

Rückseitige Verstärkung von Stahlbetonplatten unter Impactbeanspruchung

Dipl.-Ing. (FH) Franz Bracklow
Institut für Massivbau der TU Dresden, 01062 Dresden
E-Mail: franz.bracklow@tu-dresden.de, Telefon: +49 351 463 40472

Zusammenfassung

Im Rahmen der beschriebenen Arbeit erfolgt die experimentelle Untersuchung von nachträglich an Stahlbetonplatten aufgetragenen Verstärkungsschichten, die einer Impactbelastung ausgesetzt werden. Die Grundlage hierfür bilden drei verschieden bewehrte Testserien, welche anhand eines entwickelten Versuchsschemas geprüft werden. Zielstellung ist die Quantifizierung der Leistungsfähigkeit rückseitig applizierter Verstärkungen sowie die Weiterentwicklung einer bereits existierenden Schädigungsbeschreibung und eines analytischen bzw. numerischen Modells.

1 Motivation

Das Verhalten von Stahlbeton unter Impactbeanspruchung ist seit jeher von großer Bedeutung, z. B. für den Schutz kritischer Infrastruktur. Ein für die Bemessung bzw. Beurteilung gewählter Ansatz besteht u. a. in der numerischen Berechnung auf Grundlage experimentell validierter Modelle bzw. in der Durchführung und Bewertung von Tests im Originalmaßstab oder in skaliert Form. Hierfür wurden seit der Mitte des 20. Jahrhunderts weltweit Impactversuche an Stahlbetonprobekörpern durchgeführt, siehe u. a. [1]–[4]. Versuchsübergreifend zeigte sich, dass der Impactwiderstand beispielsweise durch Variation der Geometrie und der Bewehrung oder durch eine nachträglich angeordnete externe Verstärkungsschicht positiv beeinflusst werden kann. Letzteres wird aktuell im Rahmen des Graduiertenkollegs (GRK) 2250 untersucht [5].

2 Zielstellung

Die bereits in der ersten Phase des GRK durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass das Strukturverhalten von Stahlbetonplatten unter Impactbeanspruchung durch die rückseitige Applikation einer zwei Zentimeter dicken Verstärkungsschicht deutlich verbessert werden kann [6], [7]. Hierbei wurden verschiedene Schichten, z. B. aus Carbonbeton oder hybriden Materialkombinationen aus Glas- bzw. Carbontextilien in einer Matrix aus *strain-hardening short fiber reinforced concrete* (SHCC), verwendet. In der aktuell laufenden, zweiten Phase des GRK sollen die bereits vorhandene Schädigungsbeschreibung sowie das Ingenieurmodell durch ergänzende experimentelle und numerische Untersuchungen erweitert und mit der vorhandenen Datenbasis unverstärkter Platten des Projekts Tankaufprall, siehe [8]–[10], verglichen werden.

3 Experimentelle Untersuchungen

3.1 Versuchseinrichtung und Messtechnik

Für die Realisierung der Experimente steht die Fallanlage des Otto-Mohr-Laboratoriums der Technischen Universität Dresden in der beschleunigten Konfiguration zur Verfügung (Bild 1, links). Hiermit können Impactoren mithilfe von Druckluft auf die vorgesehene Impactgeschwindigkeit beschleunigt und somit die vorgesehenen plattenförmigen Probekörper getestet werden. Weitere Informationen zur Anlage sind Just et al. [8] zu entnehmen.

