

# Untersuchungen zur Verbundwirkung von Betondübeln

## Anwendung von tiefliegenden Betondübeln bei Slim-Floor-Konstruktionen (CoSFB)

Mit dem Ziel, Slim-Floor-Träger möglichst wirtschaftlich als Verbundträger auszubilden, wurden zur Übertragung der Längsschubkräfte in der Verbundfuge tiefliegende Betondübel untersucht. Pilotversuche im Jahre 2009 belegten das große Potenzial dieser neuen Bauweise, machten aber auch deutlich, dass bestehende Bemessungsmodelle für Betondübel hier nicht ohne weiteres verwendet werden können. Im Jahr 2011 wurden weitere Versuche durchgeführt, um den bereits untersuchten Anwendungsbereich der Betondübel bei Slim-Floor-Trägern zu erweitern und eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Verwendung von tiefliegenden Betondübeln zu erwirken. Die Versuche bestätigten das duktile Verhalten der Betondübel und die Analyse der Versuchsergebnisse führte zu der Erkenntnis, dass sich die Traglast im Wesentlichen aus den Anteilen einer in den Dübel laufenden Betondruckstrebe, der Tragfähigkeit der Dübelbewehrung und aus Reibung zusammensetzt. Im vorliegenden Beitrag wird speziell der Einfluss der Betondruckfestigkeit auf die Traglast erläutert, da in den Versuchen eine höhere Betondruckfestigkeit nicht zwangsläufig auch zu einer höheren Traglast geführt hat. Aus den Versuchsergebnissen wurden Empfehlungen für die charakteristische Längsschubtragfähigkeit der tiefliegenden Betondübel im untersuchten Anwendungsbereich abgeleitet. Im Beitrag gegebene Hinweise zum Entwurf fördern die wirtschaftliche Anwendung der entwickelten Verbund-Slim-Floor-Träger (CoSFB), deren Potenzial durch Projektbeispiele demonstriert wird.

**Analysis of the composite action of concrete dowels – Application of concrete dowels for slim-floor construction (CoSFB).** *With the aim to design slim-floor beams more economically, acting as composite beams, concrete dowels have been investigated to transfer the longitudinal shear force. First pilot tests executed in 2009 have demonstrated a great potential of this new construction system. It has also shown that the existing models for concrete dowels cannot be directly applied. Consequently, further test campaign has been carried out in 2011 to extend the already examined application range of the concrete dowels with slim-floor beams and to obtain General Technical Approval from the Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt - German Institute for Civil Engineering). Through out all the tests, a ductile behaviour of concrete dowels has been confirmed. The analysis of the test results leads further to the conclusion that the ultimate load bearing capacity is mainly composed of three bearing parts: a concrete compression strut running into the dowel, resistance of the reinforcement bar and friction. In this paper, an influence of the concrete compressive strength on the load bearing capacity of the shear connection is specifically explained, since the experiments showed that a higher concrete compressive strength has not necessarily led to a higher load bearing capacity of the dowels. From the experimental results recommendations for the charac-*

*teristic longitudinal shear capacity of the concrete dowels in the examined application were derived and are presented in here. The paper also provides guideline to the design, promoting economic application of the developed composite slim-floor beam (CoSFB), whose potential is demonstrated by examples of realized projects.*

### 1 Einleitung

Im Verbundbau wird das wirtschaftliche Zusammenwirken von Baustahl- und Betonquerschnitt durch das Übertragen der Längsschubkräfte in der Verbundfuge erzielt. Neben den üblichen Kopfbolzendübeln haben sich Betondübel zur Sicherstellung des Verbundes bewährt. Betondübel übertragen die Längsschubkräfte vom Baustahl in den Beton über mit Beton verfüllte Ausnehmungen in Stahlbauteilen [1]. Als tiefliegende Betondübel werden solche definiert, bei denen ein Ausbrechen des Betons nicht auftritt (Ausstanzen nach [1]). Der Einsatz von tiefliegenden Betondübeln, wie z. B. Stegbohrungen mit durchgeführter Querbewehrung bei teilweise einbetonieren Stahlquerschnitten (WiB Walzträger im Beton), ist bereits seit Jahrzehnten im Brückenbau etabliert. Von den rund 31000 Eisenbahnbrücken der Deutschen Bahn AG sind ca. 25 % als WiB-Brücken ausgeführt [2]. Folgt man den Festlegungen nach [3], dürfen auf Basis empirischer Ergebnisse für die WiB-Bauweise die Einflüsse aus dem Schlupf zwischen dem Baustahl- und dem Betonquerschnitt vernachlässigt werden. Im üblichen Hochbau haben sich Betondübel bis dato jedoch noch nicht durchgesetzt. Erste Entwicklungen liegen durch die seit 1991 bauaufsichtlich zugelassene Perforobondleiste vor, bei der bereits geschlossene Ausnehmungen (Lochleiste) durch einen Bemessungsansatz erfasst wurden [4].

