen räumlichen und einen ebenen Fall unterschieden werden [1]. Beim räumlichen Fall kann sich die eingeleitete Kraft dreiaxsig im belasteten Betonbauteil ausbreiten. Entspricht die Breite der Lasteinleitung jedoch der Abmessung des belasteten Körpers in einer Richtung, so liegt der ebene Fall vor. Die eingeleitete Druckkraft kann sich nur in zwei Richtungen ausbreiten. Bekannt ist, dass bereits unbewehrter Beton unter Teilflächenbelastung Druckspannungen aufnehmen kann, die teils deutlich über der einachsigen Druckfestigkeit f_{ck} liegt [2]. Es hat sich gezeigt [1], dass die Art und Menge der eingebauten Bewehrung ebenfalls einen Einfluss auf die aufnehmbaren Druckspannungen haben kann, dies ist jedoch normativ nicht erfasst [3]. Ziel der aktuellen Forschung ist die experimentelle Untersuchung bewehrter, teilflächenbelasteter Betonkörper zur Quantifizierung des Bewehrungseinflusses. Im Fokus stehen Parameter wie Menge, Form und Lage der Bewehrung, Maßstabeffekte und der Einfluss der Lagerungsbedingungen. Es wird der Einfluss der Bewehrung in Längs- und Querrichtung sowie der Art der Lagerung sowohl für den ebenen als auch für den räumlichen Fall untersucht.

2. Ansätze zur Ermittlung der aufzunehmenden Spaltzugkraft

Sowohl im ebenen als auch im räumlichen Fall entstehen quer zur Belastungsrichtung aufgrund der Neigung der sich ausbreitenden Last Spaltzugspannungen, die zu einer resultierenden Spaltzugkraft F_{Spz} zusammengefasst werden können [4]. Basierend auf den Arbeiten von Mörsch [5] wird diese nach [6] wie folgt berechnet:

$$F_{Spz} = 0,25 F_{Ru} \left(1 - \frac{b_1}{b_2}\right) \quad (1)$$

mit:

- F_{Spz} : resultierende Spaltzugkraft
- F_{Ru} : aufnehmbare Teilflächenkraft
- b_1 : Abmessung der Lastfläche in der betrachteten Ebene
- b_2 : Abmessung des Bauteils in der betrachteten Ebene

Nach [6] treten die Spaltzugspannungen in einem Bereich etwa zwischen $0,1 \cdot b_2$ und $1,0 \cdot b_2$ Entfernung vom belasteten Rand auf. Die Lage der Resultierenden darf näherungsweise im Abstand von $0,4 \cdot b_2$ vom belasteten Rand angenommen werden. Basierend auf [7] und [8] schlägt [4] die Erhöhung des Vorfaktors von 0,25 auf 0,30 vor. Samkari schlägt in [9] die Reduzierung dieses Faktors auf 0,19 vor. Entsprechend der in Deutschland gängigen Praxis wird für die Berechnung der erforderlichen Bewehrung der hier vorgestellten Versuchskörper die Angabe von Mörsch in [6] zugrunde gelegt.

3. Ansätze zur Ermittlung der aufnehmbaren Druckspannungen

Die Eignung des Kubikwurzelansatzes nach Gl. 2 zur Ermittlung des Druckfestigkeitszuwachses, der ursprünglich von Bauschinger [10] an Sandsteinquadern mit streifenförmiger Belastung empirisch ermittelt wurde, wurde durch Wurm/Daschner [11] mit Versuchen an unbewehrten Betonscheiben bestätigt.

$$\frac{q_{1u}}{f_{c,cyl}} = \sqrt[3]{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \quad (2)$$

mit:

- q_{1u} : Bruchspannung auf der Lastfläche
- $f_{c,cyl}$: Beton-Zylinderdruckfestigkeit ($\varnothing 150 / 300$ mm)
- A_{c0} : Belastungsfläche
- A_{c1} : maximale rechnerische Verteilungsfläche mit geometrischer Ähnlichkeit zu A_{c0}

Versuche für den räumlichen Fall haben jedoch gezeigt, dass der Kubikwurzelansatz die aufnehmbaren Lastflächenspannungen unterschätzt [1]. Spieth [12] empfiehlt für den räumlichen Fall daher den Quadratwurzelansatz nach Gl. (3):

$$\frac{q_{1u}}{f_{c,cyl}} = \sqrt{\frac{A_{c1}}{A_{c0}}} \quad (3)$$

Dieser bildet die Grundlage der Bemessung für teilflächenbelastete Bauteile in nationalen und in den meisten internationalen Normwerken [1]. Nach DIN EN 1992-1-1 [3] darf die erhöhte Grenztragfähigkeit F_{Rdu} auf Bemessungsniveau (Index d) im Fall einer räumlichen Lastausbreitung nach Gl. (4), in Verbindung mit den geometrischen Angaben in Abbildung 1, ermittelt werden:

$$F_{Rdu} = A_{c0} f_{cd} \sqrt{A_{c1}/A_{c0}} \leq 3,0 f_{cd} A_{c0} \quad (4)$$

mit:

f_{cd} : Bemessungswert der Beton-Zylinderdruckfestigkeit

Die Berücksichtigung des lokalen Betonbruchverhaltens und die durch die Umlenkung der Druckstreben entstehenden Spalt- bzw. Querkzugkräfte, welche durch eine entsprechende Bewehrung aufgenommen werden müssen, wird vorausgesetzt. Empfehlungen für die Wahl der Bewehrungsform sind u. a. in [1,2,4,6,11] angegeben. Dabei muss die zur Verfügung stehende Höhe für die Lastausbreitung die Bedingungen in Abbildung 1 erfüllen. Der Schwerpunkt der Lastfläche muss mit dem Schwerpunkt der Ausbreitungsfläche übereinstimmen. Sollten mehrere Druckkräfte nebeneinander auf den Betonquerschnitt wirken, so dürfen sich ihre rechnerischen Ausbreitungsflächen unterhalb innerhalb der Höhe h nicht überschneiden.