Die Durchführung von Impactexperimenten auf Bauteilebene ist aufgrund der kurzzeitigen Belastung sowie der Probekörpergröße zwangsläufig mit einem großen Aufwand verbunden. Um hierbei den größtmöglichen Informationsgewinn zu erzielen, wurde ein Messkonzept zur Ermittlung der

wichtigsten Parameter aufgestellt. Die Messung der Lagerreaktionen erfolgte in allen Ecken der Probekörper mithilfe von vier Kraftmessdosen (KMD). Auf der Oberseite der Platten wurden die lokale Verschiebung in der Nähe des Impakts durch ein Laser-Doppler-Vibrometer (Vibro) sowie die Beschleunigungen mithilfe von vier piezoelektrischen Sensoren (ACC) detektiert. Aus diesen Signalen erfolgte die Ableitung der eingebrachten Schädigung nach Hering [6], [7]. Die exakten Positionen der verwendeten Messtechnik sind Bild 1, rechts zu entnehmen. Weitere Informationen zur Auswertung und Filterung der Rohdaten sind in Hering et al. [9] und Bracklow et al. [10] dargestellt.

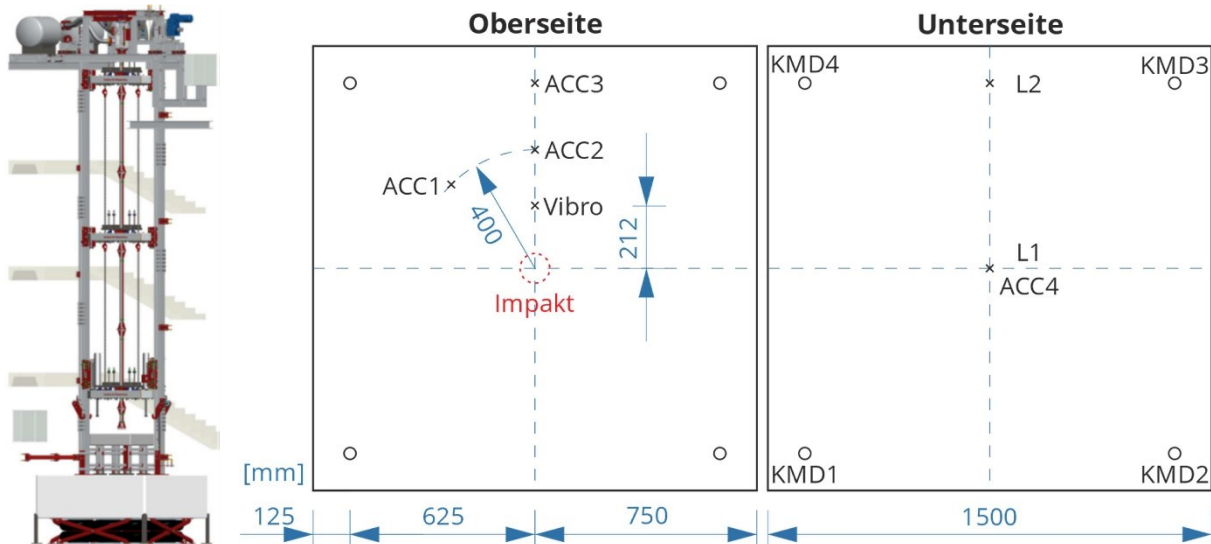


Bild 1 Beschleunigte Konfiguration der Fallanlage und Messstellenplan. Grafiken: Tino Kühn (links) und Franz Bracklow (rechts)

3.2 Versuchskonzept

Um die Verbesserungen des Strukturverhaltens einer Stahlbetonplatte infolge einer rückseitig applizierten Verstärkungsschicht quantifizieren zu können, wurde das in Bild 2 dargestellte Versuchskonzept entwickelt. Im ersten Teil erfolgt dabei zunächst die Prüfung von mehreren unverstärkten Basisplatten unter ansteigenden Impaktgeschwindigkeiten ($v_{imp,1} \dots v_{imp,4}$). Die induzierten Schädigungen reichen hierbei von geringer Intensität bis zur vollständigen Perforation des Impaktors in der höchsten Geschwindigkeitsstufe $v_{imp,4}$. Im zweiten Teil werden die verstärkten Platten nach identischem Schema experimentell untersucht. Ausgangspunkt für die Steigerung der Impaktgeschwindigkeiten bildet die Referenzgeschwindigkeit $v_{imp,gew.}$, welche dem letzten nicht perforierten Versuch der Basisplatten ($v_{imp,3}$) entspricht. Es erfolgt die weitere Steigerung bis zum Durchschuss der verstärkten Platte in der letzten Geschwindigkeitsstufe $v_{imp,6}$.

