

This is the peer reviewed version of the following article:

Abramski M., Friedrich T., Kurz W., Schnell J., Tragwirkung von Betondübeln für Sandwich-Verbunddecken mit großen Stegöffnungen, STAHLBAU, Vol. 79, Iss. 4 (2010), pp. 248-258,

which has been published in final form at <https://doi.org/10.1002/stab.201001322>. This article may be used for non-commercial purposes in accordance with Wiley Terms and Conditions for Use of Self-Archived Versions. This article may not be enhanced, enriched or otherwise transformed into a derivative work, without express permission from Wiley or by statutory rights under applicable legislation. Copyright notices must not be removed, obscured or modified. The article must be linked to Wiley's version of record on Wiley Online Library and any embedding, framing or otherwise making available the article or pages thereof by third parties from platforms, services and websites other than Wiley Online Library must be prohibited

Marcin Abramski¹

Thomas Friedrich²

Wolfgang Kurz³

Jürgen Schnell⁴

Tragwirkung von Betondübeln für Sandwich-Verbunddecken mit großen Stegöffnungen

Abstract

Neuartige Konzepte zur ökologisch und ökonomisch sinnvollen Ausrüstung von Büroimmobilien und vergleichbaren Gebäuden verlangen nach schlüssiger Integration gebäudetechnischer Anlagen in die Tragkonstruktion. In diesem Beitrag wird über experimentelle Untersuchungen an verformungsarmen Stahlverbund-Sandwichelementdecken mit Spannweiten von bis zu 16m und Breiten bis zu 3m, bei denen bereits bei der Herstellung Haustechnikkomponenten (Elektro, Lüftung, Heizung, Klima usw.) integriert werden, berichtet.

Die Deckenelemente bestehen aus zwei Platten von je 10 cm Dicke mit einem dazwischen liegenden Hohlraum von 20 cm Höhe. Die Verbindung von oberer und unterer Platte erfolgt mit Stahlblechen sowie bewehrten Betonstegen. Die Bauelemente weisen einen vorgespannten Verbundquerschnitt auf. Die Vorspannung erfolgt ohne Verbund. An den Stegöffnungen werden lokal große Kräfte zwischen den Stahl- und den Betonquerschnitten übertragen. Hier wurde eine alternative Lösung zu der recht aufwendigen Ausführung mit liegenden Kopfbolzendübeln untersucht: puzzleförmige Betondübel an den Rändern des Stahlstegs mit und ohne wendelförmiger Umschnürung. Ein besonderes Augenmerk lag dabei auf der Tragfähigkeit der Bauelemente in der Nähe von Stegöffnungen.

In diesem Beitrag werden die Systementwicklung dargestellt und experimentelle Untersuchungen der Beton-Sandwich-Elementdecke beschrieben.

¹ Dr.-Ing., Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

² Dipl.-Ing., Domostatik GmbH, Cusanusstraße 45, 54470 Bernkastel-Kues

³ Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Stahlbau, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

⁴ Prof. Dr.-Ing., Technische Universität Kaiserslautern, Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion, Paul-Ehrlich-Straße 14, 67663 Kaiserslautern

Transferring of loads by concrete dowels in sandwich composite floors with large web openings

Abstract

Modern conceptions of economically and ecologically sensible HVACR installations in residential and public buildings require their integration in the structure. The paper presents experimental investigation on precast sandwich composite steel-concrete floor with spans of up to 16m and width up to 3m, in which the HVACR installations (heating, ventilation, air conditioning, electricity etc.) are integrated already at a concrete plant.

The floor consist of two 10 cm thick concrete slabs on both top and bottom sides with 20 cm high blank space between them. Both slabs are connected with vertical steel plates as well as reinforced concrete webs. The floors are post-tensioned prestressed. There are high local forces being transferred between the concrete slabs and the steel web. A standard solution for joining the both structural elements is the application of horizontal headed studs. An alternative solution was investigated: puzzle-formed concrete dowels at both edges of the steel web. The concrete dowels were optionally confined with spiral reinforcement. A special attention was focused on the load-carrying capacity of the floors in the area of large web openings.

The floor system with its technical aspects is presented in the paper, as well as the experimental investigations carried out on the floor and separately on the puzzle-formed concrete dowels.

1. Ansatz für die Deckenentwicklung

Die Möglichkeit, über Stahlbetonflachdecken mithilfe der in den Vollquerschnitt eingelegten Rohrregister die darunter liegenden Räume zu kühlen bzw. zu heizen, ist bekannt. Überwiegend über die Deckenunterseite wird die Energie aus dem aufgeladenen Betonspeicher der Decke abgegeben, bzw. in ihn aufgenommen. Aufgrund der großen Masse des Querschnitts kann zwar viel Energie zwischengespeichert werden, aber das System reagiert sehr träge und man kann somit nur eingeschränkt auf mögliche Veränderungen der Wetterverhältnisse reagieren. Entsprechend gering fällt die Leistungsabgabe des Systems aus. In der Regel wird diese Technik deshalb nur zur Abdeckung der Grundlast der Räume genutzt. Weitere Geräte sind erforderlich, um eine vollständige Klimatisierung der Räume zu ermöglichen.

Deshalb wurde ein Sandwichquerschnitt entwickelt, der aus zwei getrennten Betonplatten mit relativ dünnem Querschnitt sowie diskreten Stegen zur Verbindung der beiden Platten besteht (Bilder 1 und 6). Dank der geringeren Masse der Platten und durch die oberflächennahe Verlegung der Rohrregister in der unteren Platte wird eine deutliche Verbesserung der Leistungsabgabe erzielt und zudem die Reaktionszeit deutlich reduziert.

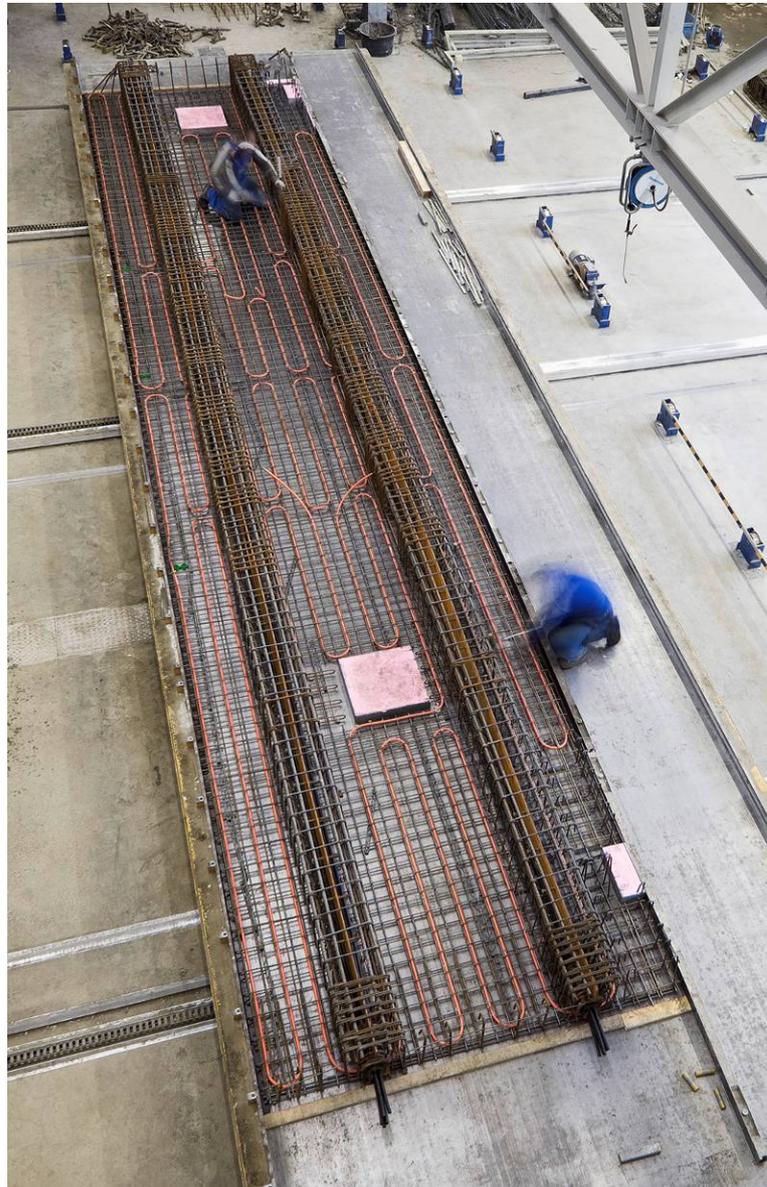


Bild 1: In der unteren Platte verlegte Rohrregister

Bezüglich der Biegetragfähigkeit ist der Sandwichquerschnitt gleichwertig zu einem Vollquerschnitt, da in der Regel die Höhe der Biegedruckzone die Dicke des oberen Plattenspiegels nicht übersteigt. Der dazwischen liegende Bereich kann durch diskrete Stege ersetzt werden. Das spart bei vergleichbarer Biegetragfähigkeit Masse und Gewicht.

Ein wesentlicher weiterer Vorteil besteht in der weitgehend freien Nutzbarkeit des Hohlraums zwischen den beiden Deckenschalen für die Installation von Leitungen für die Haustechnik (Bild 2).