Um Slim-Floor-Träger möglichst wirtschaftlich als Verbundträger auszubilden, ist die Verwendung von Betondübeln sehr vielversprechend. Durch sie kann der Verbund gesichert werden, und zwar ohne erhebliche Mehrkosten in der Fertigung zu verursachen oder die Konstruktionshöhe des Deckensystems zu erhöhen. Neben ihrer hohen Tragfähigkeit und ihrem duktilen Verhalten ist vor allem ihre Wirtschaftlichkeit von Vorteil. Um die Anwendbarkeit von Betondübeln für Verbund-Slim-Floor-Träger (CoSFB Composite Slim-Floor Beam) zu überprüfen, führte Arcelor-Mittal bereits 2009 Versuche zu dieser neuen Bauweise durch ([5], [6]). Das Versuchsprogramm beinhaltete zwei

Biegeträgerversuche von 8 m Länge, mittels der das globale Trag- und Verformungsverhalten untersucht wurde. Auch wurden zwei Schubträgerversuche von 4 m Länge durchgeführt, die das duktile Verhalten der Verbundfuge bestätigten. Das vollplastische Verhalten der CoSFB-Träger und das Ausbilden der effektiven Breite wurden nachgewiesen. Zur Beurteilung des Trag- und Verformungsverhaltens der tiefliegenden Betondübel wurden des Weiteren zwei Serien von jeweils drei Push-out-Versuchen im Jahr 2009 durchgeführt. Belegen die Ergebnisse der Versuche das große Potenzial dieser neuen Bauweise, machen sie aber auch deutlich, dass bestehende Bemessungsmodelle für Betondübel (u. a. [1], [7], [8], [9]) für diese Anwendung nicht ohne weiteres verwendet werden können. Vor allem der Einfluss der Betondruckfestigkeit bedurfte zusätzlicher Überlegungen (s. Abschnitt 3).

Mit dem Ziel, den untersuchten Anwendungsbereich der Betondübel bei Slim-Floor-Trägern zu erweitern und eine bauaufsichtliche Zulassung für die Verwendung von tiefliegenden Betondübeln im Bereich der ausbetonierten Kammer von Walzprofilen zu erwirken, wurden im Jahr 2011 weitere Push-out-Versuche durchgeführt ([10], [11]). Hierbei wurden die für die Tragfähigkeit und das Tragverhalten maßgebenden Einflussgrößen wie Betondruckfestigkeit, Durchmesser der Bewehrung, Durchmesser der Stegbohrung und der Stegdicke näher untersucht. In Bild 1 ist der Querschnitt des CoSFB mit Betondübel dargestellt. Zur Durchführung der Dübelbewehrung werden Bohrungen im Steg, möglichst direkt unter der oberen Ausrundung des Walzprofils, angeordnet. Der Bewehrungsstab und die Stegbohrungen werden beim Betonieren der Decke direkt mitvergossen. Die Versuche wurden an der Materialprüfungsanstalt der Universität Stuttgart und unter Leitung von Frau Prof. *Kuhlmann* (Lehrstuhl für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart) durchgeführt. Im vorliegenden Beitrag wird auf Basis dieser Versuche das Tragverhalten von Betondübeln bei der Anwendung mit Slim-Floor-Trägern allgemein erläutert, es wird auf Besonderheiten eingegangen und es werden Empfehlungen zur Bemessung und Konzeption gegeben.

## 2 Push-out-Versuche

### 2.1 Versuchsprogramm

Im Jahr 2011 wurden insgesamt 21 Push-out-Versuche an der Materialprüfungsanstalt Stuttgart durchgeführt [10]. Eine Übersicht des Versuchsprogramms ist in Tabelle 1 dargestellt. Die Versuchsdurchführung erfolgte nach [12]. Um den Einfluss einzelner Parameter auf die Traglast zu bestimmen, wurde zwischen den einzelnen Versuchsreihen

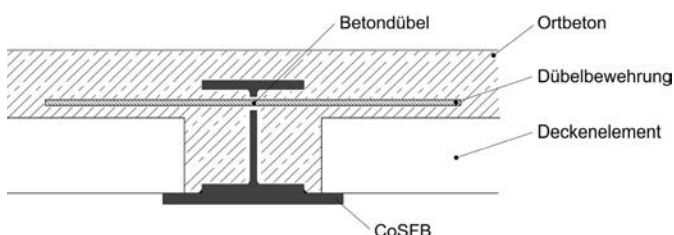


Bild 1. CoSFB – integrierter Deckenträger in Verbundbauweise

Fig. 1. CoSFB – composite slim-floor beam

Tabelle 1. Relevante Push-out-Versuche, Stuttgart 2011

Table 1. Relevant Push-out Tests, Stuttgart 2011

Serie	$t_w$ mm	$d_D$ mm	$d_b$ mm	$h_c$ cm	$f_{c,cyl}$ N/mm <sup>2</sup>	$P_{max}$ kN
1a	15,5	40	12	16	26,7	1964
1b	15,5	40	12	16	55,1	1655
2-1a	7,5	40	12	15	29,5	1728
2-1b	7,5	40	12	15	58,2	1591
2-2a	15,5	25	12	14,5	32,7	2030

jeweils nur ein Parameter variiert. In jeder Serie wurden drei Push-out-Versuche durchgeführt. Die angegebenen Werte für  $f_{c,cyl}$  und die der erzielten Traglast  $P_{max}$  stellen hierbei jeweils den Mittelwert der entsprechenden Dreierreihe dar. Es ist direkt ersichtlich, dass die erzielten Tragfähigkeiten den Schluss einer linearen Zunahme der Tragfähigkeit in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit nicht zulassen. Somit decken die in [1], [7], [8] und [9] angegebenen Bemessungsmodelle den hier vorgesehenen Anwendungsbereich nicht ab.