Die geometrische Ähnlichkeit zwischen Lasteinleitungs- und Ausbreitungsfläche spielt gerade bei langgezogenen oder randnahen Flächen eine wichtige Rolle. Dann sind Lasterhöhungsfaktoren gegenüber der uniaxialen Festigkeit eher gering. Diskutiert wird in der Forschung derzeit oft auch eine geometrisch nicht mehr ähnliche Ausbreitung bei der die Flächenrelation von Einleitungsfläche (d_1/b_1) nicht mehr der der Ausbreitungsfläche (d_2/b_2) entspricht, also mit $d_1/b_1 \neq d_2/b_2$.

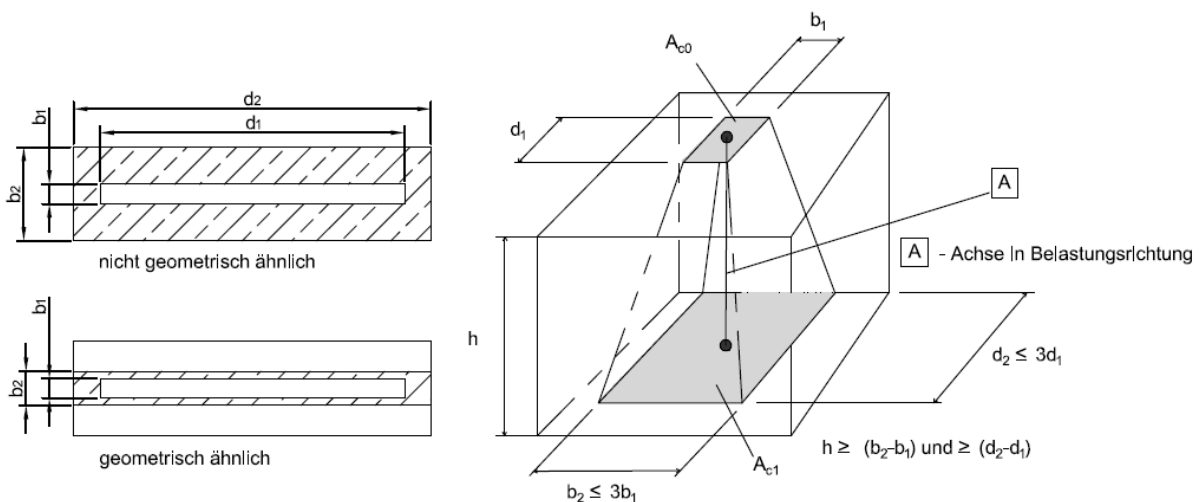


Abbildung 1: Lasteinleitungs- und Ausbreitungsfläche nach DIN EN 1992-1-1 [3] mit Darstellung geometrischer Ähnlichkeit bzw. fehlender Ähnlichkeit

4. Versuche

Ziel dieser Versuche ist zunächst die Einflüsse von geometrischer Ähnlichkeit, der Bewehrung und der Probekörpergröße zu quantifizieren und gängigen Berechnungsvorschriften gegenüberzustellen.

4.1 Versuchsaufbau und -durchführung

Die Versuche wurden in Universaldruck- und Zugprüfmaschinen mit der Kapazität von 6 und 20 MN durchgeführt. Abbildung 2 zeigt den Versuchsaufbau an den beiden Maschinen. Alle Versuche wurden weggeregelt gesteuert und nach einem Abfall der Kraft von mindestens 30% des erreichten Maximalwertes beendet. Zwischen der Lasteinleitungsplatte aus Stahl oberhalb und dem Probekörper wurde immer eine 3 mm dicke Hartholzfaserschicht positioniert, um die Unebenheiten der Betonoberfläche auszugleichen. Versuchskörper mit der Bezeichnung P wurden zusätzlich auf zwei mit Lagerfett gefettete PTFE-Schichten gelegt. Die untere PTFE-Schicht war 5 mm, die obere 0,3 mm stark. Versuchskörper mit der Bezeichnung V wurden mit einem schnellerhärtenden hochfesten Vergussmörtel untergossen. Versuchskörper mit der Bezeichnung H wurden auf einer 3 mm dicken Hartholzfaserschicht gelagert. Bei allen Versuchen wurde mittels induktiver Wegaufnehmer die Lastplattenverschiebung gemessen.

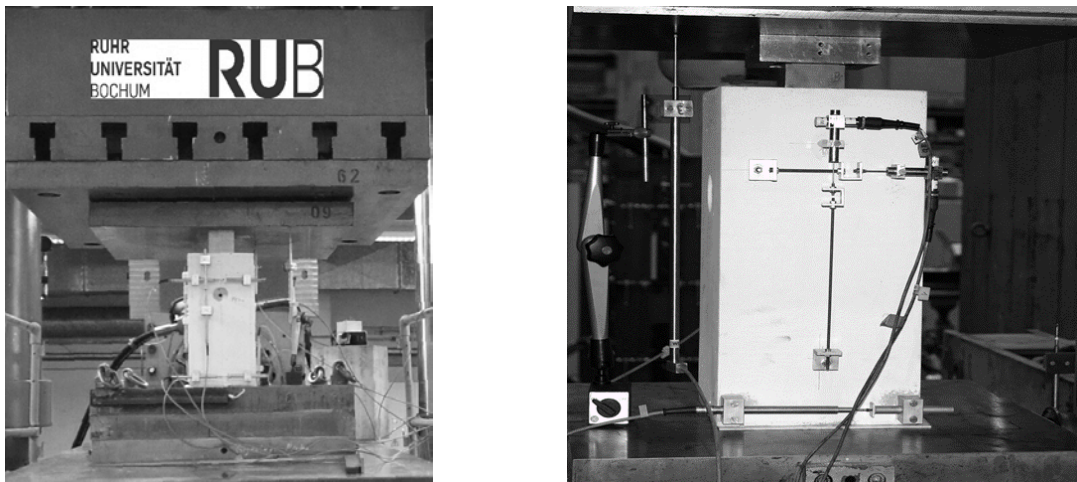


Abbildung 2: Versuchsaufbau, links Serie A an der 20 MN und rechts Serie C an der 6 MN Maschine