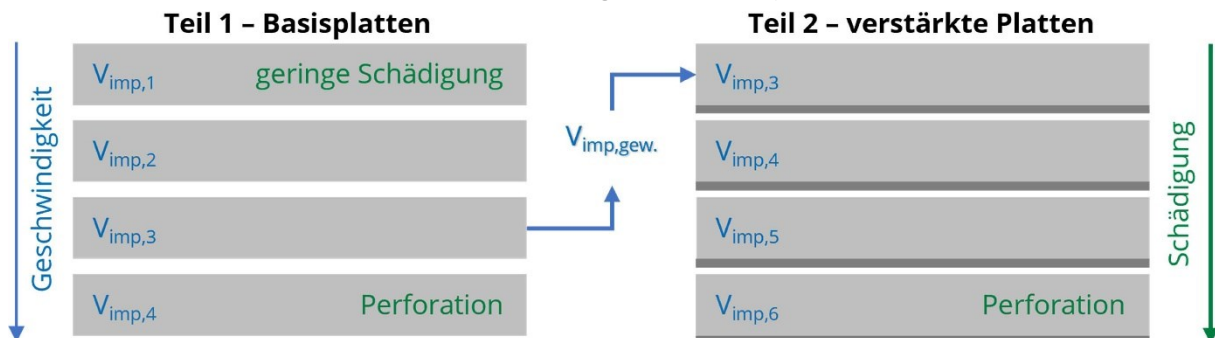


Bild 2 Versuchskonzept. Grafik: Franz Bracklow

Im Anschluss können sowohl die Ergebnisse der Basis- als auch der verstärkten Platten unter- bzw. miteinander verglichen werden. Durch die beschriebene Variation der Impaktintensität sind eine Weiterführung der Schädigungsbeschreibung inkl. Quantifizierung der Veränderungen im Perfo-

rationsverhalten sowie eine Validierung des analytischen Modells bzw. der begleitenden numerischen Untersuchungen möglich.

3.2.1 Teil 1 – Basisplatten

Als Basisplatten wurden Probekörper mit einer Größe von $1,50 \times 1,50 \times 0,20 \text{ m}^3$ und einer Betongüte C35/45 untersucht. In einer ersten Serie wurden hierbei ein ober- und unterseitiges Bewehrungsgitter (B 500) aus Stäben mit einem Durchmesser von 8 mm in einem Abstand von 10 cm eingebaut (Platten 120 bis 123). Der Bewehrungsgrad ergibt sich zu 0,5 %. Um weiterhin auch den Einfluss von zusätzlichen Schubbewehrungen zu untersuchen, wurden in einer zweiten Serie zusätzlich zur bereits beschriebenen Biegebewehrung 60 Z-förmige Bügel mit einem Durchmesser von 10 mm eingebracht (Platten 214 bis 217). Hieraus resultierte ein Schubbewehrungsgrad von 0,2 %. Die Betondeckung betrug für alle Probekörper 2,5 cm.

Aktuell ist ein Teil der Basisplatten getestet und ausgewertet. Für die Prüfung kam ein 38 cm langer, 21,66 kg schwerer und an der Nase flach geformter Vollimpaktor aus Stahl mit einem Durchmesser von 10 cm zum Einsatz. Die Probekörpereigenschaften sowie ein Teil der Testergebnisse sind, geordnet nach ihrer Impaktgeschwindigkeit, in Tabelle 1 aufgelistet und werden in den nachfolgenden Abschnitten dargestellt.