### 2.2 Versuchsbeschreibung

In Bild 2 sind die Versuchskörper schematisch dargestellt. Die Pressenlast  $P$  wurde über einen Querträger und Lasteinleitungsplatten in die Stahlbauteile eingeleitet. Die beiden Hälften des Versuchskörpers wurden zum gleichen Zeitpunkt und liegend betonierte, später wurden sie zum endgültigen Versuchskörper zusammengeschweißt. Somit entspricht die Lage der Versuchskörper beim Betonieren auch der späteren Betonierlage der Bauteile auf der Baustelle. Je Push-out-Körper und -Seite wurden fünf Lagen Dübelbewehrung angeordnet. Zur Messung der Dehnungen der Bewehrungsstäbe wurden an ausgewählten Stellen ein bzw. zur Erfassung möglicher Stabbiegung drei DMS angeordnet. Der Schlupf zwischen Walzprofil und Beton wurde an zwei Stellen gemessen ( $\delta_1$  und  $\delta_2$ ). Die Dübelbewehrung verbindet das Walzprofil mit den Betongurten, wobei nicht nur die Stegbohrung, sondern stets die komplette Kammer der Walzprofile ausbetoniert wurde (Bild 2).

Bei den Versuchen zeigten die Betondübel ein duktileres Verhalten. Das Versagen ist stets durch Überschreiten der Bruchdehnung der Bewehrung eingetreten. Ein Versagen des Betons, etwa durch Abscheren, Abplatzen oder ähnlich, konnte hier nicht beobachtet werden.

## 3 Traglast und Tragverhalten tiefliegender Betondübel

### 3.1 Traglast

Die Analyse der Versuche ergab, dass sich die Traglast im Wesentlichen aus den Anteilen Betondruckstrebe, Bewehrungsstab und Reibung zusammensetzt. Im Bereich der Stegbohrungen wird die anteilige Last  $P_\Delta$  über lokale Pressung der Stirnfläche des Steges in den Beton eingeleitet und über Betondruckspannungen in den Betongurt weitergeleitet. Diese Betondruckspannungen können vereinfacht zu einer Betondruckstrebe zusammengefasst werden. Der Beton direkt im Bereich der Stegbohrung unterliegt einem nahezu hydrostatischen Spannungszustand, seine Druck-

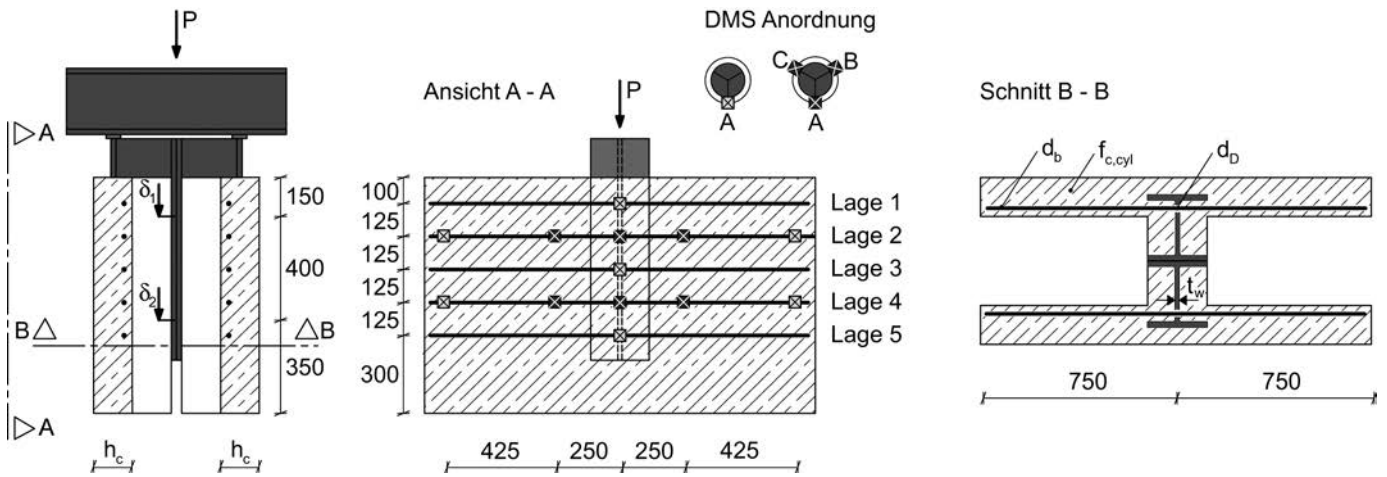


Bild 2. Schematische Darstellung der Push-out-Versuche  
 Fig. 2. Push-out tests, schematic drawing

festigkeit beträgt hier ein Vielfaches der einaxialen Druckfestigkeit  $f_{ck}$  ([1], [13]). Im anschließenden Betongurt breiten sich die Druckspannungen aus, und da die zugehörigen Querspannungen hier nicht in gleichem Maße durch äußeren Querdruk begrenzt werden, ist im Betongurt die Druckfestigkeit geringer und wird auf die einaxiale Beton-druckfestigkeit  $f_{ck}$  limitiert (Bild 3).

Der Anteil der Dübelbewehrung an der Traglast hängt vom Verhältnis der Querkrafttragfähigkeit des Bewehrungsstabes zur lokal aufnehmbaren Betonpressung ab. Ist die Querkrafttragfähigkeit des Bewehrungsstabes größer als die aufnehmbare Betonpressung, so ist der Stab in der Lage, den Beton lokal zu schädigen. Der Stab verschafft sich Raum,

kann sich verformen und wird so nicht mehr ausschließlich durch eine Querkraft, sondern ebenfalls durch eine Zugkraft beansprucht. Paulay [15] bezeichnet diese Querkraftbeanspruchung als „Kinking“ (Bild 4a). Ist die Querkrafttragfähigkeit des Bewehrungsstabes jedoch kleiner als die aufnehmbare Betonpressung, so ist der Stab nicht in der Lage, den Beton lokal zu schädigen. In diesem Fall wird die Querkrafttragfähigkeit des Stabes maßgebend (Bild 4b).

