



Reinforced concrete plates under impact loading and mineral-bonded strengthening layer quantification

Stahlbetonplatten unter Stoßbeanspruchung und
Quantifizierung mineralisch gebundener
Verstärkungsschichten

Franz Bracklow

Geboren am: 14.01.1991 in Radebeul

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

Erstgutachter

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Manfred Curbach

Zweitgutachter

Eric Jacques, Ph.D., P.Eng.

Prof. Dr.-Ing. Thomas Braml

Eingereicht: 26.04.2024

Verteidigt am: 05.09.2024

Abstract

Due to its good material properties and versatility, reinforced concrete (RC) is generally considered to be the building material of the 21st century. While the static mode of action has been extensively investigated, there are still open questions regarding the material and structural behavior under impact loading, e.g. due to rockfall, ship, vehicle or aircraft impact. For example, various impact experiments documented in the literature at the structural level show that the use of shear reinforcement leads to different results, while denser flexural reinforcement or, in particular, increased plate thicknesses show consistently positive tendencies. All these parameters have in common that they can only be influenced during the construction process and that subsequent adjustments, e.g. of the component geometry or the internal reinforcement, are only possible to a limited extent to increased requirements. In times of necessary material conservation, concepts for the subsequent strengthening of existing structures are becoming increasingly important. One possibility for retrofitting is the application of mineral-bonded layers of textile-reinforced concrete (TRC) or carbon-reinforced concrete (CRC), the effect of which has already been quantitatively confirmed under impact.

Based on the initial situation described above, the objective of the present work is to investigate the influences of different reinforcement conditions and rear side strengthening layers on the impact behavior of RC plates. For this purpose, an experimental parameter study was carried out as part of a coherent test program within the drop tower facility of the Otto Mohr Laboratory (OML) of the Institute of Concrete Structures (IMB) at Dresden University of Technology (TUD). A total of 37 impact tests were performed in eight different specimen configurations, the individual structural behavior was quantified by means of so-called resistance spectrums, and the plate damage as well as the inner fracture body were analyzed. Additional repeatability impact tests and static experiments were realized to evaluate the reproducibility of the results obtained and to derive the quasi-static load-bearing capacity. It has been shown that the application of a strengthening layer on the rear side increases the perforation and especially the scabbing behavior under impact loading, while the magnitude of the rise depends on the internal reinforcement condition. However, the load increase potential under quasi-static loading could not be fully exploited due to the intensive localization of the damage.

As part of a final empirical evaluation, existing estimation formulas for assessing the structural behavior of RC plates under impact loading were analyzed. A selected approach was used as the basis for adapting the formulas to the results obtained for the specimens with an additional strengthening layer. In the context of a subsequent recalculation and prediction of the scabbing and perforation behavior of further experiments with and without a strengthening layer, the developed approach was validated and a starting point for further experimental investigations was developed.

Kurzfassung

Der Baustoff Stahlbeton gilt aufgrund seiner guten Materialeigenschaften sowie der vielseitigen Verwendbarkeit gemeinhin als Baustoff des 21. Jahrhunderts. Während die statische Wirkungsweise weitgehend untersucht ist, existieren jedoch im Bereich von stoßartigen Beanspruchungen, z. B. infolge Steinschlag, Schiffs-, Fahr-, oder Flugzeuganprall offene Fragen hinsichtlich des Material- und Bauteilverhaltens. So zeigen beispielsweise verschiedene in der Literatur dokumentierte Impaktexperimente auf Strukturebene, dass die Nutzung von Schubbewehrungen unterschiedliche Ergebnisse zur Folge hat, wohingegen dichtere Biegebewehrungen oder insbesondere vergrößerte Plattendicken durchweg positive Tendenzen aufzeigen. Alle genannten Parameter haben gemein, dass diese ausschließlich im Bauprozess beeinflussbar sind und eine nachträgliche Anpassung, beispielsweise der Bauteilgeometrie oder der inneren Bewehrung infolge gestiegener Anforderungen nur bedingt möglich ist. In Zeiten notwendiger Rohstoffeinsparungen gewinnen Konzepte zur nachträglichen Ertüchtigung bestehender Konstruktionen daher zunehmend an Bedeutung. Eine Möglichkeit zur Verstärkung ist die Applikation von mineralisch gebundenen Schichten aus Textilbeton (TRC) oder Carbonbeton (CRC), deren Funktionsweise unter Impact breits quantitativ bestätigt werden konnte.

An die beschriebene Ausgangssituation anknüpfend besteht die Zielstellung der vorliegenden Arbeit in der Untersuchung der Einflüsse verschiedener Bewehrungszustände sowie von rückseitigen Verstärkungsschichten auf das Impactverhalten von Stahlbetonplatten. Hierfür erfolgte die Realisierung einer experimentellen Parameterstudie im Rahmen eines zusammenhängenden Versuchsprogramms innerhalb der Fallturmanlage des Otto-Mohr-Laboratoriums (OML) des Instituts für Massivbau (IMB) der Technischen Universität Dresden (TUD). Es wurden insgesamt 37 Impactversuche in acht verschiedenen Probekörperkonfigurationen durchgeführt, das jeweilige Bauteilverhalten mittels sogenannter Widerstandsspektren quantifiziert und die Plattenschädigung bzw. der innere Bruchkörper analysiert. Zusätzliche Impacttests zur Wiederholbarkeit sowie statische Experimente erfolgten zur Beurteilung der Reproduzierbarkeit der erzielten Ergebnisse sowie zur Ableitung der quasi-statischen Tragfähigkeit. Es zeigte sich, dass durch die Applikation einer rückseitigen Verstärkungsschicht das Perforations- und insbesondere das Scabbingverhalten unter Impactbeanspruchung gesteigert werden konnten, wobei die Größe der Zunahme in Abhängigkeit des inneren Bewehrungszustandes steht. Das Laststeigerungspotenzial unter quasi-statischer Beanspruchung konnte aufgrund der intensiven Lokalisation der Schädigung dabei jedoch nicht vollständig ausgeschöpft werden.

Im Rahmen einer abschließenden empirischen Auswertung erfolgte die Analyse vorhandener Überschlagsformeln zur Beurteilung des Bauteilverhaltens von Stahlbetonplatten unter Impactbeanspruchung. Ein ausgewählter Ansatz diente dabei als Grundlage für die Anpassung der Formeln an die erzielten Ergebnisse der Probekörper mit zusätzlicher Verstärkungsschicht. Im Rahmen einer anschließenden Nach- bzw. Vorausrechnung des Scabbing- und Perforationsverhaltens weiterer Experimente mit und ohne Verstärkungsschicht konnte der entwickelte Ansatz validiert und ein Ausgangspunkt für anknüpfende experimentelle Untersuchungen erarbeitet werden.