4.2 Versuchskörper

Für die Erstellung der Versuchskörper wurde ein üblicher Transportbeton der Festigkeitsklasse C40/50 von einem lokalen Hersteller sowie Stabbewehrungsstahl verwendet. Tabelle 1 enthält die wesentlichen Angaben der verwendeten Betonrezeptur. Die mechanischen Eigenschaften des Bewehrungsstahles wurden anhand von Zugversuchen an 3 Proben je Durchmesser ermittelt. Die Mittelwerte der Prüfergebnisse sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tabelle 1: Zusammensetzung des Betons

Beton	
Festigkeitsklasse	C 40/50
Gesteinskörnung	Sand-Kies
Größtkorn [mm]	16 Sieblinie A/B
Zement	CEM III/A 42,5 N
w/z _{eq}	0,43
Zusatzmittel	PCE 2236 (2 kg/m ³)

w/z_{eq}: äquivalenter Wasserzementwert

Tabelle 2: Mittlere Eigenschaften des Bewehrungsstahles, ermittelt in Begleitversuchen

Bewehrungsstahl – BSt 500			
∅	E _{c,m}	f _{y,m}	f _{u,m}
	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
8	211737	564	646
10	209072	541	623
12	209106	523	624
16	204449	570	682

f_y: Stahlstreckgrenze

f_u: Stahlbruchspannung

4.2.1 Versuchsserien A und B

Abbildung 3 zeigt die Versuchskörper- und Lastflächengeometrie, die Lastflächenexzentrizität sowie eine schematische Darstellung der Bewehrungskörbe. Die Ausbildung der Lastflächen der Versuchsserien A und B ist dabei gezielt an die Lastfläche angelehnt, wie sie an Tübbinglängsfugen vorzufinden ist. Die Lastflächenabmessungen sind in beiden Richtungen kleiner als die Bauteilabmessungen. In Längsrichtung ist diese Abweichung jedoch lediglich geringfügig, wodurch die Ausbreitung der Druckspannungen überwiegend zweiachsig erfolgt. Um den Einfluss der Spaltzugbewehrungsmenge auf die Tragfähigkeit zu untersuchen, wurde der Spaltzugbewehrungsgrad in drei Abstufungen variiert. Typ I weist in Quer- und in Längsrichtung die Bewehrungsmenge auf, die nach [6] erforderlich ist. Typ II weist in Querrichtung die 1,5-fache Bewehrungsmenge von Typ I auf. Typ III beinhaltet die 1,8-fache Bewehrungsmenge in Längsrichtung im Vergleich zu Typ I. Um den Einfluss der Bewehrungsform in Querrichtung zu untersuchen, wurden bei den Versuchskörpern A-I, A-III und B-II Bügel verwendet, bei den Versuchskörpern B-I und B-III hingegen U-Stecker und bei den Versuchskörpern A-II eine Kombination aus Bügeln und U-Steckern. Versuchskörper A-III-T enthält in Querschnittsmittelpunkt in Längsrichtung einen Bewehrungsstab mit Durchmesser 16 mm anstatt der 12 mm von A-III. Beim Versuchskörper A-III-v wurde die erforderliche Spaltzugbewehrung in Längsrichtung auf kleinere Durchmesser verteilt als bei A-III. Damit soll der Einfluss der konstruktiven Bewehrungsführung analysiert werden.

4.2.2 Versuchsserie C

Die Lastfläche der Serie C wird so gewählt, dass sich eine dreiachsige Lastausbreitung auf die neunfache Fläche einstellen kann. Auch hier wird die Bewehrungsmenge variiert, Typ I weist die erforderliche Bewehrungsmenge nach [6] auf; Typ II das 2,2-fache dieser Menge. Es wurden ausschließlich geschlossene Bügel mit Haken als Bügelschlösser verwendet.