Bild 2: Im Hohlraum der Sandwichdecke verlegte Installationsleitungen

2. Anforderungen an die Stegverbindung

Aufgrund der vorgenannten Anforderungen kommt der Ausbildung der Stege und deren kraftschlüssiger Verbindung mit den beiden Platten besondere Bedeutung zu. Im Gegensatz zu der Stegausbildung üblicher Tragkonstruktionen weisen die Stege für die Sandwichdecke aufgrund der großen Schlankheit solcher Decken eine eher geringe Höhe auf. Die Schlankheit der Decken liegt bei $L/30$ bis $L/40$. Darüber hinaus bieten die dünnen Betonplatten nur wenig Raum für die Einleitung der Kräfte aus dem Steg in die Platte.

Die Ausführung der Stege ausschließlich in Beton mit einer Bügelbewehrung ist grundsätzlich möglich, aber aufgrund der damit verbundenen Aufwendungen nur eingeschränkt umsetzbar. Der Einbau der Bügel im Steg und deren korrekte Höhenlage zwischen der flächigen Bewehrung der beiden Platten erweist sich als sehr zeitaufwendig. Zudem werden in den Stegen große Öffnungen für die Durchführung der im Deckenhohlraum angeordneten Leitungen erforderlich. Insbesondere für die breiten Lüftungsleitungen werden dann Öffnungen notwendig, die in der Stahlbetonbauweise nicht mehr realisierbar sind. Deshalb bietet sich im Rahmen einer Gesamtoptimierung des Systems eine Stahlverbundlösung an. Die Verbundwirkung erfolgt durch ein ebenes Blech mit in Höhe der Betonplatten angeordneten Verbundmitteln. Die Aufgabe dieses zusätzlichen Blechs besteht zum einen in der Übertragung der Schubkräfte und der Bereitstellung eines ausreichenden Widerstandes

im Bereich der großen Stegöffnungen zur Aufnahme der Sekundärmomente. Zum anderen soll dieses Blech außerhalb der Öffnung die Bügelbewehrung weitgehend ersetzen.

Wie bei der bekannten Bauweise des Kombiträgers [1] ist für diese Verbundkonstruktion ein beidseitig des Stegblechs angeordneter Stahlflansch nicht zwingend erforderlich, da die beiden Betonschalen mit der eingebauten Bewehrung Druck-, bzw. Zugkräfte aufnehmen können.

3. Formgebung des Stegbleches mitsamt der Verbundmittel

Die Abmessungen des Stegblechs orientieren sich an der Gesamthöhe der Sandwichplatte. Dabei ist die beidseitige Betonüberdeckung ebenso zu berücksichtigen wie die Forderung, jeweils eine Lage der äußeren Bewehrung der beiden Platten über das Blech hinweg führen zu sollen. Damit verbleibt nur wenig Einbindetiefe für die beiden Blechenden. Innerhalb dieser Einbindetiefe muss der Verbund zwischen Stegblech und Beton sichergestellt werden. Wenn zudem die Öffnungen fast die volle Höhe des Stegs beanspruchen, verbleibt dort nur noch die Einbindetiefe in die Betonplatte zur Steigerung der Querkraft- und der Biegetragfähigkeit. Die Weiterleitung der Schubbeanspruchungen über die Öffnungen hinweg ist gleichzeitig verbunden mit der Aufnahme der Sekundärbiegemomente (Bild 3). Detaillierte Hinweise dazu finden sich im Abschnitt 5.

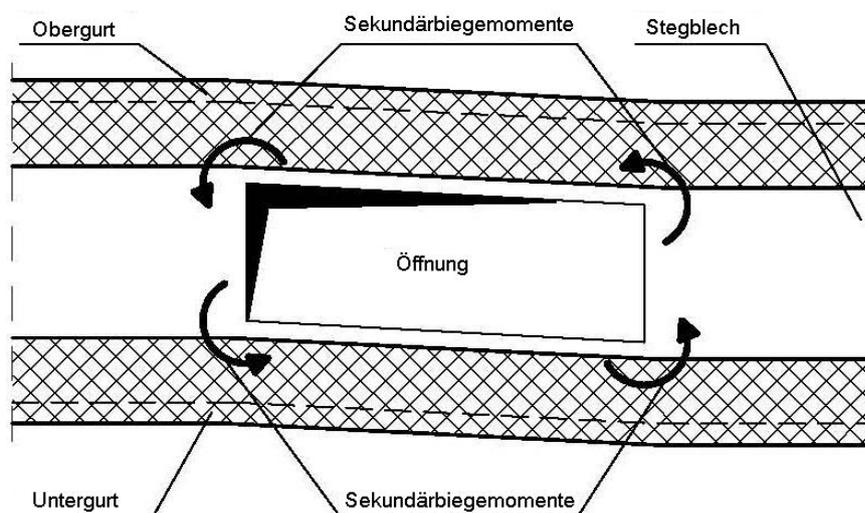


Bild 3: Sekundärbiegemomente infolge Querkraftbeanspruchung

Als Verbundmittel können Kopfbolzen dienen, die jedoch aufgrund der Geometrie liegend angeordnet werden müssen. Die bei randnahen Kopfbolzen erforderliche Bügelbewehrung zur Sicherstellung der Krafteinleitung in den umgebenden Beton kann aufgrund der engen Platzverhältnisse nur bedingt in der dünnen Platte untergebracht werden. Um die erforderliche Bewehrung entlang der Kopfbolzen dennoch einbauen zu können, muss der Steg mit dem mittig angeordneten Blech in einer entsprechenden Breite in Beton ausgeführt werden. Bei dieser

Ausführung tragen die beidseits des Blechs angeordneten Bügel sowohl zur Querkrafttragfähigkeit als auch zur Sicherstellung der Krafteinleitung der Kopfbolzen bei. Wie jedoch bereits dargestellt ist der Einbau der vertikalen Bügel unter den beengten Platzverhältnissen sehr aufwendig.

Um diese Problematik zu umgehen, wurden als alternatives Verbundmittel Betondübel untersucht. Der Vorteil gegenüber den beidseits des Blechs angebrachten Kopfbolzen besteht in der einfacheren Herstellung. Die Kontur der Betondübel wird beim Zuschnitt der Bleche an den Längsrändern ausgebrannt. Durch geschickte Anordnung der Dübel untereinander sowie durch eine geeignete Geometrie lassen sich die ebenen Stegbleche fast ohne Verschnitt aus dem Vormaterial erzeugen.

Bei der Wahl der Abmessung der Dübel (Bild 4) ist die geringe Plattendicke zu beachten. Durch die Betondübel erfolgt eine sehr konzentrierte Krafteinleitung der Schubkräfte aus dem Blech in den Betonflansch. Diese Kraftübertragung ist vergleichbar mit der konzentrierten Krafteinleitung einer einzelnen Kraft (z. B. Ankerkraft aus Vorspannung). Die verschiedenen Versagensmechanismen der Betondübel (Betonabplatzen, Betonspalten, Stahlversagen) müssen beachtet werden. Beton weist immer dann eine hohe Druckfestigkeit auf, wenn eine Querdehnungsbehinderung vorliegt. Eine Möglichkeit, eine solche Querdehnungsbehinderung zu erzeugen, liegt in einer lokalen Umschnürung des Betons im Krafteinleitungsbereich z. B. durch Anordnung einer Wendelbewehrung (Bild 5). Vorteilhaft ist dann nicht nur die Steigerung der aufnehmbaren Kräfte, sondern auch die damit einhergehende Steigerung der Verformungsfähigkeit. Hierdurch wird ein ausgeprägt duktileres Tragverhalten ermöglicht.