Tabelle 1 Übersicht Basisplatten

Platte (PL)	Maße [m × m × m]	Bewehrung Biegebewehrung	Bügel	v_{imp} [m/s]	Strukturverhalten	$v_{imp,rest}$ [m/s]	h_{imp} [mm]	
121	1,50 × 1,50 × 0,20	Ø8 mm–10 cm	–	32,7	Rückprall	< 0	8	
120				44,6	Rückprall	< 0	16	
122				53,9	Rückprall	< 0	30	
123				61,4	Perforation	11,1	200	
217			60 St. Ø10 mm		33,3	Rückprall	< 0	8
215					43,8	Rückprall	< 0	12
216					53,3	Rückprall	< 0	38
214					61,9	Perforation	14,9	200

Mit Rückprall, Penetration und Perforation des Impaktors können Impaktexperimente in Abhängigkeit der Restgeschwindigkeit ($v_{imp,rest}$) generell in drei Strukturverhaltenskategorien eingeteilt werden. Der Rückprall, als Ergebnis eines globalen Verhaltens, ist nach dem Impact mit einer Impaktorbeschleunigung in die entgegengesetzte Richtung gekennzeichnet ($v_{imp,rest} < 0$). Im Unterschied dazu kommt es bei einer Perforation zu einer kompletten Durchdringung des Probekörpers mit rückseitigem Austritt des Impaktors ($v_{imp,rest} > 0$) als Ergebnis eines lokalen Versagens. Eine Mischform zwischen globalem und lokalem Verhalten ist die Penetration, bei der die Impaktorgeschwindigkeit durch den Probekörper komplett abgebremst wird ($v_{imp,rest} = 0$). Dieses Ereignis liegt damit nah an der theoretischen Perforationsgrenze, siehe [11].

In Tabelle 1 sind die jeweiligen Kategorien der getesteten Platten aufgelistet. Da für den Rückprall keine Bestimmung der Impaktorrestgeschwindigkeit möglich ist, wurden weiterhin die gemessenen Impaktoreindringtiefen (h_{imp}) als Vergleichswerte angegeben. Es fällt auf, dass sich innerhalb gleicher Geschwindigkeitsstufen sowohl das Bauteilverhalten als auch die erzielten Eindringtiefen der biege- und bügelbewehrten Platten ähneln. Hieraus lässt sich schlussfolgern, dass die Perforationsgeschwindigkeiten beider Konfigurationen auf ähnlichem Niveau zwischen ~53 m/s und ~62 m/s liegen.

Lagerkräfte und Verschiebungen

Die während der Versuche durch die Kraftmessdosen bzw. das Vibrometer gemessenen Auflagerkräfte und Verschiebungen beider Serien der Basisplatten sind in Bild 3 in Abhängigkeit der Zeit dargestellt. Aufgrund des globalen Verhaltens der Platten nehmen sowohl die Lagerkräfte als auch

die Verformungen innerhalb der ersten drei Geschwindigkeitsstufen von ca. 33 m/s, 45 m/s und 53,5 m/s kontinuierlich zu. Erst bei einer weiteren Steigerung auf ca. 61,5 m/s bei den Platten 123 und 214 zeigen sich Graphen auf geringerem Niveau. Die maximalen Lagerreaktionen und Verformungen werden somit vor dem Erreichen der Perforationsgrenze erzielt, nach deren Überschreiten die Messwerte aufgrund des lokalen Versagens auf einem konstant geringen Wert verbleiben. Im Vergleich der Serien untereinander zeigen sich mit Werten von 448 kN bzw. 4,7 mm, 657 kN|6,5 mm, 774 kN|7,1 mm und 589 kN|4,5 mm für die biegebewehrten Platten sowie mit Werten von 531 kN|4,6 mm, 673 kN|5,9 mm, 692 kN|6,7 mm und 530 kN|4,5 mm für die bügelbewehrten Platten kaum Unterschiede zwischen den verschiedenen Bewehrungskonfigurationen.