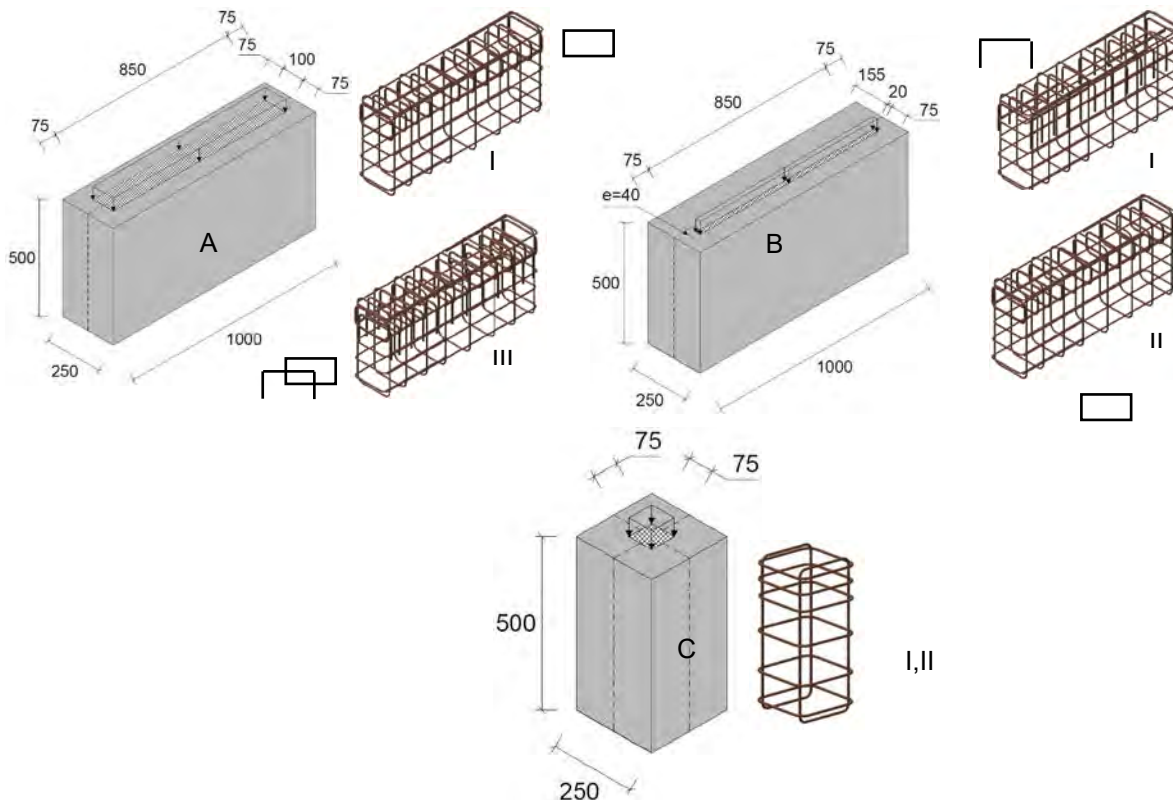


Abbildung 3: Geometrie der Versuchskörper, der Lastflächen sowie Form der Bewehrungskörbe der Versuchsserien A, B und C.

4.3 Untersuchung der Lagerung

Aus früheren Arbeiten ist ein generell druckfestigkeitserhöhender Einfluss einer Querdehnungsbehinderung bei vollflächiger Belastung durch Reibung zwischen den stählernen Lastplatten der Prüfmaschine und dem Beton des Probekörpers bekannt [13, 14]. Dieser Querdehnungsbehinderung kann nach [15, 16] mit einer Lagerung auf mit Lagerfett gefetteten PTFE-Schichten entgegengewirkt werden. Um den Einfluss dieser Querdehnungsbehinderung auf die eigenen Versuchsergebnisse untersuchen zu können, wurden ausgewählte Versuchskörper der Serien A, B und C und darüber hinaus unbewehrte Betonzylinder mit den Abmessungen $d/h = 150/300$ mm bei verschiedenen Lagerungen getestet. Dabei ermöglichen die Serien A und B einen Vergleich zwischen PTFE- und Vergussmörtellagerung, die Serie C hingegen einen Vergleich von PTFE- und Hartholzfaserlagerung. Mit Tabelle 3 erfolgt eine Zuordnung dieser Lagerungstypen.

Tabelle 3: Art der Lagerung am Probenfuß (Zylinder)

Lagerungstyp	Beschreibung
a	direkter Kontakt mit der Stahlplatte der Prüfmaschine
b	2 * 3 mm Holzhartfaserplatten
c	2 * 5 mm PTFE Schichten mit Lagerfett gefettet
d	2 * 0,3 mm PTFE Schichten mit Lagerfett gefettet
e	0,3 mm und 5 mm PTFE Schichten mit Lagerfett gefettet

5. Versuchsergebnisse

In Tabelle 4 sind die wesentlichen Versuchsergebnisse der 23 teilflächig belasteten Versuchskörper der Serien A, B und C aufgeführt. Die in der zweiten Spalte gewählte Versuchskörperbezeichnung ermöglicht in Kombination mit der Abbildung 3 und mit der Tabelle 3 eine Zuordnung der jeweiligen Versuchskörper- und Lastflächengeometrien, der Exzentrizität der Last, der Bewehrungsform und des Lagerungstyps. In der dritten Spalte ist die am jeweiligen Tag der Versuchsdurchführung mittlere Beton-Zylinderdruckfestigkeit $f_{cm,cyl}$ (ermittelt mit dem Lagerungstyp a) als Mittelwert aus drei Versuchen angegeben. In der vierten und fünften Spalte ist die Menge der Spaltzugbewehrung sowohl als absolute Stahlflächenangabe $A_{s, spz}$ in cm^2 , als auch als geometrischer Bewehrungsgrad ρ_{spz} in % für die Quer- und für die Längsrichtung der Versuchskörper angegeben. Zur Ermittlung des geometrischen Bewehrungsgrades wurde die Fläche zu Grunde gelegt innerhalb derer Spaltzugspannungen auftreten. Dies erfolgte wie in [6] definiert und hier unter Kapitel 2 aufgeführt, also zwischen 0,1 und 1,0 b_2 . In der sechsten Spalte sind die rechnerischen Ausbreitungsflächen der Last A_{c1} zusammengestellt, basierend auf der in [3] geforderten geometrischen Ähnlichkeit der Last- und Ausbreitungsfläche, in Spalte 7 A_{c1}^* ohne Beachtung dieser Forderung. In der achten Spalte ist die Lastfläche A_{c0} berechnet aus den in Abbildung 3 eingezeichneten Abmessungen angegeben. Anhand A_{c0} und den in der neunten Spalte aufgeführten experimentellen Maximallasten F_{max} sind in der zehnten Spalte die Lastflächenbruchspannungen q_{1u} errechnet. In der letzten Spalte der Tabelle 4 wird die Lastflächenbruchspannung auf die mittlere Beton-Zylinderdruckfestigkeit aus Spalte 3 bezogen und somit der Steigerungsfaktor der ertragbaren Druckspannungen ermittelt.

Wie erwartet, wiesen die unbewehrten Versuchskörper ein sprödes, die bewehrten ein merklich duktileres Bruchverhalten auf. Abbildung 4 zeigt die typischen Riss- und Bruchbilder. Bei einigen der Versuchskörper der Serien A und B tritt der Initialriss auf der Längsseite des Versuchskörpers auf und wächst von unten nach oben bevor Risse in der Spaltzugzone auftreten. Dies wurde sowohl bei der Lagerung auf gefetteten PTFE-Schichten als auch bei der Lagerung auf Vergussmörtel beobachtet. Wie Tabelle 4 entnommen werden kann, hat weder die Erhöhung der Menge der Quer- noch der Längsspaltzugbewehrung zu einem signifikanten Anstieg der aufnehmbaren Druckspannungen

geführt. Dies gilt sowohl für die Serie (A) als auch für die Serie (B). Die Erhöhung der Menge der Spaltzugbewehrung in Serie (C) führt hingegen zu einem Anstieg der aufnehmbaren Spannungen. Dies kann unter anderem auf die bessere Umschnürungswirkung der Längsbewehrung zurückgeführt werden, da bei C-II ein größerer Durchmesser der Bügelbewehrung im Spaltzugbereich als bei C-I gewählt wurde. Die Ergebnisse der Versuche A-III-T und A-III-v zeigen, dass die Tragfähigkeit sensitiv hinsichtlich der konstruktiven Bewehrungsdurchbildung reagiert. Beide Variationen führten zu niedrigeren Maximalkräften als der Referenzversuch A-III.