Mit zunehmender Verformung der Bewehrung wird zusätzlich eine Reibkraft zwischen Beton und Trägersteg aktiviert (Bild 5). Die Aktivierung einer Reibkraft ist auch bei Versuchen mit Kopfbolzendübeln zu beobachten [16].

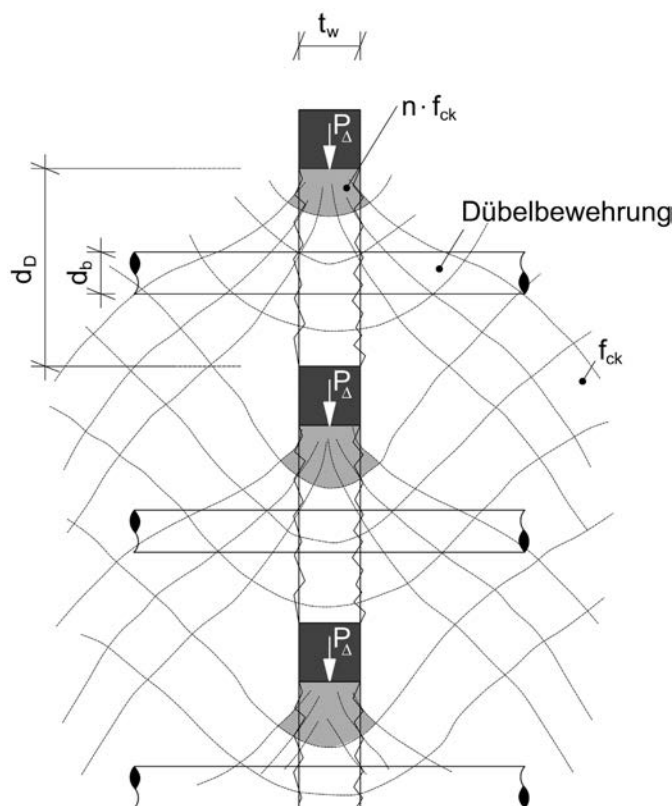


Bild 3. Verlauf der Spannungstrajektorien im Bereich der Stegbohrung [14]  
 Fig. 3. Stress-trajectories at the web-opening [14]

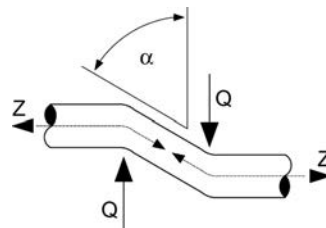


Bild 4a. Querkraftbeanspruchung der Dübelbewehrung nach [15]  
 Fig. 4a. “Kinking” of the dowel reinforcement according to [15]

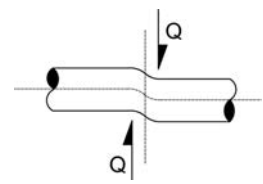


Bild 4b. Reine Querkraftbeanspruchung der Dübelbewehrung  
 Fig. 4b. Pure shear action on the dowel reinforcement



Bild 5. Verformter Bewehrungsstab nach dem Versuch  
 Fig. 5. Shape of the deformed bar after testing

### 3.2 Tragverhalten

Das allgemeine Last-Verformungsverhalten wird mit dem in Bild 6 angegebenen Last-Schlupf-Verlauf für Beton 1 ( $f_{c,cyl} = 26,8 \text{ N/mm}^2$ ) und der für das Tragverhalten signifikanten Punkte A bis E erläutert.

Der Kurvenverlauf zwischen den Punkten A und B (= elastischer Bereich) ist durch eine hohe Steifigkeit gekennzeichnet. Eine Laststeigerung bewirkt nur eine geringe Relativverschiebung und führt in diesem Bereich vornehmlich zur Stauchung des Betons im Bereich der Stegbohrung. Beton und Bewehrung beteiligen sich im Verhältnis ihrer Steifigkeit am Lastabtrag, bis schließlich die Beanspruchung der Bewehrung so groß wird, dass die Streckgrenze des Materials erreicht wird, Punkt B. Das Erreichen der Streckgrenze kennzeichnet den Beginn des nicht-linearen Bereiches zwischen den Punkten B und C. Zwar kann zur Bestimmung der Traglast von einer gleichmäßigen Aufteilung der Last  $P$  auf die einzelnen Lagen der Dübelbewehrung ausgegangen werden, jedoch erreichen sie im Versuch nicht alle gleichzeitig ihre Streckgrenze. Der Stab, der der Lasteinleitungsstelle am nächsten liegt (Stab in Lage 1, Bild 2), erreicht zuerst seine Streckgrenze. Die Differenz der Beanspruchung der einzelnen Bewehrungslagen ist proportional zur Betonsteifigkeit. Je steifer der Beton ist, umso gleichmäßiger werden die einzelnen Bewehrungsstäbe beansprucht. Mit steigender Belastung erreichen dann sukzessive auch die tieferen Bewehrungsstäbe ihre Streckgrenze, bis schließlich in Punkt C alle Bewehrungslagen ihre Streckgrenze erreicht haben. Dies wurde durch die Auswertung der einzelnen DMS-Messwerte in den Versuchen bestätigt. Weitere Laststeigerung ist noch möglich, da der Querschnitt der Bewehrungsstäbe im nicht-linearen Bereich noch nicht vollständig plastiziert ist und somit noch über Tragreserven verfügt. Mit zunehmendem Schlupf wird auch der Winkel  $\alpha$  des Stabes kleiner. Das Verhältnis von Querkraft zu Zugkraft reduziert sich,

und da die Zugkrafttragfähigkeit der Bewehrung größer als die Querkrafttragfähigkeit ist, werden zusätzliche Tragreserven aktiviert. Auch wird mit zunehmender Stabverformung eine Reibkraft aktiviert (vgl. Bild 5). Schließlich ist ab Punkt D keine Laststeigerung mehr möglich, da die Querschnitte aller Bewehrungslagen nun vollständig plastiziert sind. Versagen erfolgt in der Dübelbewehrung durch ein Überschreiten der Bruchdehnung (Punkt E).