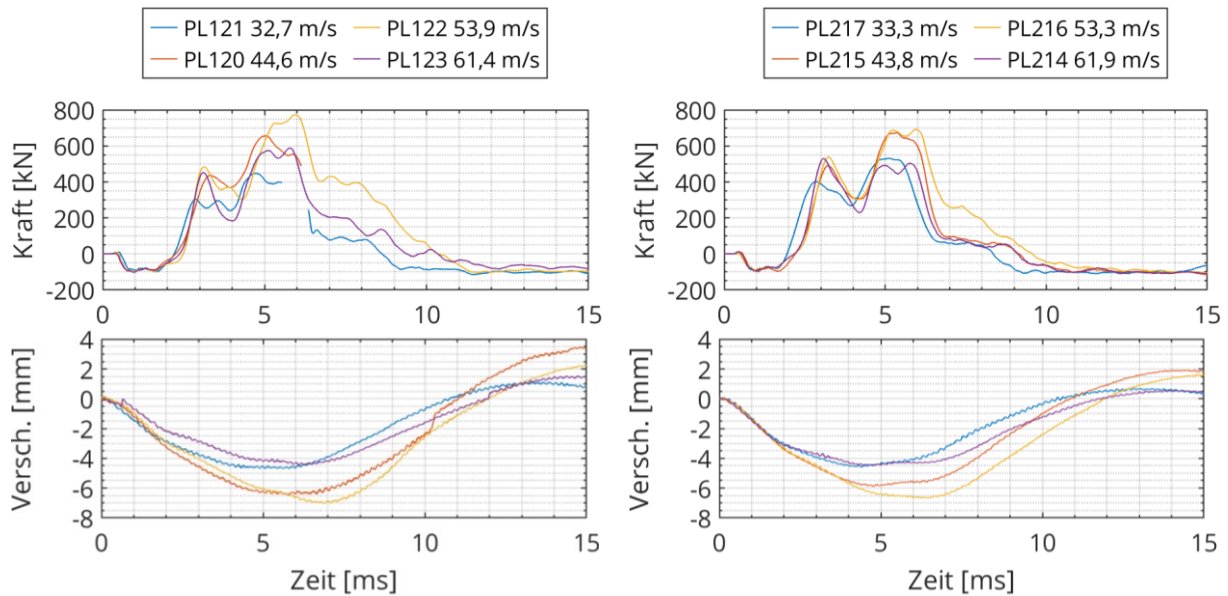


Bild 3 Gemessene Auflagerkräfte und Verschiebungen der Serien Biegebewehrung (links) und Bügelbewehrung (rechts). Grafik: Franz Bracklow

Schädigungsanalyse

Zur Bewertung der induzierten Plattenschädigung erfolgte für jede Platte die Bestimmung eines globalen (θ_{global}) sowie zweier lokaler (θ_{lokal}) Schädigungsgrade. Für die globale Schädigung wurde die eigenfrequenzbasierte Plattensteifigkeit vor und nach dem Impaktexperiment, bezogen auf die Gesamtsteifigkeit, ausgewertet. Die lokalen Schädigungen ergeben sich aus den Massen der ober- und unterseitigen Betonabplatzungen infolge *Spalling* und *Scabbing* bezogen auf die Plattengesamtmasse [6], [7]. Alle Werte sind in Abhängigkeit der verwendeten Impaktgeschwindigkeit in Bild 4 dargestellt. Hierin kennzeichnen Punkte einen Rückprall und Kreuze eine Perforation des Impaktors. Die sich daraus ergebenden Grenzen für die Perforationsgeschwindigkeit (v_{Perf}) sind als Punktlinie eingezeichnet.