Bild 4: Geometrie einer Puzzleleiste

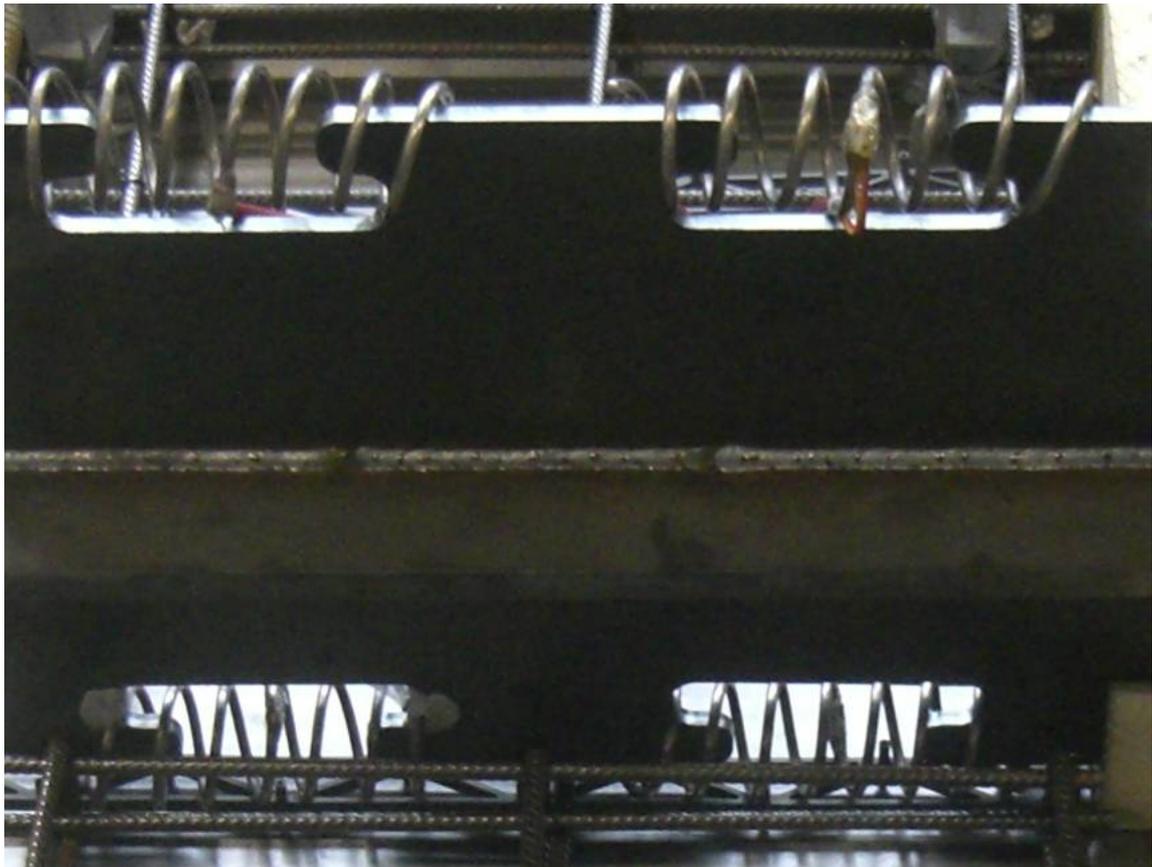


Bild 5: An einer Puzzleleiste angebrachte Wendelbewehrung

Die Weiterleitung der Kraft aus dem umschürnten Betonkörper in die dünne Platte des Sandwichquerschnitts wird über die senkrecht zum Blech angeordnete Bewehrung sichergestellt (Bild 6). Dank der speziellen Formgebung der Betondübel wird es möglich, die gewünschte Wendel an dem Blech in der geforderten Lage ausreichend zu fixieren (Bild 7). Versuche haben gezeigt, dass sich mit dieser einfachen Maßnahme die Tragfähigkeit sowohl bei Beanspruchungen parallel als auch senkrecht zur Stegachse deutlich steigern lassen (s. Abschnitt 6).

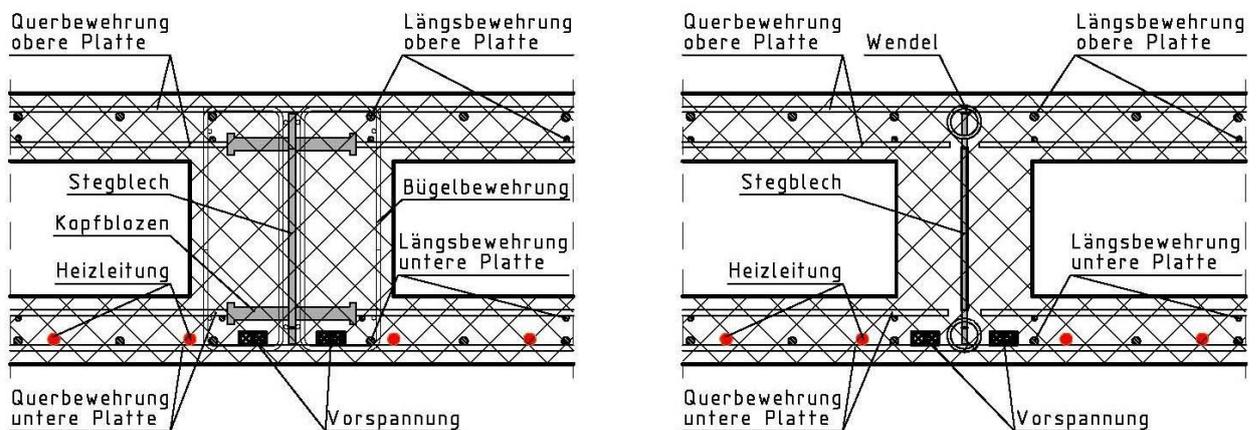


Bild 6: Vergleich der Bewehrungsführung bei randnahen Kopfbolzen und bei Betondübel



Bild 7: Fixierung der Wendelbewehrung an der Puzzleleiste

4. Vorspannung der Plattenelemente

Zur Verformungsbegrenzung werden die Deckenplatten mit Monolitzen (Vorspannsystem VBT 01, Spannstahl St 1570/1770, Vorspannkraft $P_{0,max}=202$ kN) vorgespannt. Die im Spannkabel durch die Vordehnung vorhandene Spannkraft wirkt auf die umgebende Konstruktion an Umlenk- und Verankerungsstellen. Die Umlenkkkräfte werden durch die Wahl der Kabelgeometrie und die Höhe der Spannkraft derart eingestellt, dass sie in etwa mit den ständigen Einwirkungen im Gleichgewicht stehen. Verformungen entstehen im Gebrauchszustand aus Kriech- und Schwindumlagerungen sowie veränderlichen Lasten.

Außer den Umlenkkräften wirkt auch die Normalkraft aus Vorspannung auf den Querschnitt. Die hohe Steifigkeit des im Gebrauchszustand im ungerissenen Zustand verbleibenden Querschnitts dient der Verformungsbegrenzung. Auch bei der Eigenfrequenz wirkt sich positiv aus, dass der Querschnitt im Zustand I verbleibt. Der Anteil der Normalkraft aus Vorspannung ist auch bei der Ermittlung des Tragwiderstandes entlang der Stegöffnungen von großem Vorteil.

Die Vorspannung selbst wird konzentriert als Kabel innerhalb des Betonstegs geführt. Das Stegblech kann in diesem Fall zugleich dazu genutzt werden, mit am Blech angebrachten Fixpunkten die

gewünschte Kabelgeometrie (z. B. parabelförmige Geometrie) umzusetzen. Außerdem dient das Blech an den Enden zur Fixierung der Spannanker und trägt mit dazu bei, die Spannkraft gleichmäßig in den Träger einzuleiten.

5. Großformatige Stegöffnungen

Merkmal der Sandwichdecke ist die integrierte Leitungsführung innerhalb des durch den Querschnitt gegebenen Hohlraums. Dabei wird es meist erforderlich, die Leitungen auch durch den Steg zu führen. In der Planung können Regelaussparungen vorgesehen werden.

Große Öffnungen werden bevorzugt im Bereich geringer Querkräfte angeordnet. In Verbindung mit den in dem mittleren Bereich der Spannweite angeordneten Öffnungen wird anstelle einer parabelförmigen eine trapezförmige Kabelgeometrie gewählt (Bild 8). Die bei dieser Geometrie konzentrierten Umlenkpunkte liegen dann etwa in den Viertelpunkten der Spannweite. Im mittleren Bereich der Spannweite verläuft das Kabel geradlinig innerhalb der unteren Platte. Im Bereich zwischen Auflager und Umlenkpunkt der Spannkabel verläuft das Kabel mit konstanter Neigung. Dort ist bei der Anordnung von Stegöffnungen auf die Lage der Kabel zu achten.

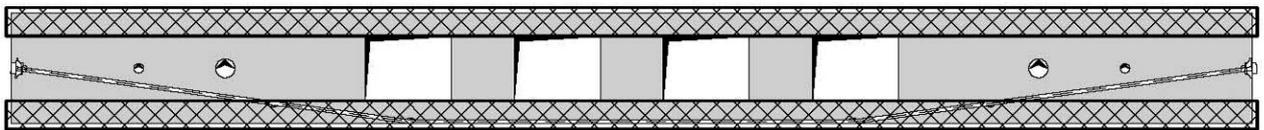


Bild 8: Ansicht an den Träger mit Öffnungen und Spannkabelverlauf

Die Biegebeanspruchungen im Bereich der Öffnungen verteilen sich auf den Zug- und Druckgurt, die beide ungestört unterhalb und oberhalb der Öffnung verlaufen. Die Schubkräfte erzeugen Sekundärmomente, die in den Eckbereichen der Öffnungen aufgenommen werden müssen. Die jeweiligen plastischen Momente in den vier Eckbereichen bestimmen die aufnehmbaren Beanspruchungen aus den erwähnten Sekundärmomenten [2]. Die plastischen Momente werden durch den Anteil des Stegblechs ober- bzw. unterhalb der Öffnung maßgeblich mitbestimmt. Bei der Lösung mit seitlich angeordneten Kopfbolzen verbleibt ein hoher ungestörter Flächenanteil, der der Einbindetiefe in die Betonplatte entspricht. Bei der Ausführung von Betondübeln wird diese Einbindetiefe durch die Dübelgeometrie bereichsweise gestört und somit reduziert. Die Länge der Öffnung sollte einem Vielfachen des Dübelabstands entsprechen (Bild 9). Die Lage der Dübel ist dann so auszurichten, dass jeweils in den Eckpunkten der Öffnung eine ausreichende Einbindetiefe zur Verfügung steht, die mit ihrem Querschnitt eine vergleichsweise große Biegetragfähigkeit erzeugt.



Bild 9: Eingebautes Stegblech mit Wendelbewehrung, Öffnungen und Spannkabel

Zur Erhöhung der Biegetragfähigkeit trägt dabei in nicht unerheblichem Maße die Normalkraft aus der Vorspannung bei.