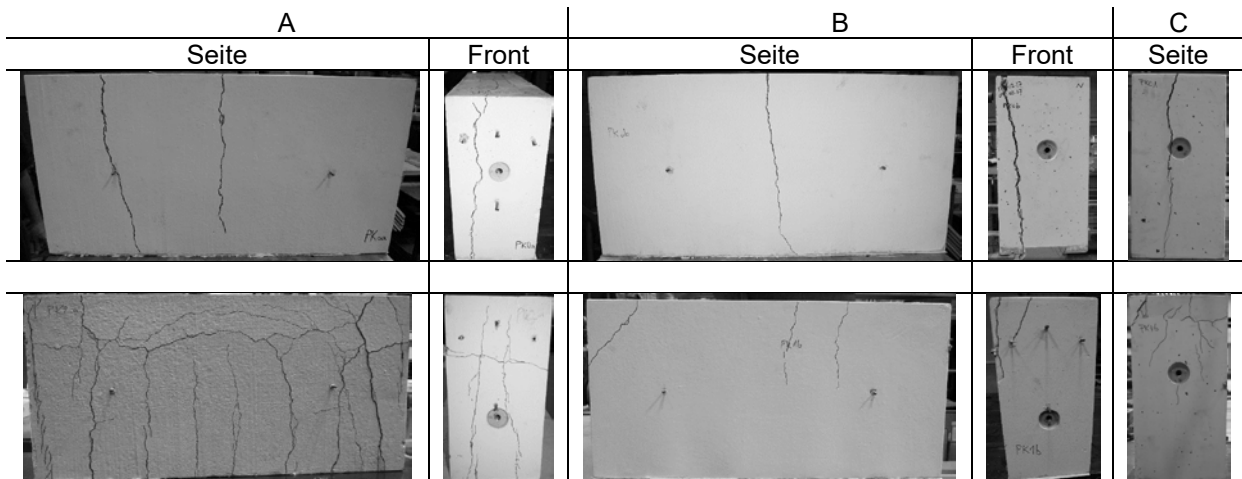


Abbildung 4: Typische Rissbilder. Oben unbewehrte Versuchskörper, unten bewehrt. links Typ A, Mitte Typ B und rechts Typ C

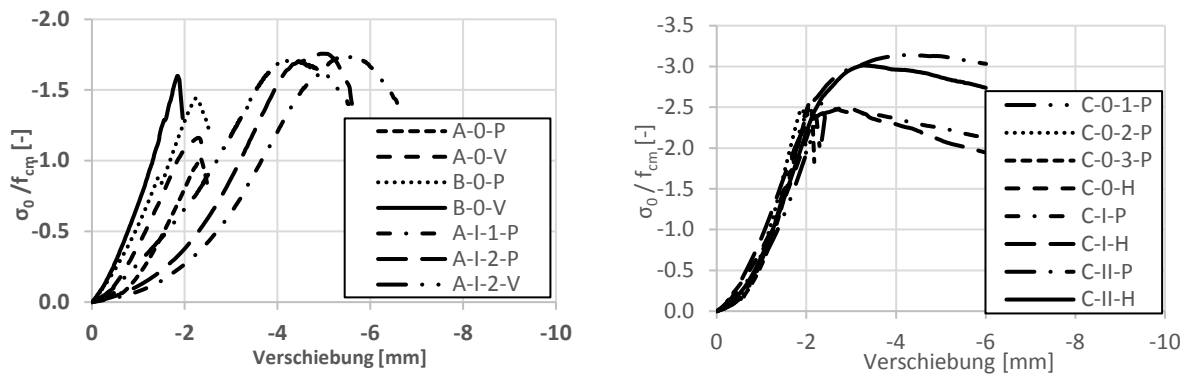


Abbildung 5: Bezogene Spannungs- Verschiebungs- Beziehungen für Serie A, B (links) und C (rechts) bei den verschiedenen Lagerungsarten

Die Versuche zum Einfluss der Lagerung an unbewehrten Zylindern weisen je nach Lagerungstyp erhebliche Unterschiede hinsichtlich der erzielten Druckfestigkeit auf. In Tabelle 5 sind mit den Werten für q_{1u} Ergebnisse der Druckfestigkeitsversuche der unbewehrten Zylinder bei den unterschiedlichen Lagerungstypen sowie die auf die Referenzdruckfestigkeit bei einer Standardlagerung auf einer stählernen Lastplatte bezogenen Druckfestigkeiten aufgeführt. Es zeigt sich, dass die weichen, verformungsfähigen Lagerungstypen durch einseitige Wegnahme der stabilisierenden Querdehnungsbehinderung und durch ungleichmäßige Pressungslagen, aus dem Effekt dickerer Weichschichten die Tragfähigkeit z. T. deutlich reduzieren. Bei den großen Teflonschichtdicken von 5 mm halbiert dies etwa die Tragfähigkeit. Zu beachten ist, dass diese Minderung bei den

Großversuchen (Serien A-C) nur dann relevant ist, wenn die Spannung an der Kontaktfläche zum Probekörperboden maßgeblich die Gesamtlast eingrenzt, was hier - bis auf wenige Körper der Serie C – bewusst ausgeschlossen wurde.