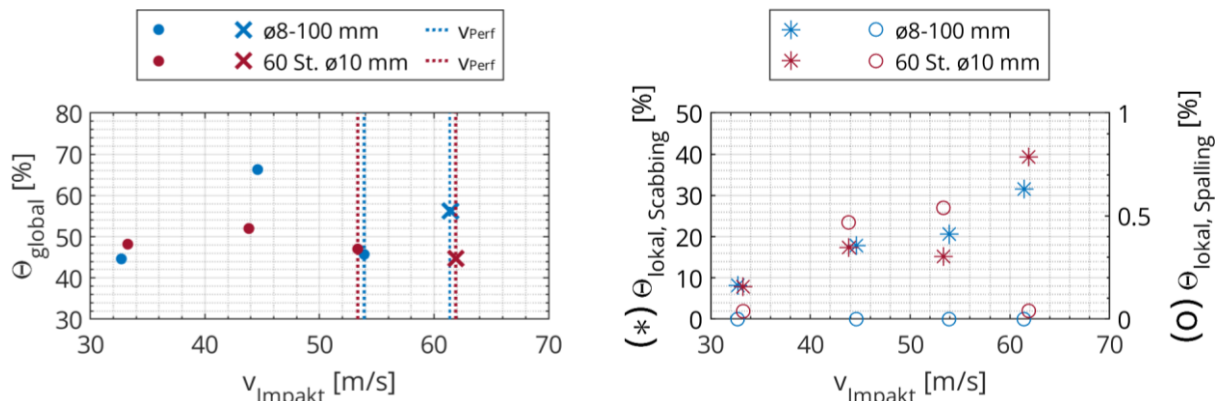


Bild 4 Globale (links) und lokale (rechts) Plattenschädigung. Grafik: Franz Bracklow

Für die globale Schädigung ist bei steigender Impaktorgeschwindigkeit eine Zunahme der Werte bis zur Penetration zu erkennen. Da die Perforationsgeschwindigkeit beider Serien vermutlich nah der Stufe 53,5 m/s liegt, ist der Schädigungsabfall bereits beim letzten Versuch mit Rückprall zu beobachten. Die maximalen Werte ergeben sich bei ca. 45 m/s vor der Geschwindigkeitsstufe, bei der die größten Lagerreaktionen und Verformungen gemessen wurden.

Aufgrund der Bildung und des zunehmenden Herauslösen des Bruchkörpers bei steigender Geschwindigkeit zeigen alle Platten eine ausgeprägte lokale Scabbingschädigung. Bei den bügelbewehrten Platten sind zusätzlich vermehrt oberseitige Abplatzungen feststellbar. Generell lässt sich ableiten, je mehr Scabbing an der Plattenunterseite auftritt, desto weniger Spalling ergibt sich auf der Plattenoberseite und umgekehrt.

Es lässt sich zusammenfassen, dass die biegebewehrten Platten eine Tendenz zu geringeren lokalen Schädigungen in Verbindung mit einer größeren globalen Schädigung aufweisen. Für bügelbewehrte Platten ist dieses Verhalten umgekehrt.

3.2.2 Teil 2 - verstärkte Platten

Im zweiten Projektteil erfolgt die experimentelle Untersuchung verstärkter Stahlbetonplatten, deren Tests aktuell noch ausstehend sind. Vorgesehen ist, identisch ausgeführte Basisplatten mit Biege- und Bügelbewehrung mit einer 2 cm dicken Schicht Carbonbeton zu verstärken. Hierzu sollen zwei kreuzweise angeordnete SITgrid040-Carbontextilien in einer Pagel-TF10-Feinbetonmatrix eingebettet werden. Die Prüfung erfolgt analog dem in Bild 2 dargestellten und bereits erläuterten Schema. Diese ist, dass infolge der Membranwirkung die Verstärkungsschicht das Herauslösen des Bruchkörpers verhindern wird, gleichzeitig werden Form und Ausprägung des Bruchkörpers wiederum die Beanspruchung der Verstärkungsschicht bestimmen. Wie aus den Bruchkörperlinien in Bild 5 (Basisplatten) erkennbar ist, führen die verwendeten Bügelbewehrungen zu einem gedrungeneren Bruchkörper und damit infolge der Bruchkörper-Verstärkungsschicht-Wechselwirkung zu einer wahrscheinlich größeren Beanspruchung einer rückseitig applizierten Verstärkung als das bei biegebewehrten Platten der Fall wäre.