### 3.3 Einfluss der Betondruckfestigkeit

Der Einfluss der Betondruckfestigkeit lässt sich anhand der beiden in Bild 6 dargestellten Last-Schlupf-Kurven erläutern. Die am Versuchstag gemessene Druckfestigkeit des Betons „1“ betrug  $f_{c,cyl} = 26,8 \text{ N/mm}^2$  und die des Betons „2“  $f_{c,cyl} = 56,1 \text{ N/mm}^2$ . Es zeigt sich, dass eine höhere Betondruckfestigkeit nicht zwangsläufig auch zu einer höheren Traglast der Verdübelung führt. Wie bereits in Abschnitt 3.1 ausgeführt, ist die Ursache hierfür in der Art der Beanspruchung der Bewehrung zu suchen, welche direkt auf das Verhältnis der Querkrafttragfähigkeit der Bewehrung zur aufnehmbaren Betonpressung zurückgeführt werden kann. Der gewählte Bewehrungsdurchmesser von 12 mm war bei Beton „1“ in der Lage, den Beton lokal so zu schädigen, dass eine Stabkrümmung möglich wurde. Die Dübelbewehrung wurde auf Querkraft aktiviert. Somit entzieht sich die Dübelbewehrung durch die bei Laststeigerung zunehmende Verformung mehr und mehr einer reinen Querkraftbeanspruchung. Der Versuchskörper des höherfesten Betons „2“ verbleibt zwar bis zu einem höheren Lastniveau als der des Betons „1“ im elastischen Bereich, jedoch geht die Traglastkurve bei einer weiteren Laststeigerung recht schnell in einen nahezu horizontalen Verlauf über. Auch erfolgt das Versagen der Dübelbewehrung bereits bei einem Schlupf von ca. 16 mm, also deutlich früher als bei Beton „1“ mit einem Schlupf von ca. 26,5 mm. Das hier beobachtete Tragverhalten ist dem von Kopfbolzendübeln im

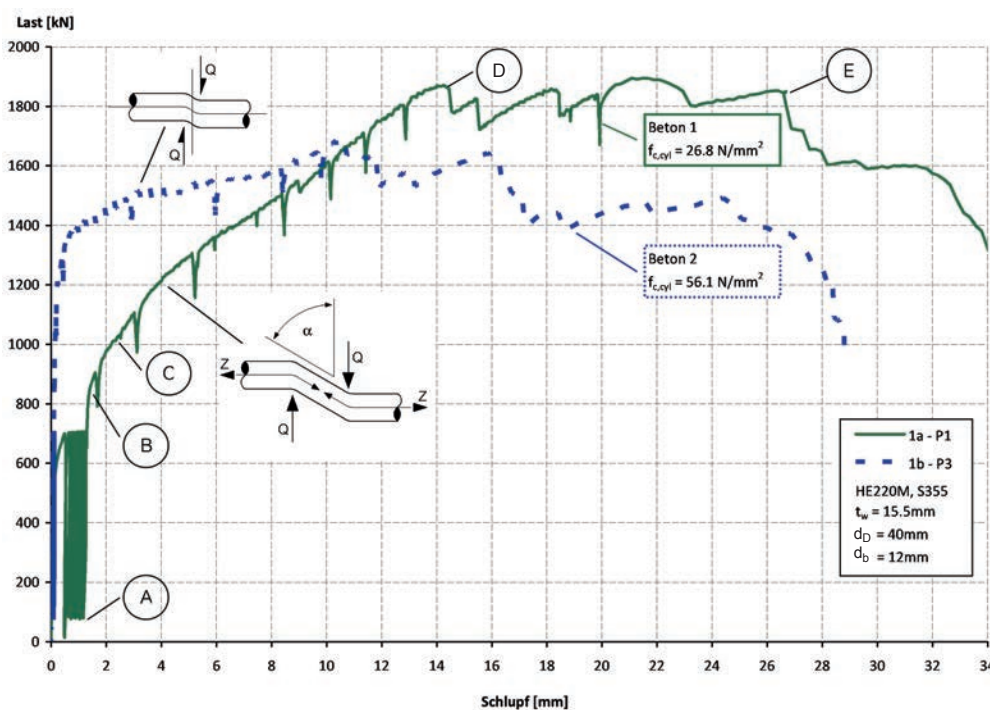


Bild 6. Last-Schlupf-Kurven  
Fig. 6. Load-Slip Curves

hochfesten Beton ähnlich [17]. Bei den Versuchen mit Beton „2“ war der gewählte Bewehrungsdurchmesser von 12 mm nicht in der Lage, den Beton lokal ausreichend zu beschädigen. Es erfolgte keine nennenswerte Verformung der Stabachse, die Bewehrung wurde im kritischen Schnitt ausschließlich durch eine Kraft senkrecht zur Stablängsachse beansprucht. Die unterschiedliche Beanspruchung der Dübelbewehrung und das Tragverhalten in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit wurden durch die Auswertung der DMS-Messungen und die Kontrolle der Bewehrungsstäbe, die Probekörper wurden nach den Versuchen aufgestemmt, bestätigt.