Tabelle 4: Grundparameter der Bewehrung von Serie A, B und C sowie Lasten und bezogene Druckspannungen

Nr.	Bez.	$f_{cm,cyl}$	$A_s, Spz, quer$ $/\rho_{spz, quer}$	$A_s, Spz, längs$ $/\rho_{spz, längs}$	A_{c1}	A_{c1}^*	A_{c0}	F_{max}	q_{1u}	$q_{1u}/f_{cm,cyl}$
		[Mpa]	[cm ²]/[%]	[cm ²]/[%]	[cm ²]	[cm ²]	[cm ²]	[kN]	[MPa]	[-]
1	A-0-P	43	-	-	1176	2500	850	3821	44,95	1,05
2	A-0-V	53	-	-	1176	2500	850	5333	62,74	1,18
3	A-I-1-P	43	18,85/0,75	4,52 / 0,72	1176	2500	850	6436	75,72	1,76
4	A-I-2-P	43	18,85/0,75	4,52 / 0,72	1176	2500	850	6521	76,72	1,78
5	A-I-P	53	18,85/0,75	4,52 / 0,72	1176	2500	850	7826	92,07	1,74
6	A-II-P	43	28,27/1,13	4,52 / 0,72	1176	2500	850	6589	77,52	1,80
7	A-III-T-P	43	18,85/0,75	4,52 / 0,72	1176	2500	850	5596	65,84	1,53
8	A-III-P	45	18,85/0,75	8,04 / 1,29	1176	2500	850	6160	72,47	1,61
9	A-III-v-P	45	18,85/0,75	6,28 / 1,01	1176	2500	850	5262	61,91	1,38
10	B-0-P	43	-	-	235	1700	170	1182	69,53	1,62
11	B-0-V	53	-	-	235	1700	170	1542	90,71	1,71
12	B-I-P	43	9,42/0,38	1,57 / 0,25	235	1700	170	2099	123,47	2,87
13	B-I-V	53	9,42/0,38	1,57 / 0,25	235	1700	170	2291	134,76	2,54
14	B-II-P	43	14,14/0,57	2,26 / 0,36	235	1700	170	2119	124,65	2,90
15	B-III-P	43	9,42/0,38	1,57 / 0,25	235	1700	170	1480	87,06	2,02
16	C-0-1-P	47	-	-	625	625	56,25	652	115,91	2,47
17	C-0-2-P	47	-	-	625	625	56,25	665	118,22	2,52
18	C-0-3-P	47	-	-	625	625	56,25	674	119,82	2,55
19	C-0-V	54	-	-	625	625	56,25	738	131,20	2,43
20	C-I-P	47	3,02/0,48	-	625	625	56,25	693	123,20	2,62
21	C-I-H	54	3,02/0,48	-	625	625	56,25	767	136,36	2,53
22	C-II-P	47	6,79/1,09	-	625	625	56,25	840	149,33	3,18
23	C-II-H	54	6,79/1,09	-	625	625	56,25	925	164,44	3,05

*geometrisch nicht ähnliche Last- und Ausbreitungsflächen

P: gelagert auf 2 unterschiedliche, gefettete PTFE-Schichten (0,3 und 5 mm stark)

V: gelagert auf einem Vergussmörtelbett

H: gelagert auf einer 3 mm starken Hartholzfasertafel

Abbildung 6 zeigt die typischen Bruchbilder differenziert nach Lagerungstyp. Gut zu erkennen ist, wie das Versagen durch die fehlende seitliche Stützung bei den Teflonzwischenlagen von beidseitiger, verteilter Rissbildung, also oben und unten bei (a) und (b), dann nach unten konzentriert ausfällt, was bei (c) und (e) besonders deutlich zu erkennen ist. Der Vergleich der maximalen Druckfestigkeiten bei den Großversuchen (P, V und H) weist hingegen kaum Einfluss der Lagerung aus. Abbildung 5 zeigt

das Kraftverformungsverhalten der Versuchskörper bei unterschiedlicher Lagerung. Bei weitgehend biaxialer Ausbreitung (Serien A, B) treten Laststeigerungen gegenüber der uniaxialen Festigkeit bis etwa 70% auf, wobei die Aktivierung von Querdehnungsbehinderungen weniger lasterhöhend als vielmehr duktilitätserhöhend wirkt. Es werden merklich größere Verformungswege erzielt. Die triaxiale Ausbreitung erreicht Steigerungen von 2,5 bis 3-facher Grundfestigkeit (Serie C). Z. T. wurde hier die Lagerung zur Grundplatte maßgebend. In den anderen Fällen ist das Versagen unterhalb der Lasteinleitung aufgetreten. Zudem zeigen sich erste Maßstabeffekte bei Körpern von immerhin 0,25 x 0,25 [m] Grundfläche.

Tabelle 5: Ergebnisse der Begleitversuche an Betonzylindern

Nr.	Typ	$\sigma_{\max, i}$ [MPa]	$\sigma_{\max, \text{Mittelwert}}$ [MPa]	$\sigma_{\max, i} / f_{\text{cm, Referenz}}$ [-]	$\sigma_{\max, \text{Mittelwert}} / f_{\text{cm, Referenz}}$ [-]
1	a	53,6	53,17 = $f_{\text{cm, Referenz}}$	-	1
2	a	52,9		-	
3	a	53,0		-	
4	b	50,7	50,7	0,95	0,95
5	b	51,3		0,96	
6	b	50,2		0,94	
7	c	29,2	27,7	0,55	0,52
8	c	27,6		0,52	
9	c	26,4		0,50	
10	d	47,0	48,8	0,88	0,92
11	d	51,7		0,97	
12	d	47,8		0,90	
13	e	27,7	27,5	0,52	0,52
14	e	27,0		0,51	
15	e	27,7		0,52	

$\sigma_{\max, i}$: Beton-Zylinderdruckfestigkeit beim jeweiligen Lagerungstyp

$f_{\text{cm, Referenz}}$: Beton-Zylinderdruckfestigkeit beim Lagerungstyp a (stählerne Lastplatte)