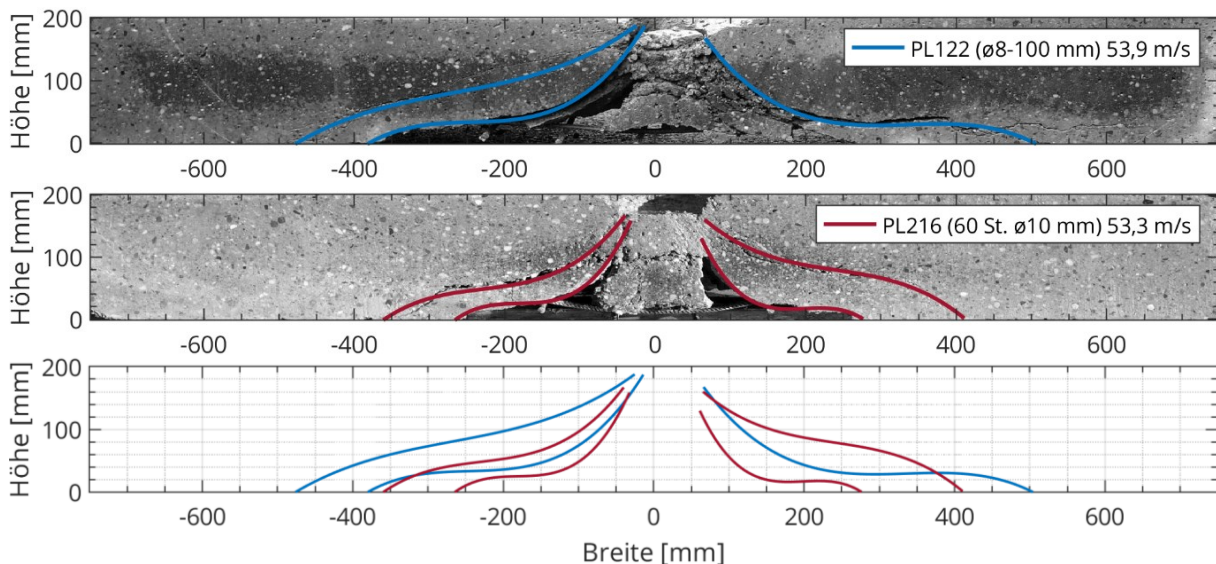


Bild 5 Typische Bruchkörper der Basisplatten. Grafik: Franz Bracklow

4 Ausblick

Um weiterhin eine möglichst maximale Beanspruchung der Verstärkungsschicht zu untersuchen, sind noch steiler geformte Bruchkörper innerhalb der Grundplatten notwendig. Eine gute Grundlage bilden hierfür die Versuche von Orbovic [4], bei denen Durchstanzwinkel von bis zu 78° gemessen wurden (siehe Bild 6). Auf diesen Daten basierend, wurde eine weitere Testserie, beste-

hend aus jeweils vier Basis- bzw. verstärkten Platten geplant, bei denen zur normalen Grundbewehrung zusätzlich 144 Doppelkopfbolzen mit einem Durchmesser von 12 mm (Bewehrungsgrad 1,4 %) eingebaut wurden. Die Durchführung der Tests ist ebenfalls noch ausstehend.