6. Experimentelle Untersuchungen von puzzelförmigen Betondübeln

6.1. Entwicklung der Dübelgeometrie

Bei der Entwicklung der Dübelgeometrie wurde aufgrund der Beanspruchung im Bereich der Ränder der Stegöffnungen eine leistungsfähige Verankerung von Vertikalkräften angestrebt. Dieses Ziel wurde mit einer besonders ausgeprägten Verzahnung von Stahl und Beton in Dübellängsrichtung verfolgt. Neben den bekannten puzzelförmigen Geometrien [3, 4] wurden auch wendelbewehrte Puzzleleisten untersucht. Aus der statischen Bemessung der Sandwichelemente ergaben sich Plattendicken von 100 mm und Stegdicken von 8 mm als günstige Werte. Darauf aufbauend wurden die Dübel optimiert. In allen Versuchen wurden Betone C35/45 mit Größtkorn 16 mm und Stahl S355 eingesetzt.

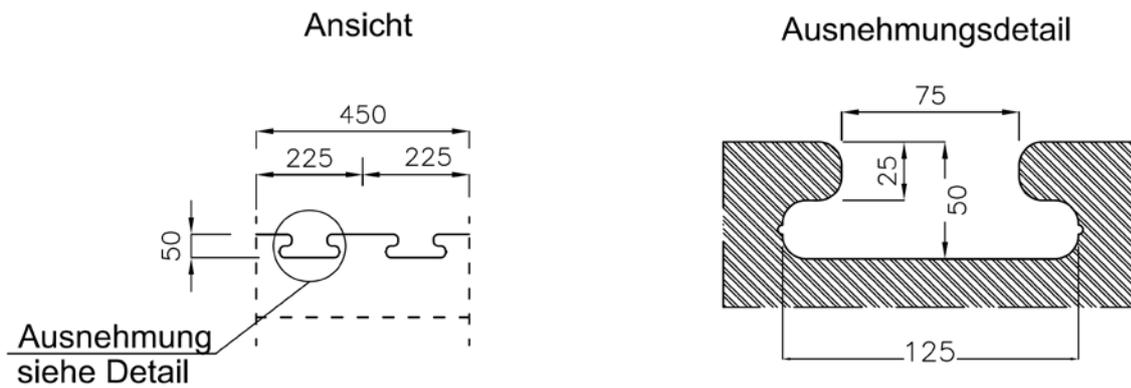


Bild 10: Im Optimierungsverfahren ermittelte Form der puzzelförmigen Verbindung

6.2. Tragverhalten der puzzelförmigen Betondübel im Push-Out-Versuch

Insgesamt wurden sechs Probekörper für Push-Out-Versuche im Labor für Konstruktiven Ingenieurbau der TU Kaiserslautern geprüft. Das Ziel der Versuche war die Ermittlung der Tragfähigkeit sowie der Verformungsfähigkeit der Betondübel in Längsrichtung der Sandwichplatten.

Nach dem Bemessungsmodell von Mangerig und Zapfe [5] gibt es vier mögliche Versagensmodi von scherbeanspruchten Betondübeln:

1. Teilflächenpressung – Dübeltragfähigkeit P_{Rk1}
2. Ausstanzkriterium mit einem entstehendem Ausbruchkörper - P_{Rk2}
3. Abscherkriterium (im Beton) - P_{Rk3}
4. Erreichen der Streckgrenze im Stahl - P_{Rk4}

Die Bemessungsformeln aus [5] wurden für die Berechnungen angepasst, indem die Betonflächen der gewählten Dübelgeometrie anstelle der Kreisquerschnitte eingesetzt wurden. Die aus dem Stahlstegversagen resultierende Dübeltragfähigkeit P_{Rk4} wurde unter der Annahme bestimmt, dass der kritische Stahlquerschnitt gleichzeitig von einem Biegemoment und der zugehörigen Querkraft infolge der Dübelkräfte beansprucht wird. Dabei wurde die Spannungshypothese nach Huber-Hencky-Mises verwendet.

Die Tragfähigkeiten der untersuchten Prüfkörper wurden mit den oben erläuterten Verfahren rechnerisch ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Rechnerisch ermittelte Werte von der Tragfähigkeit der Push-Out-Versuchskörper

Versagenskriterium			Theoretisch ermittelte Tragfähigkeit [kN]	
			Einzelbetondübel	Versuchskörper
1	Beton	Teilflächenpressung	190,7	762,8
2		Ausstanzkriterium (=Ausbruchkriterium)	146,6	586,3
3		Abscherkriterium (Beton)	345,3	1381,1
4	Stahl	Stahlfließen	177,3	709,2
maßgebendes Kriterium:				586,3

Die Prüfkörper sind in Bild 11 schematisch dargestellt. In drei Prüfkörpern (Nr. 4, 5 und 6) wurde Wendelbewehrung in der Verbundzone angeordnet (Bild 11). Dabei wurde die Anzahl der Windungen der Wendeln variiert. (siehe Tabelle 2, zweite und dritte Spalte). Alle Wendeln wurden aus dem glatten Draht $d=5\text{mm}$ hergestellt. Der Durchmesser der Wendeln betrug 50 mm.

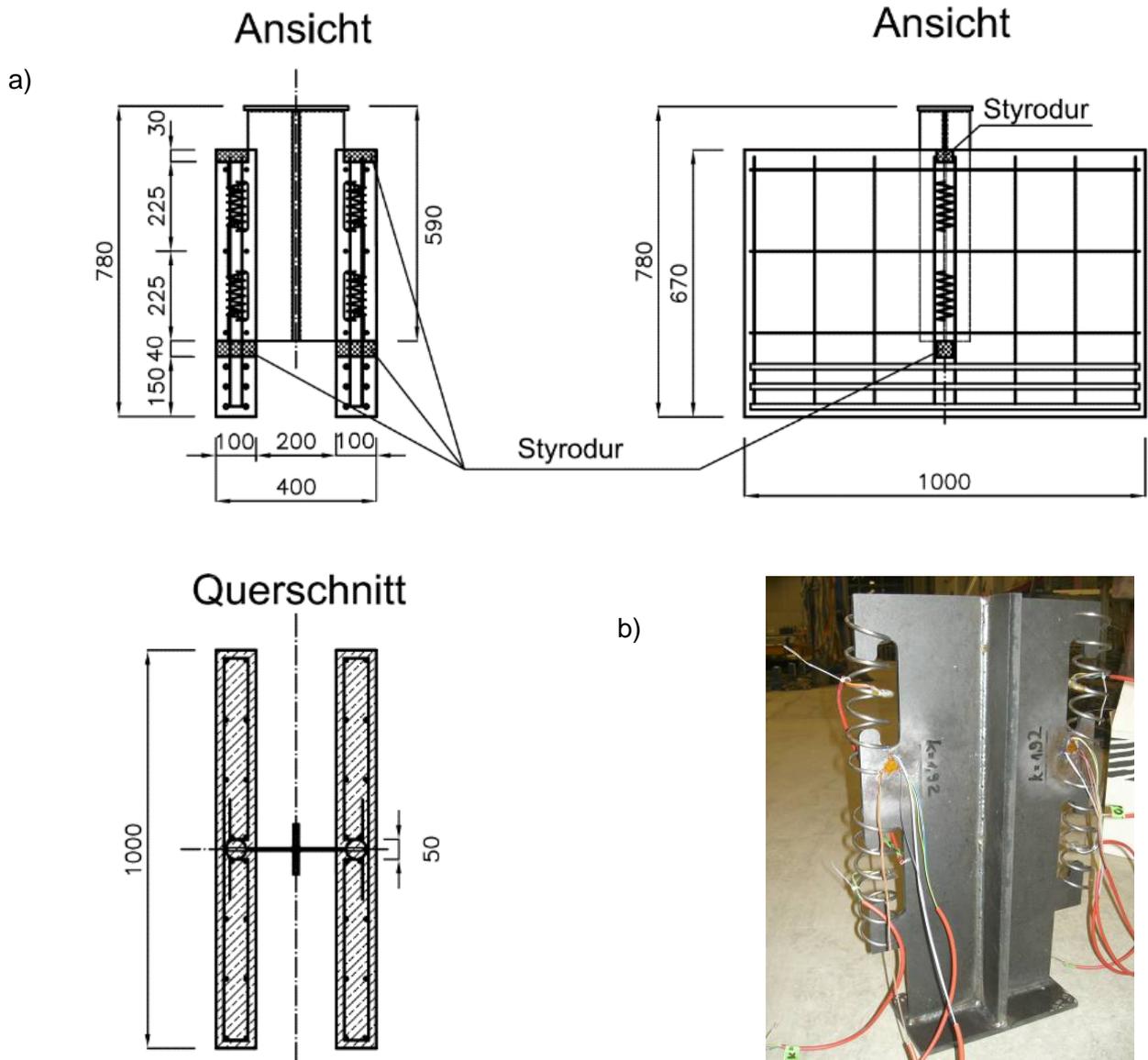


Bild 11: Schematische Darstellung der Push-Out-Versuchskörper und Wendelbewehrung

Die Versuchsergebnisse sind in Tabelle 2 zusammengestellt. Durch die Anordnung der Wendeln konnte die Tragfähigkeit der Betondübel um etwa 20 % gesteigert werden, während das Verformungsvermögen um etwa 30 % zunahm (Bild 12). Während bei allen Versuchen mit Wendelbewehrung Stahlversagen auftrat, wurde die Höchstlast der anderen Versuchskörper durch Betonversagen infolge Ausstanzen begrenzt (Bilder 13 und 14).