#### 4 Empfehlungen zur Bemessung

Die Ergebnisse der durchgeführten Push-out- und Trägerversuche ([5], [6], [10], [11]), auf die hier im Einzelnen nicht eingegangen werden kann, führten zu den in Tabelle 2 angegebenen Werten. Sie stellen die in einer statistischen Auswertung nach [18] ermittelten charakteristische Werte der Dübeltragfähigkeit dar. Der hierbei zur Ermittlung der Bemessungswerte zu verwendende Teilsicherheitsbeiwert  $\gamma_v$  beträgt 1,25.

Die CoSFB-Betondübel haben sich in den Versuchen ausreichend duktil verhalten, so dass sie in Trägerlängsrichtung äquidistant angeordnet werden können. Auch ist die Anwendung der Teilverbundtheorie möglich. Der Achsabstand der Stegbohrungen darf 125 mm nicht unterschreiten. Trägerversuche haben die Aktivierung des Betongurtes gemäß [12] bestätigt, der Nachweis ausreichender Längsschubtragfähigkeit der Betongurte ist in den kritischen Schnitten zu führen und die Dübelbewehrung ist ausreichend im Betongurt zu verankern. Über dem Trägeroberflansch ist eine Mindestbewehrung und Bewehrung zur Begrenzung der Rissbreite anzuordnen.

Es wird empfohlen, zumindest den Nachweis der Betondruckspannungen am oberen Querschnittsrand zu führen. Insbesondere ist darauf zu achten, dass in der Kammer ein Vollbetonquerschnitt vorhanden sein muss. Ein Auflegen von Profilblechen oder ähnlich, ist im Bereich der Kammer des Trägers nicht zulässig.

#### 5 Hinweise zum Entwurf

Durch die Kombination von Betondübeln mit integrierten Deckenträgern wird der Anwendungsbereich der Slim-Floor-Bauweise deutlich erweitert. War bis dato die Spannweite der Deckenträger aus wirtschaftlichen Gründen meist auf etwa 7 m begrenzt, so sind nun mit dem CoSFB Spannweiten bis 12 m und sogar 14 m möglich [19]. Der Materialverbrauch der Slim-Floor-Bauweise ist optimiert, ihre Wirtschaftlichkeit und ihre ökobilanzielle Betrachtung insgesamt verbessert. Große Spannweiten ermöglichen eine

Reduzierung der Anzahl an Innenstützen. So entstehen große, stützenfreie Räume mit hoher Flächeneffizienz, welche individuell an die Bedürfnisse der Nutzer angepasst werden können. Sie sind nutzungsfreundlich und bieten maximale Flexibilität bei minimalen Herstellungskosten.

Die Integration des Trägers in die Decke ermöglicht eine sehr einfache Installation der Haustechnik unter der Decke. Sie ist auch bei späteren Umnutzungen leicht zugänglich. Da aufwändige Trägerdurchführungen nicht erforderlich sind, wird sowohl die Planungsphase als auch der Bauablauf signifikant vereinfacht. Feuerwiderstandsklassen bis R60 können ohne zusätzliche Maßnahmen erfüllt werden, R90 ist mit geringem Aufwand möglich. Höhere Feuerwiderstandsklassen können durch einfaches Schützen der angeschweißten Auflagerplatte ebenfalls kostengünstig realisiert werden.

Allgemein ist in der Konzeption darauf zu achten, dass die Deckenspannweite möglichst groß gewählt wird. Das Trägergewicht liegt in der Regel zwischen 20 kg/m<sup>2</sup> und 25 kg/m<sup>2</sup>. Beträgt die mögliche Spannweite L von Slim-Floor-Trägern ohne Verbundtragwirkung etwa  $L = h \cdot 25$  (mit h = Trägerhöhe), so kann die Spannweite der CoSFB sogar  $L = h \cdot 35$  und mehr betragen. Es können Deckenfelder von bis zu 10 m × 14 m mit einer Konstruktionshöhe von lediglich 40 cm frei überspannt werden.

#### 6 Referenzprojekte

Die im Folgenden kurz vorgestellten Projekte stehen stellvertretend für eine Vielzahl in unseren europäischen Nachbarländern ausgeführter Projekte. Vor allem in Frankreich wird die CoSFB-Bauweise bereits erfolgreich eingesetzt. Die Verwendung von Profilblechdecken (z. B. Cofraplus 220 [20]) und Stahlkassettendecken (z. B. Cofradal 200, Cofradal 260) führt zu einer Optimierung des Eigengewichtes der Deckenkonstruktion und hat sich als äußerst wirtschaftlich und effizient herausgestellt (Bild 7). Der hohe Vorfertigungsgrad ermöglicht einen beschleunigten Baufortschritt und minimiert die Lohnkosten der Bauphase. Folglich werden bei dieser Bauweise nicht nur der Verbrauch an Rohstoffen und Primärenergie reduziert, sondern auch die allgemeinen Gestehungskosten. Der äußerst geringe Materialverbrauch verringert die Anzahl an Materialtransporten zur Baustelle auf ein Mindestmaß und die belastenden Emissionen aus dem Baustellenbetrieb werden ebenfalls erheblich reduziert. Aufgrund ihres somit nur geringen Bedarfs an Primärenergie und ihres sehr niedrigen CO<sub>2</sub>-Äquivalentes pro Quadratmeter Deckenfläche, der flexiblen Nutzung der Räume bei hohem Nutzerkomfort und dem großen Recyclingpotenzial der Tragkonstruktion ist diese Bauweise in der ganzheitlichen Bewertung äußerst nachhaltig [21].