Bild 6 Stanzwinkel $\theta = 34^\circ$ – ohne Bügel (links), $\theta = 75^\circ$ – 1,4 % Schubbewehrungsgrad (Doppelkopfbolzen, Mitte), $\theta = 78^\circ$ – 1,4 % Schubbewehrungsgrad (geschlossene Bügel, rechts). Fotos: N. Orbovic [4]

Dank

Die vorgestellten Untersuchungen wurden durch Mittel des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMWi/BMUV, Projekt 1501541) auf der Grundlage eines Beschlusses des Deutschen Bundestages sowie der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG, Projekt 287321140) im Rahmen des Graduiertenkollegs 2250, Projekt A5/II gefördert. Großer Dank gebührt weiterhin den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Otto-Mohr-Laboratoriums für die Unterstützung bei der Versuchsdurchführung.

Literatur

- [1] Rüdiger, E. (1986) *Untersuchungen zur Ermittlung der kinetischen Grenztragfähigkeit von Stahlbetonplatten beim Aufprall deformierbarer Projektilen (Versuche II/11 bis II/22) – 6. technischer Bericht*. Frankfurt am Main: Hochtief AG Abt. Kerntechnik Ingenieurbau.
- [2] Eibl, J.; Kreuser, K. (1986) *Versuche zum Verhalten unterschiedlicher Stahlsorten in stoßbeanspruchten Platten*. Berlin: Ernst & Sohn.
- [3] Sugano, T. et al. (1993) *Local damage to reinforced concrete structures caused by impact of aircraft engine missiles Part 2. Evaluation of test results*. Nuclear Engineering and Design 140, H. 3, S. 407–423. [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(93\)90121-O](https://doi.org/10.1016/0029-5493(93)90121-O)
- [4] Orbovic, N.; Sagals, G.; Blahoianu, A. (2015) *Influence of transverse reinforcement on perforation resistance of reinforced concrete slabs under hard missile impact*. Nuclear Engineering and Design 295, S. 716–729. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2015.06.007>
- [5] Curosu, I. (2019) *Mineral-bonded composites for enhanced structural impact safety – Overview of the format, goals and achievements of the research group GRK 2250*. 10th International Conference on Fracture Mechanics of Concrete and Concrete Structures. IA-FraMCoS.
- [6] Hering, M. (2020) *Untersuchung von mineralisch gebundenen Verstärkungsschichten für Stahlbetonplatten gegen Impaktbeanspruchungen* [Dissertation]. Technische Universität Dresden.
- [7] Hering, M. et al. (2020) *Reinforced concrete plates under impact load – damage quantification*. Materials 13, Nr. 20. <https://doi.org/10.3390/ma13204554>
- [8] Just, M. et al. (2016) *Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Behälter (Flugzeugtanks) – Phase 1A: Maßstabeffekte bei stoßartiger Beanspruchung* [Abschlussbericht]. Dresden: Technische Universität, Institut für Massivbau. <https://doi.org/10.2314/GBV:868615218>
- [9] Hering, M.; Kühn, T.; Curbach, M. (Januar 2017) *Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Behälter (Flugzeugtanks) – Phase 1B: Quantifizierung der Schädigungen des Betongefüges, Teilprojekt: Fallturmversuche* [Abschlussbericht]. Dresden: Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden. <https://doi.org/10.2314/GBV:100128142X>
- [10] Bracklow, F. et al. (März 2021) *Bauteilverhalten unter stoßartiger Beanspruchung durch aufprallende Behälter (Flugzeugtanks) – Abschlussbericht: Phase 1C: Experimentelle und numerische Untersuchungen zu Maßstabeffekten, Versagensmechanismen und Bauteilschädigung* [Abschlussbericht]. Dresden: Institut für Massivbau, Technische Universität Dresden. <https://doi.org/10.2314/KXP:1789564956>
- [11] Tahenti, B.; Coghe, F.; Nasri, R. (2020) *Ballistic Limit Estimation Approaches for Ballistic Resistance Assessment*. Defence Science Journal 70, H. 1, S. 82–89. <https://doi.org/10.14429/dsj.70.14122>