Tabelle 2: Daten der Push-Out-Versuche und die experimentellen Ergebnisse

Versuchskörper	Anzahl der Wendel zwischen den Neben-Puzzle-Steinen	Abstand zwischen den Windungen	Versagensmodus	Versagenskraft	Verschiebung zwischen Stahlsteg und Betonplatte bei maximaler Last
				P_{max}	$\delta (P_{max})$
				[kN]	[mm]
1	0	-	Teilflächenpressung und Ausstanzen	505,4	4,57
2	0	-		552,8	7,62
3	0	-		586,7	5,38
4	4	41,7	Stahlfließen	629,2	6,19
5	5	31,3		657,8	7,72
6	6	25,0		709,2	8,65
Mittelwert 1÷3 (ohne Wendel)				548,3	5,86
Mittelwert 4÷6 (mit Wendeln)				665,4	7,52

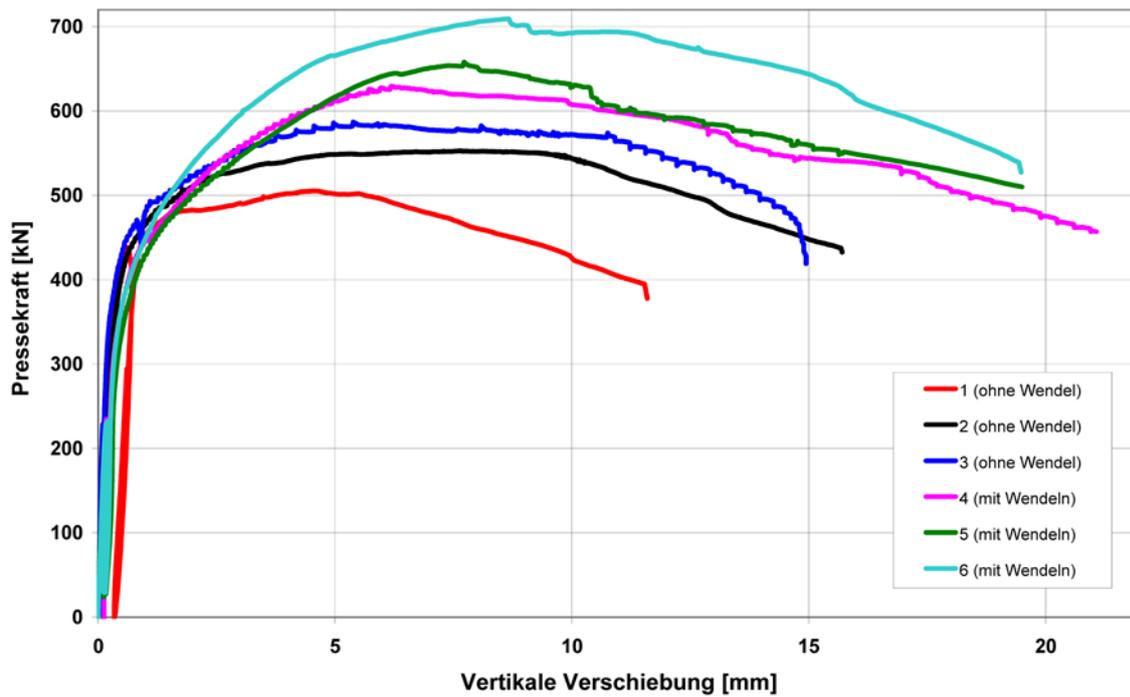


Bild 12: Kraft-Verschiebungsbeziehung Puzzleleiste (Push-Out-Versuche)



Bild 13: Prüfkörper Nr. 2 nach dem Zerlegen: unverformter Stahlsteg



Bild 14: Prüfkörper Nr. 6 nach dem Zerlegen: verformter Stahlsteg

6.3. Tragverhalten des Verbundes im Ausziehversuch

Der Einfluss großer Stegöffnungen in Verbundträgern war in den letzten Jahren Gegenstand von Forschungsarbeiten an der TU Kaiserslautern. Wie von Kohlmeyer [6] und Weil [7] gezeigt wurde, treten bei Verbundträgern mit großen Stegöffnungen vertikale Beanspruchungen der Verbundmittel an den Rändern der Stegöffnungen auf. Dieser Mechanismus wurde im Abschnitt 3 (s. Bild 3) bereits erwähnt. Durch die vier lokalen Momente in den Ecken der Öffnung kann ein Versagen in Form eines globalen Querkraftgelenks im Bereich der eckigen Öffnung eintreten. Die lokale Tragfähigkeit wird wesentlich durch die Leistungsfähigkeit der Verbundmittel an den Enden der Stegöffnung sowohl bei vertikaler als auch bei horizontaler Schubbeanspruchung beeinflusst.

Entsprechend den möglichen Versagensarten sind für den Betongurt im Bereich der Öffnung drei getrennte Nachweise zu führen: der Nachweis der Einleitung der Querkraft in den Betongurt (Versagensart: Ausreißen der Kopfbolzendübel, bzw. anderer Verbundmittel), der Nachweis der Querkrafttragfähigkeit des Betongurts über und unter der Öffnung (Schubversagen des Betongurts) und der Nachweis des Durchstanzens beim Übertragen der Querkraft vom Betongurt in den Stahlträger.

Die vertikale Tragfähigkeit der Verbundmittel wurde in der zweiten Versuchsreihe untersucht. Die Versuchskörper bestanden aus einem Stahlsteg, der mit puzzelförmiger Geometrie in eine Betonplatte einbetoniert war (Bild 15). Es wurden sechs Ausziehversuche durchgeführt. Die ersten drei Versuchskörper wurden ohne Stahlwendel an den Betondübeln hergestellt. Bei den anderen Probekörpern kamen Stahlwendeln zum Einsatz, wobei wiederum die Anzahl der Windungen variiert wurde.