Bild 8 zeigt das Deckenfeld vor dem Betonieren des ersten Obergeschosses eines 2011 erstellten Bürogebäudes

Tabelle 2. Empfohlene charakteristische Werte der Längsschubtragfähigkeit je Ausnehmung  $P_{Rk}$  in [kN]  
 Table 2. Recommended characteristic values of the dowel resistance  $P_{Rk}$  in [kN] per dowel

Betonklasse/Stegdicke	C25/30	C30/37	C35/45	C40/50 bis C55/67
$7,5 \text{ mm} \leq t_w < 15,5 \text{ mm}$	117	125	135	122
$15,5 \text{ mm} \leq t_w$	148	157	166	122

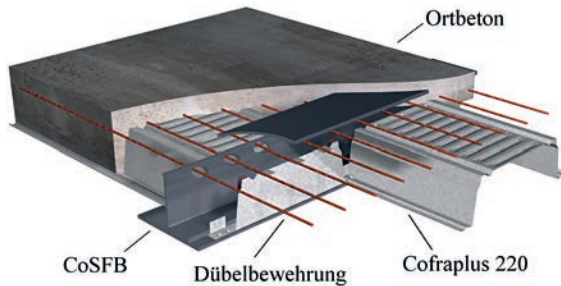


Bild 7. CoSFB mit Cofraplus 220  
Fig. 7. CoSFB with Cofraplus 220

in Maizières-lès-Metz, Frankreich. Der CoSFB wurde hier mit Cofradal 200, eine in Frankreich zugelassene Stahlkassettendecke, kombiniert. Bei einer Spannweite von über 12 m beträgt die Konstruktionshöhe des CoSFB lediglich 30 cm. Der Trägerabstand von nur 5,58 m führte einerseits zu relativ geringen Beanspruchungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit, andererseits jedoch auch zu einer geringen modalen Masse, wodurch besonderes Augenmerk auf die Schwingungsanalyse zu legen war.

Die Rekonstruktion eines historischen Gebäudes in Zlin, Tschechien, zeigt Bild 9. Um die Stützen und Fundamente des Bestandes ohne aufwändige Verstärkungen weiterhin zu verwenden, wurde eine Konstruktion mit möglichst geringem Eigengewicht verwendet. Die Kombination von integrierten Deckenträgern mit Cofraplus 220 hat sich hierbei, unter den gegebenen Randbedingungen, als optimale Lösung erwiesen.

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

In den Jahren 2009 und 2011 wurde im Rahmen zweier Versuchprogramme die Anwendung tiefliegender Betondübel zur Realisierung von Slim-Floor-Trägern in Verbundbauweise (CoSFB) untersucht. Das duktile Tragverhalten

der Betondübel sowie die Möglichkeit einer plastischen Bemessung der CoSFB wurde bestätigt. Die Auswertung der 2009 durchgeführten Versuche zeigte, dass eine höhere Betondruckfestigkeit nicht zwangsläufig zu einer höheren Traglast der Betondübel führt. Somit geben, im Rahmen der geplanten Anwendung, bestehende Bemessungsmodelle die Traglasten nur unzureichend wieder. Die Analyse der zur Untersuchung dieses Phänomens abgestimmten Versuchsreihen von 2011 führte zu der Erkenntnis, dass sich die Traglast im Wesentlichen aus den Anteilen einer in den Dübel laufenden Betondruckstrebe, der Tragfähigkeit der Dübelbewehrung und aus Reibung zusammensetzt. Das Tragverhalten der tiefliegenden Betondübel wird detailliert beschrieben. Es konnte abgeleitet werden, dass bei höheren Betondruckfestigkeiten eine Umlagerung der Beanspruchung des Bewehrungsstabes von einer reinen Querkraft in eine Quer-Zug-Interaktion eingeschränkt wird und hieraus geringere Traglasten bei geringerer Duktilität der Verdübelung resultieren. Basierend auf den Versuchsergebnissen werden Empfehlungen zur Bemessung der Verbundfuge gegeben. Sie berücksichtigen den beschriebenen Einfluss der Betondruckfestigkeit und stellen die Anwendung auch bei Baustellenbeton mit außerplanmäßig hoher Betondruckfestigkeit sicher. Somit liegt nun eine Grundlage zur Bemessung der Betondübel im untersuchten Anwendungsbereich vor. Die im Beitrag gegebenen Hinweise erleichtern den Entwurf und die wirtschaftliche Anwendung der entwickelten Verbund-Slim-Floor-Träger. Ausgeführte Projekte belegen die Wirtschaftlichkeit und Praxistauglichkeit dieser Bauweise. Ein Antrag zur Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung liegt dem DIBT vor, ein positiver Bescheid wird erwartet. Durch die Zulassung wird die von ArcelorMittal entwickelte CoSFB-Bauweise der Allgemeinheit zugänglich. In einem weiteren Beitrag werden die Trägerversuche detailliert beschrieben und die statistische Auswertung der in Tabelle 2 angegebenen Dübeltragfähigkeiten erläutert.