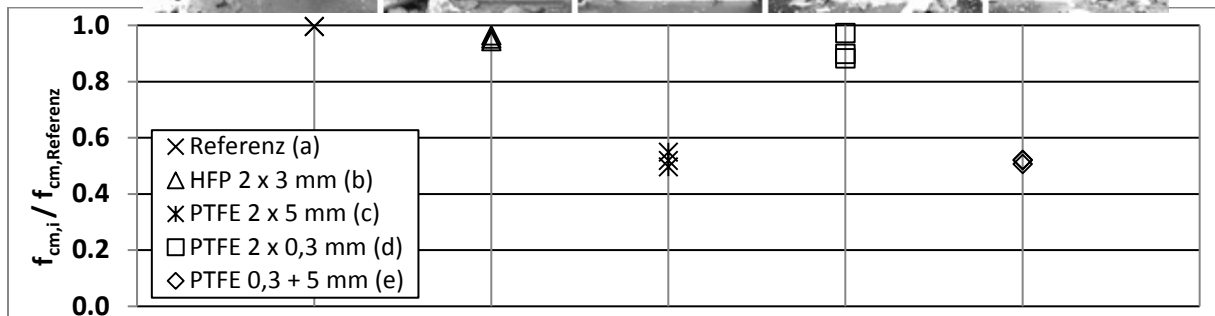
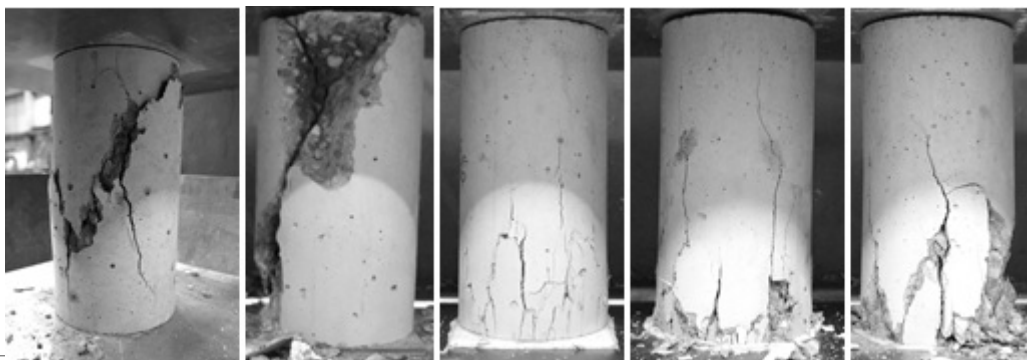


Abbildung 6: Bruchbilder und bezogene Zylinderdruckfestigkeiten bei Druckversuchen mit verschiedener Lagerung auf der Unterseite

6. Vergleich mit gängigen Bemessungsansätzen

Die in den Versuchen erzielten Maximalkräfte werden, mit Hilfe der zuvor vorgestellten Kubikwurzel- und Quadratwurzelansätze, auf die rechnerische Bruchlast bezogen (Abbildung 7). Dabei wird bei der Ermittlung der rechnerischen Bruchkraft, einerseits wie in [3] gefordert, die geometrische Ähnlichkeit der Last- und Ausbreitungsflächen beachtet (Diagramme in Abbildung 7, links) andererseits außer Acht gelassen, also bewusst rechnerisch eine höhere Tragkapazität zugelassen (Diagramme in Abbildung 7, rechts). Neben den eigenen Experimenten sind auch Daten der Literatur [1] integriert und mit Spiegelstrichen im Diagramm gekennzeichnet. Der Vergleich der beiden oberen Diagramme in Abbildung 7 zeigt, dass der Quadratwurzelansatz für ebene Fälle nur bei Beachtung der geometrischen Ähnlichkeit konservativ bleibt. Der Vergleich des oberen und des unteren Diagramms in der rechten Hälfte in Abbildung 7 zeigt, dass der Kubikwurzelansatz sich für ebene Fälle auch ohne geometrische Ähnlichkeit der Last- und Ausbreitungsflächen eignet.