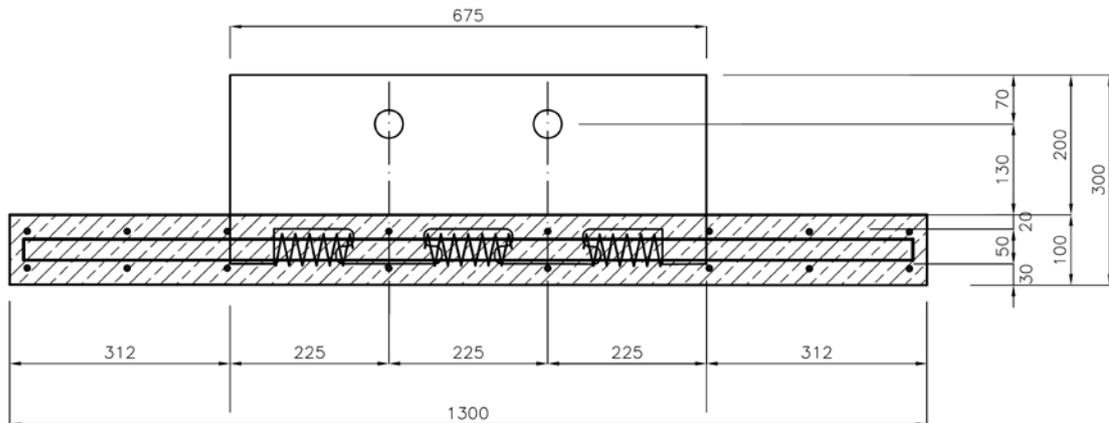


Bild 15: Versuchskörper für einen Ausziehversuch

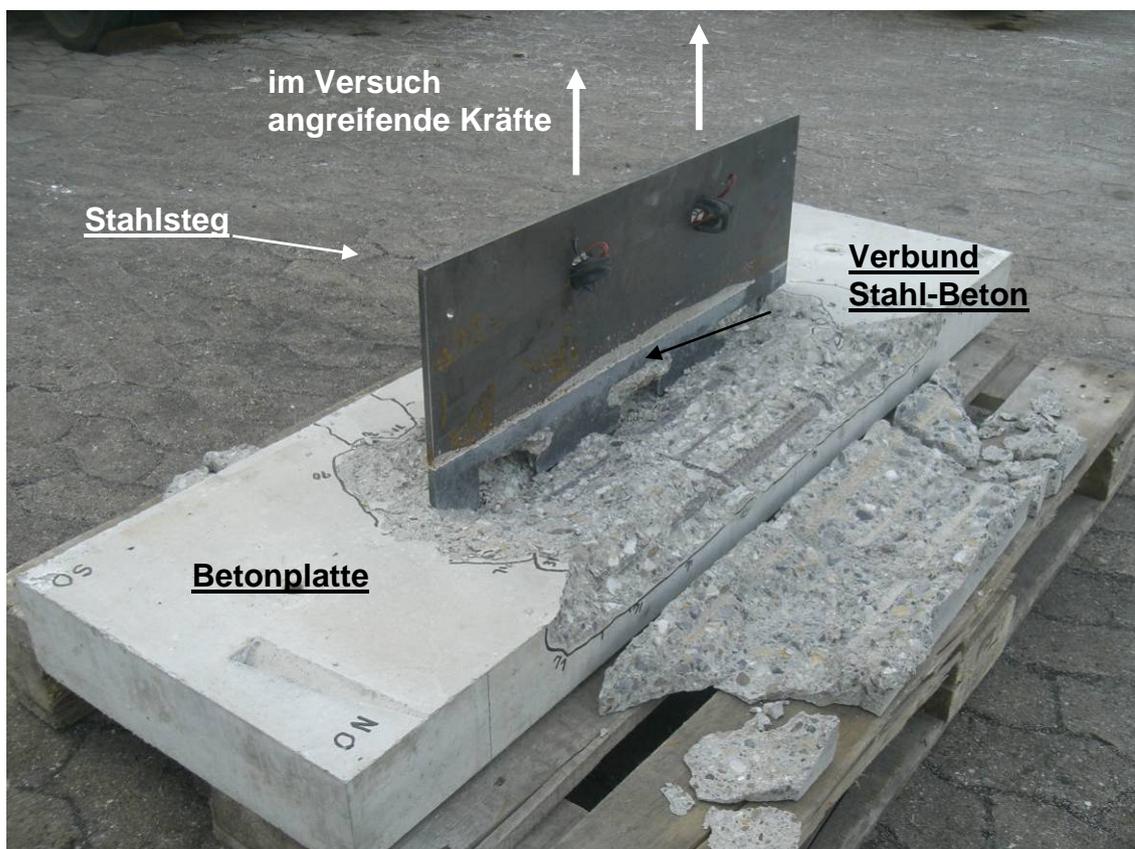


Bild 16: Ausziehversuche

Die Versuchskörper wurden zunächst mit 25 Lastwechseln zwischen 5 und 40 Prozent der erwarteten Bruchkraft vorbelastet und danach linear weggesteuert zu Bruch gefahren. Ein gleichmäßiges Rissbild trat schon bei etwa 20 Prozent der Höchstlast auf (Bild 17). Die Rissbreiten wuchsen bis zum Erreichen der maximalen Kraft kontinuierlich an. Die Rissverläufe waren bei allen Versuchskörpern ähnlich. Radiale Risse entstanden infolge der Biegeverformung der Betonplatte. Tangentiale Risse kündigten anschließend das Entstehen eines Bruchkegels an. Nach Überschreiten der Höchstlast wurden die Versuche weggesteuert weitergefahren. Parallel zu einem deutlichen Lastabfall brachen die Ausbruchkegel aus den Versuchskörpern heraus.

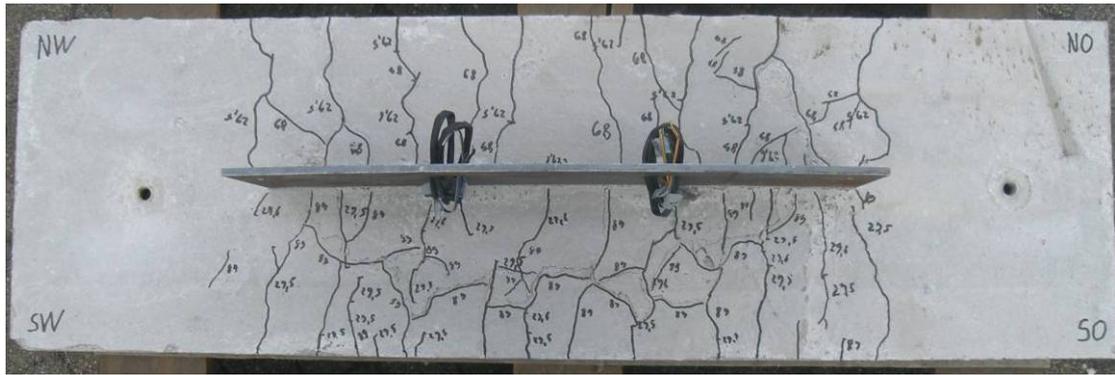


Bild 17: Typisches Rissbild im Ausreißversuch

Der Ausbruchkegel bildete sich unter dem Stahlsteg nach außen hin. In einigen Fällen ging der Kegel schräg nach oben (Bild 18 rechts) und manchmal verlief er oberhalb der Bewehrung in der Betondeckung nach außen an dem Plattenrand (Bild 18 links).



Bild 18: Ausbruchkegel beim Ausziehversuch

Beim Zerlegen der Probekörper zeigte sich, dass die Stahlwendeln den Ausbruchkegel vergrößerten, der nicht von den Kanten des Stahlblechs sondern von den Außenabmessungen der Wendel ausging. Entsprechend wurden größere Versagenslasten erreicht, die etwa um 30 % über der Traglast der Versuche ohne Wendelbewehrung lagen. Bei allen Versuchen trat das Versagen durch den kegelförmigen Betonausbruch ein. Eine plastische Verformung der Stahlbleche war nicht zu erkennen. In einigen Versuchskörpern verlief der Bruchkörper entlang der Bewehrung bis zum Längsrand des Probekörpers. Eine Begrenzung des Ausbruchkegels durch die Auflagerkonstruktion des Versuchskörpers trat jedoch nicht ein.

Die in den Versuchen gewonnenen Ergebnisse zum Ausziehverhalten wurden entsprechenden Bemessungsmodellen für zugbelastete Befestigungsmittel [8, 9] mit vergleichbarem Versagensmodus gegenüber gestellt. Sie weichen jedoch von den Berechnungsergebnissen von minimal -11% bis zu maximal +14% ab. Weitere Ausziehversuche müssen durchgeführt werden um die entstandenen Unterschiede zu klären.

Die wesentlichen Versuchsergebnisse sind in Tabelle 3 zusammengefasst.

Tabelle 3: Zusammenfassung der in Ausziehversuchen gewonnenen Ergebnisse

Versuchskörper	Anzahl der Wendeln zwischen den Neben-Puzzle-Steinen	Abstand zwischen den Wendeln	Theoretisch errechnete Versagenskraft nach [9]	Experimentell ermittelte Versagenskraft	Abweichung
			[kN]	[kN]	[%]
1	0	-	66,1	63,9	-3,3
2	0	-	66,1	70,5	6,7
3	0	-	66,1	75,4	14,1
4	4	41,7	100,3	89,7	-10,6
5	5	31,3	100,3	91,3	-9,0
6	6	25,0	100,3	89,0	-11,3
Mittelwert 1÷3 (ohne Wendel)			66,1	69,9	5,8
Mittelwert 4÷6 (mit Wendeln)			100,3	90,0	-10,3

6.4. Untersuchung der Beton-Sandwich-Elementdecke mit gesonderter Berücksichtigung ihrer Tragfähigkeit in der Nähe von Stegöffnungen

Die dritte im Rahmen dieses Vorhabens an der TU Kaiserslautern realisierte Versuchsreihe wurde an einem einseitigen Träger im Originalmaßstab durchgeführt. Die Abmessungen des Trägers betragen 8,00 x 1,05 x 0,34 m. Der Verbund zwischen dem Stahlsteg und den Betonplatten wurde durch die oben beschriebenen puzzelförmigen Betondübel sichergestellt. Der Stahlsteg wurde von beiden Seiten im Querschnitt mit 15 cm starkem Beton ummantelt. Die Wendelbewehrung wurde in den mit hoher Querkraft beanspruchten Endbereichen des Trägers am oberen und unteren Stegrand auf einer Länge von 2,0 m installiert. Der Träger wurde mit zwei Monolitzen VBT01 mit der Kraft von 2 x 202 kN vorgespannt. Es wurden vier eckige Stegöffnungen 140 x 450 mm und vier runde Stegöffnungen mit dem Durchmesser 50 bzw. 100 mm vorgesehen. Es wurden nacheinander drei Versuche am selben Versuchsträger durchgeführt (Bild 19). Der erste Versuch betraf eine rechteckige Stegöffnung, der zweite eine runde Stegöffnung, der dritte den auflagnahen Bereich ohne Öffnungen.