Bild 8. CoSFB + Cofradal 200, Maizières-lès-Metz, France  
Fig. 8. CoSFB + Cofradal 200, Maizières-lès-Metz, France



Bild 9. Kulturhaus in Zlin, Tschechien  
Fig. 9. Regional Culture House, Zlin, Czech Republic

### Danksagung

Vielen Dank an die MPA Stuttgart für die professionelle Durchführung der Versuche. Unser besonderer Dank gilt Frau Prof. U. Kuhlmann und ihren Mitarbeitern, Herrn Dr.-Ing. G. Hauf, Herrn Dipl.-Ing. F. Eggert und Herrn Dr.-Ing. M. Konrad für ihren persönlichen Einsatz.

### Literatur

- [1] Feldmann, M., Hegger, J. et al.: Neue Systeme für Stahlverbundbrücken – Verbundfertigteilträger aus hochfesten Werkstoffen und innovativen Verbundmitteln. Forschungsprojekt P804, Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA), 2012.
- [2] Schmitt, V. et al.: Untersuchung zum verstärkten Einsatz von Stahlverbundkonstruktionen bei Brücken kleiner und mittlerer Spannweite. Forschungsprojekt P629, Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA), 2005.
- [3] DIN EN 1994-2: Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 2: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für Brücken. Dezember 2010.
- [4] Andrä, H.-P.: Neuartige Verbundmittel für den Anschluss von Ortbetonplatten an Stahlträger. Beton- und Stahlbetonbau 80 (1985), H. 12, S. 325–328.
- [5] Hechler, O., Braun, M., Hauf, G., Kuhlmann, U.: CoSFB – The Composite Slim-Floor Beam. 6<sup>th</sup> European Conference on Steel and Composite Structures (Eurosteel). Budapest, Hungary, 2011.
- [6] Kuhlmann, U. et al.: Push-out and girder tests for the determination of the bending capacity and longitudinal shear capacity of Composite Slim-Floor girder with Cofradal 200 deck elements. Versuchsbericht (unveröffentlicht). Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2010.
- [7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – Perfobondleiste. Deutsches Institut für Bautechnik, Zulassungsnummer Nr. Z-26.4-38, Berlin 2007.
- [8] Wurzer, O.: Zur Tragfähigkeit von Betondübeln. Dissertation am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr, München 1998.

- [9] Zapfe, C.: Trag- und Verformungsverhalten von Verbundträgern mit Betondübeln zur Übertragung der Längsschubkräfte. Dissertation am Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, Universität der Bundeswehr, München 2001.
- [10] Kuhlmann, U., Hauf, G., Eggert, F.: Push-out-Versuche zur Bestimmung der Längsschubtragfähigkeit von Verbund “Slim-Floor”-Trägern. Versuchsbericht (unveröffentlicht). Institut für Konstruktion und Entwurf, Universität Stuttgart, 2013.
- [11] Hechler, O., Braun, M., Obiala, R., Hauf, G., Eggert, F., Kuhlmann, U.: CoSFB – Composite Slim-Floor Beam – Experimental Test Campaign and Evaluation. Composite Construction VII, Australia, 2013.
- [12] DIN EN 1994-1-1: Eurocode 4: Bemessung und Konstruktion von Verbundtragwerken aus Stahl und Beton – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Anwendungsregeln für den Hochbau. Dezember 2010.
- [13] Lieberum, K.-H., Reinhardt, H.-W., Weigler, H.: Das Tragverhalten von Beton bei extremer Teilflächenbelastung. Beton- und Stahlbetonbau 84 (1989), H. 1, S.1–5.
- [14] Leonhardt, F., Andrä, W., Andrä, H.-P., Harre, W.: Neues vorteilhaftes Verbundmittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit. Beton- und Stahlbetonbau 82 (1987), H. 12, S. 325–331.
- [15] Paulay, T., Park, R., Phillips, M. N.: Horizontal Construction Joints in Cast-In-Place Reinforced Concrete. Special Publication 42–27, pp. 599–616, American Concrete Institute, 1974.
- [16] Lungershausen, H.: Zur Schubtragfähigkeit von Kopfbolzendübeln. Mitteilung 88-7, Institut für konstruktiven Ingenieurbau Ruhr-Universität Bochum, 1988.
- [17] Feldmann, M., Hegger, J., Hechler, O., Rauscher, S.: Untersuchungen zum Trag- und Verformungsverhalten von Verbundmitteln unter ruhender und nichtruhender Belastung bei Verwendung hochfester Werkstoffe. Forschungsprojekt P621, Forschungsvereinigung Stahlanwendung (FOSTA), 2007.
- [18] DIN EN 1990: Eurocode: Grundlagen der Tragwerksplanung. Dezember 2010.
- [19] Braun, M., Hechler, O., Birarda, V.: 140 m<sup>2</sup> Column Free Space due to Innovative Composite Slim Floor Design. 9th International Conference on Steel Concrete Composite and Hybrid Structures. Leeds, UK, 2009.
- [20] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung – ArcelorMittal Systemdecke Cofraplus 220. Deutsches Institut für Bautechnik, Zulassungsnummer Nr. Z-26.1-55, Berlin 2013.
- [21] Braun, M., Hechler, O., Hauf, G., Kuhlmann, U.: Embodied energy optimization by innovative structural systems. Final Conference of the COST Action C25: Sustainability of Constructions – Towards a better built environment. Innsbruck, Austria, 2011.

### Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. Mathias Braun,  
mathias.braun@arcelormittal.com,  
Dr.-Ing. Oliver Hechler,  
oliver.hechler@arcelormittal.com,  
Dr.-Ing. Renata Obiala,  
renata.obiala@arcelormittal.com,  
ArcelorMittal Europe – Long Products,  
66, rue de Luxembourg,  
4009 Esch-sur-Alzette,  
Luxembourg