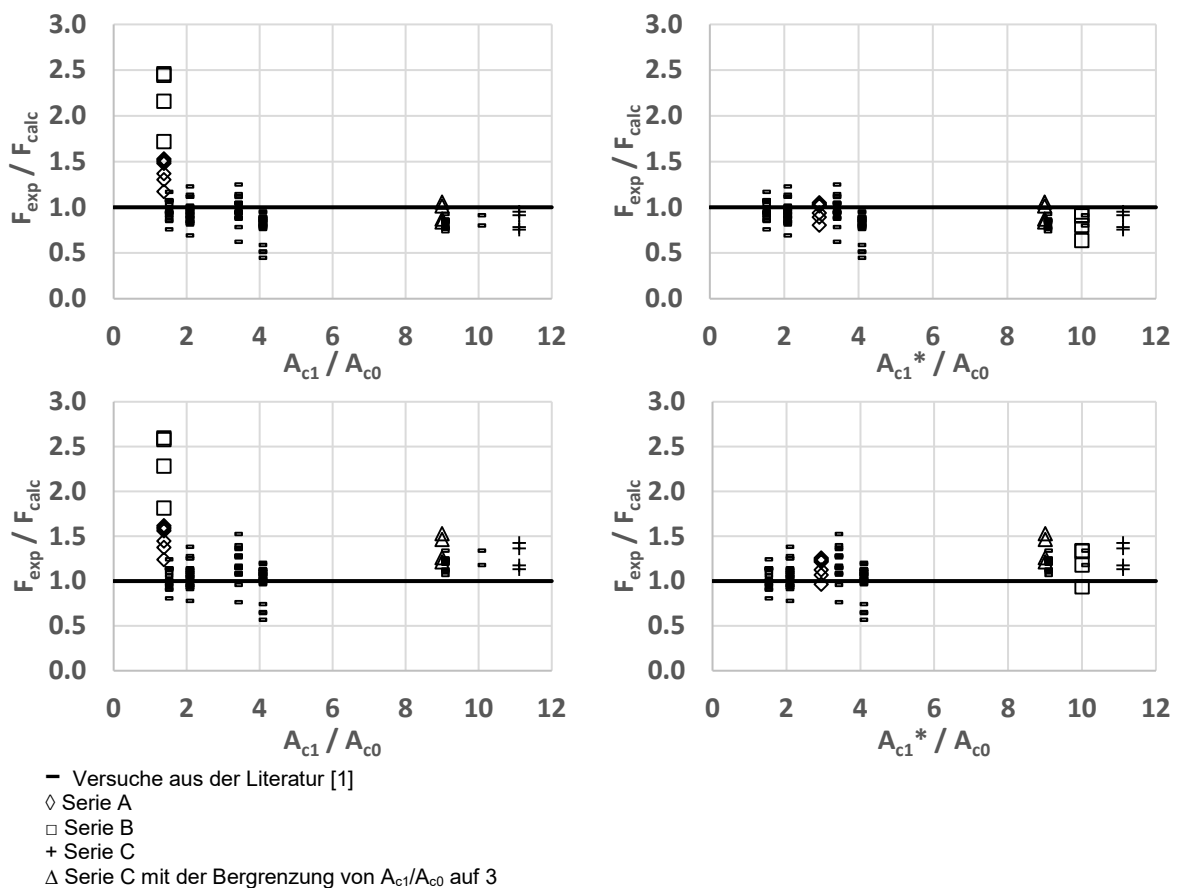


Abbildung 7: Experimentell erzielte Maximalkräfte bezogen auf die rechnerischen Maximalkräfte. Oben basierend auf den Quadratwurzelansatz, unten auf dem Kubikwurzelansatz. Links mit geometrisch ähnlichen, rechts mit geometrisch nicht ähnlichen Last- und Ausbreitungsflächen.

Bemerkenswert ist, dass die Missachtung der geometrischen Ähnlichkeit zu einer deutlichen Reduktion von Streuungen führt. Das gilt insbesondere für die dominant biaxialen Ausbreitungen, wo lediglich geringe Festigkeitssteigerungen prognostiziert werden.

7. Schlussfolgerungen

Im Fokus von experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Spaltzugbewehrung bei teilflächenbelasteten Stahlbetonkörper stehen die Bewehrungsmenge und -form, deren konstruktive Durchbildung sowie die Exzentrizität der Lastfläche. Die Experimente bestätigen einen signifikanten Einfluss der Spaltzugbewehrung auf die Tragfähigkeit und auf das Bruchverhalten von teilflächig gedrückten Betonkörpern. Die experimentellen Tragfähigkeiten liegen im Vergleich zu DIN EN 1992-1-1 [3] mit NAD und dem Quadratwurzelsatz auf der sicheren Seite, solange die Last- und Ausbreitungsflächen geometrisch ähnlich angenommen bleiben. Bei geometrisch nicht ähnlichen Last- und Ausbreitungsflächen zeigt der Kubikwurzelsatz eine bessere Eignung. Die ertragbaren Druckspannungen interagieren empfindsam mit der Lagerung der Versuchskörper, der Form sowie der konstruktiven Durchbildung der Spaltzugbewehrung. Verformungsarme Bewehrungsarten mit betonumschnürenden Effekten führen zu höheren Tragfähigkeiten.

Weitere Forschungsarbeit ist erforderlich um diese Einflüsse zu quantifizieren und um weiteres Optimierungspotential wie z. B. durch den Einsatz von zusätzlichen Stahlfasern zu analysieren.

Danksagung

Die Arbeiten sind im Rahmen des Projektes B1 des Sonderforschungsbereichs 837 „Interaktionsmodelle für den maschinellen Tunnelbau“ entstanden. Der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) sei für die finanzielle Unterstützung herzlich gedankt.

Literatur

- [1] Wichers, M.: Bemessung von bewehrten Betonbauteilen bei Teilflächenbelastung unter Berücksichtigung der Rissbildung. iBMB Braunschweig. 2013.
- [2] Zilch, K.: Bemessung im konstruktiven Betonbau. Springer Verlag. 2010
- [3] 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.
- [4] Leonhardt, F.; Mönning, E.: Vorlesungen über Massivbau, Teil 2: Sonderfälle der Bemessung im Stahlbetonbau. Springer Verlag. 1986.
- [5] Mörsch, E.: Über die Berechnung der Gelenkquader. Beton und Eisen 23, Heft Nr. 12, S. 156-161. 1924
- [6] Grasser, E.; Thielen, G.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.); Heft 240: Hilfsmittel zur Berechnung der Schnittgrößen und Formänderungen von Stahlbetontragwerken. Beuth Verlag. 1991
- [7] Iyengar, K. T. S. R.: Der Spannungszustand in einem elastischen Halbstreifen und seine technische Anwendung. Dissertation, TH Hannover. 1960.
- [8] Hiltcher, R.; Florin, G.: Darstellung der Spaltzugspannungen unter einer konzentrierten Last (Druckplatte) nach Guyon-Iyengar und nach Hiltcher und Florin. In: Bautechnik, S. 196-200. Jun. 1986.
- [9] Samkari, M.: Vorspannkrafteintragung im Spannbeton. Dissertation, Universität Kassel. 1987.
- [10] Bauschinger, J.: Versuche mit Quadern aus Naturstein. Mitteilungen des Mechanischen und Technischen Laboratoriums der Kgl. Technischen Hochschule München., Nr. 6, 1876.
- [11] Wurm, P.; Daschner, F.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.); Heft 344: Teilflächenbelastung von Normalbeton, Versuche an bewehrten Scheiben. Verlag Ernst & Sohn, 1983.
- [12] Spieth, H.-P.: Das Verhalten von Beton unter hoher örtlicher Pressung und Teilbelastung unter besonderer Berücksichtigung von Spannbetonverankerungen. Technische Hochschule Stuttgart, 1959.
- [13] Kotsovos, M. D.: Effect of testing on the post-ultimate Behavior of concrete in compression. In: Materials and Structures 16, Issue1, S. 3-12 1983.
- [14] Mark, P.; Schnütgen, B.: Grenzen elastischen Materialverhaltens von Beton. In: Beton- und Stahlbetonbau 96, Heft 5, S. 373-378, 2001.
- [15] Winkler, K.; Mark, P.; Heek, P.; Rohländer, S.; Sommer, S.: Punching shear tests on symmetrically reduced slab quarters. In: Structural Concrete 15(4). S. 484-496. 2014.
- [16] Bocklenberg, L.; Mark, P.; Rybarz, S.: Low friction sliding Planes of greased PTFE for high contact pressures. In: Open journal of civil Engineering, 6. S. 105-116. 2016.