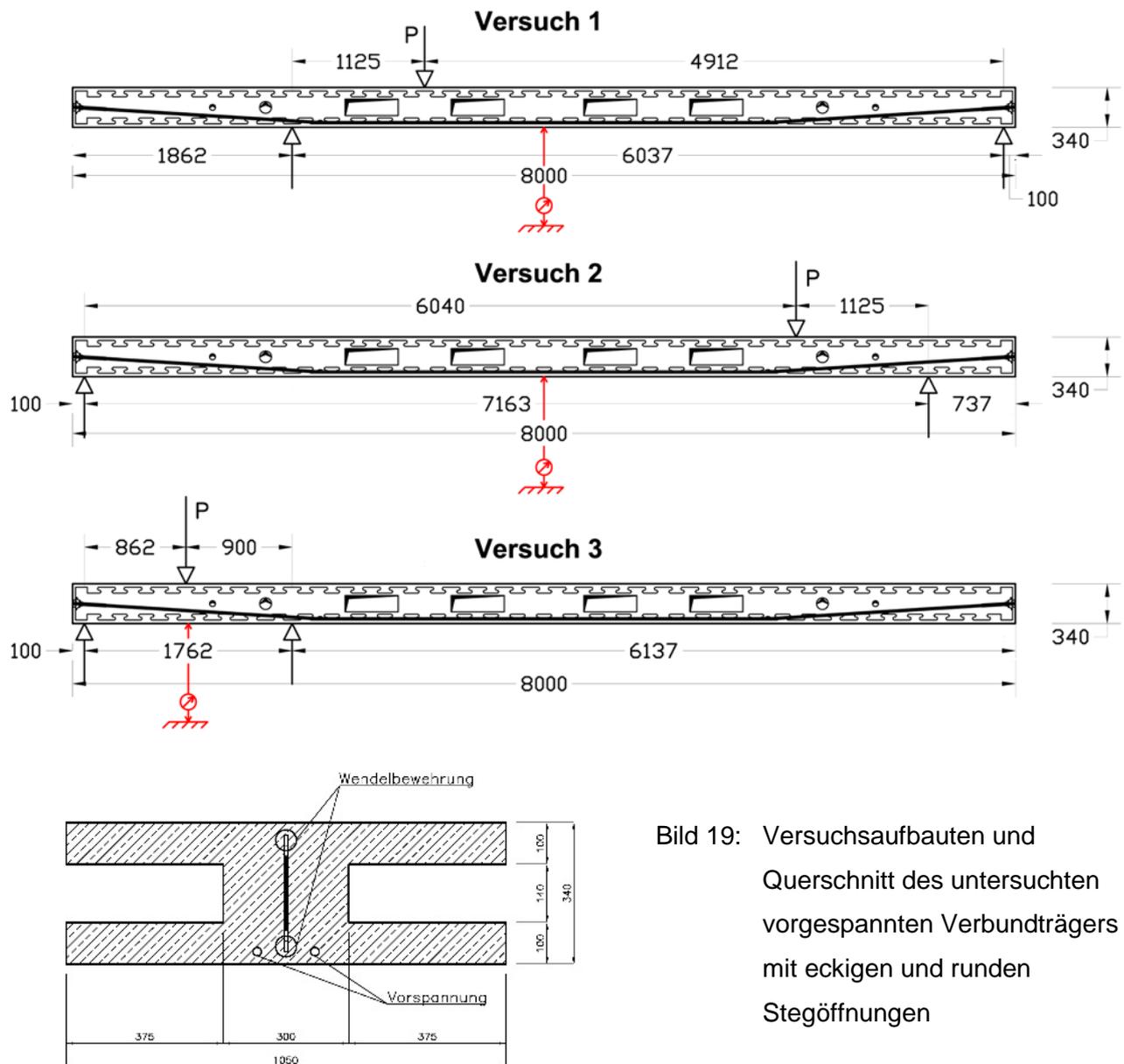


Bild 19: Versuchsaufbauten und Querschnitt des untersuchten vorgespannten Verbundträgers mit eckigen und runden Stegöffnungen

Der erste Versuch wurde so gestaltet, dass eine große eckige Öffnung hoch beansprucht wurde. Die Querrisse infolge Biegung bildeten sich wie erwartet in regelmäßigen Abständen und jeweils gleichgroßer Breite. Risse entstanden ebenfalls an den Fugen zwischen dem Steg und den Platten. An den zwei gegenüberliegenden Ecken ging der Riss in einen Ausbruchkegel der Betondübel über (Bild 20).

Nach dem Zerlegen des Versuchskörpers zeigten sich starke Verformungen des Stahlstegs (Bild 21). An allen vier Ecken jeder Öffnung war der Querschnitt wegen der Puzzleile 7 cm hoch, im Bereich des Betondübels jedoch nur 2 cm. Hier traten erkennbar plastische Verformungen auf. In diesem Bereich finden sich auch die maximalen Zugbeanspruchungen der Betondübel, so dass hier Betonversagen eintrat.

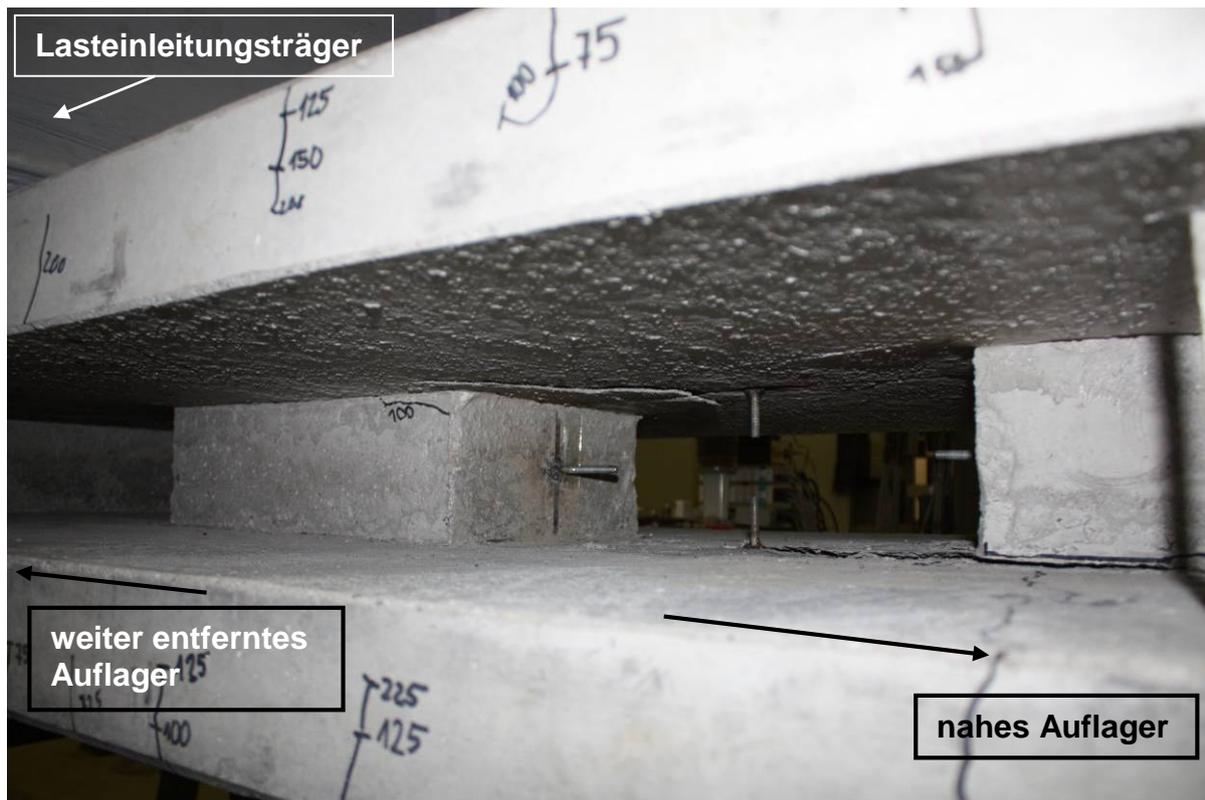


Bild 20: Risse an der eckigen Öffnung



Bild 21: Eckige Stegöffnung nach Zersägen des Versuchsträgers

Der zweite Versuch war so gestaltet, dass die rechnerische Schubtragfähigkeit nur geringfügig höher war als die rechnerische Biegetragfähigkeit. Der Versuchskörper zeigte ein Druckzonenversagen an

der Stelle der Lasteinleitung unter globaler Biegebeanspruchung. An der höchstbelasteten runden Öffnung trat eine Ovalisierung der Öffnung im Stahlsteg in Verbindung mit Diagonalrissen im Beton auf (Bild 22).



Bild 22: Schnitt an einer runden Stegöffnung und ovale Verformung

Beim dritten Versuch wurde der Bereich ohne große Öffnung untersucht. Der Versuch war so konzipiert, dass Schubversagen im Bereich der kleinen runden Stegöffnungen erwartet werden konnte. Dieses Versagen trat auch ein. Dabei wurde die Stelle der Querschnittsschwächung durch die größere der beiden runden Stegöffnungen maßgebend. Im Beton trat ein Schubbruch ein, der von großen plastischen Verformungen des Stegblechs begleitet wurde (Bild 23).

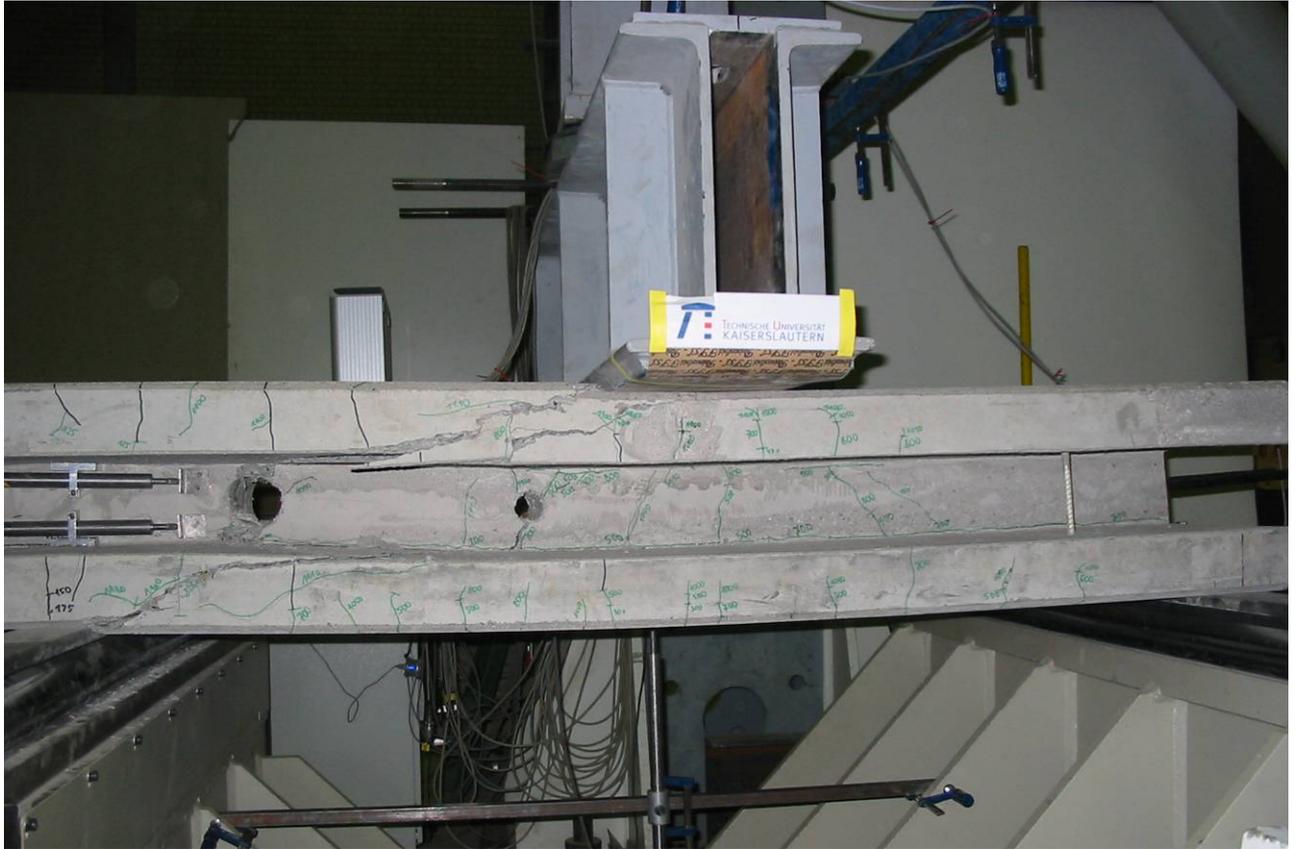


Bild 23: Dritter Versuch mit dem großen Träger nach dem Erreichen der maximalen Kraft

In Bild 24 ist das Kraft-Weg-Diagramm für alle drei Versuche dargestellt. Die ersten beiden Versuchslasten fielen nach dem Erreichen der maximalen Kraft schnell ab. Im dritten Versuch wurde ein duktileres Verhalten beobachtet.

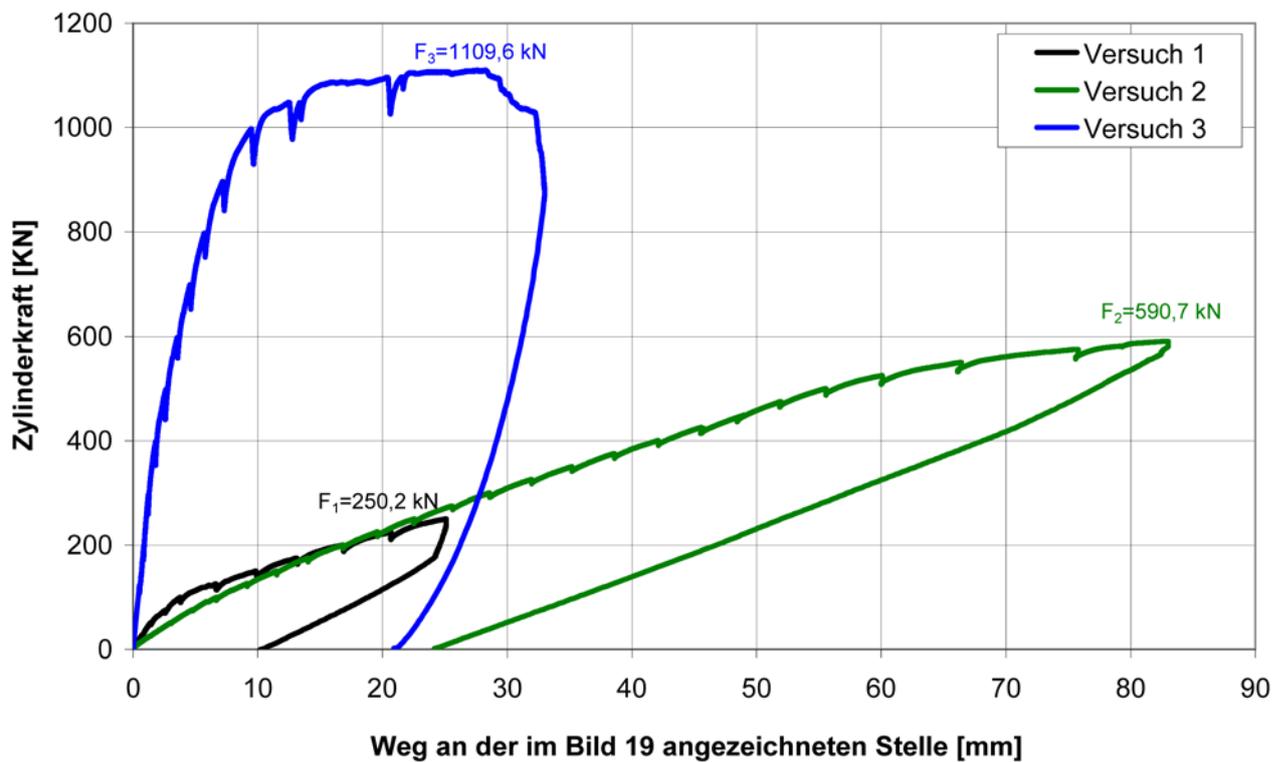


Bild 24: Kraft-Weg-Diagramme der Versuche 1-3

7. Zusammenfassung, Ausblick

Die vorgestellte Sandwichdecke ermöglicht die Realisierung neuartiger, innovativer Tragsysteme, wobei Fragen zur Quertragwirkung und Koppelung der Fertigteile untereinander noch ergänzend zu behandeln sind.

Die Verwendung von puzzelförmigen Betondübeln in Verbundträgern mit großen Stegöffnungen kann für dieses Deckensystem und andere Anwendungen eine sinnvolle und wirtschaftliche Lösung für die Verankerung des Stahls im Beton sein. Die gezielte Umschnürung mit Wendeln verbessert sowohl das Scher- als auch das Ausziehtragverhalten der Betondübel.

Zur allgemeinen Anwendung dieses Verbundmittels besteht noch weiterer Forschungsbedarf, um Tragverhalten und Versagensmodi besser verstehen und beschreiben zu können. Ebenso besteht noch die Notwendigkeit, die Bemessungskonzepte für unterschiedliche Dübelgeometrien zu vereinheitlichen und aufeinander abzustimmen. Das Vorhaben wurde dankenswerterweise durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsgemeinschaften AiF (Förderkennzeichen des Projektes: KF0440201ES6) finanziell gefördert. Beteiligt an der Durchführung des Projektes waren die Firmen: Domostatik GmbH, Bernkastel-Kues und Rudolph Baustoffwerk GmbH, Weiler-Simmerberg. Die Konstruktion der Sandwichdecken wurde durch die Fa. CON4, Kempten entwickelt.

Literatur

- [1] André H.-P.: Neuartige Verbundmittel für den Anschluss von Ortbetonplatten an Stahlträger. Beton- und Stahlbetonbau 80 (1985), Heft 12.
- [2] Bode, H., Stengel, J., Künzel, R.: Stahlverbundträger mit großen Stegausschnitten. Stahlbau 63 (1994), Hefte 1 und 2.
- [3] Hauke B.: Ductile Shear Connectors for High Strength Composite Members. Fédération Internationale du Béton. Proceedings of the 2nd International Congress. June 5-8, 2006 – Neapel, Italien.
- [4] Feldmann, M., Hechler, O., Hegger, J., Rauscher, S.: Neue Untersuchungen zum Ermüdungsverhalten von Verbundträgern aus hochfesten Werkstoffen mit Kopfbolzendübeln und Puzzleleiste. Stahlbau 76 (2007), Heft 11.
- [5] Mangerig, I.; Zapfe, C.; Burger, S.: Betondübel im Verbundbau. Stahlbau-Kalender 2005.
- [6] Kohlmeyer, C.: Beitrag zum Tragverhalten von Verbundträgern im Bereich von großen Stegöffnungen unter Berücksichtigung der Quertragfähigkeit des Stahlbetongurtes. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2007.
- [7] Weil, T.: Zum Tragverhalten von durchlaufenden Verbundträgern mit großen Stegöffnungen. Dissertation, Technische Universität Kaiserslautern, 2007.
- [8] Eligenhausen, R.; Malee, R.: Befestigungstechnik im Beton- und Mauerwerksbau. Ernst&Sohn. Stuttgart 2000.
- [9] Deutsches Institut für Bautechnik: Bemessungsverfahren für Dübel zur Verankerung in Beton. Berlin, Juni 1993.
- [10] DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, 2008.