

Einfluss der Sprengladungsgeometrie auf die Geschwindigkeit von Betonbruchstücken

Moritz Hupfaut, Norbert Gebbeken

Forschungsgruppe Bauprotect, Universität der Bundeswehr München

Zusammenfassung: Infolge einer Kontaktdetonation an einem Betonbauwerk können Bruchstücke auf der lastabgewandten Seite weggeschleudert werden. Neben dem Gewicht ist die Geometrie der Sprengladung ein wichtiger Einflussfaktor. In diesem Beitrag wird der Einfluss der Geometrie von zylindrischen Sprengladungen mit numerischen Simulationen untersucht und der ermittelte Zusammenhang anhand der experimentell bestimmten Geschwindigkeit der Bruchstücke validiert.

1 Einleitung

Die Bedrohung durch terroristische Anschläge hat in den letzten Jahren erheblich zugenommen. Daraus ergibt sich ein zunehmender Bedarf an Schutzmaßnahmen, um Menschen und kritische Infrastrukturen vor Anschlägen mit Sprengstoffen zu schützen. In der Vergangenheit konzentrierten sich Sprengstoffanschläge vor allem auf die unteren Stockwerke eines Gebäudes, in deren Nähe große Mengen Sprengstoff mit einem Fahrzeug transportiert werden können. Dieser Bedrohung wird neben dem Einsatz gehärteter Strukturen vor allem durch zusätzliche Zugangskontrollen begegnet, um eine größere Distanz zwischen dem Sprengstoff und dem Zielgebäude sicherzustellen.

Aufgrund der Entwicklungen im Bereich der Drohnentechnologie sind kommerziell verfügbare Drohnen heute in der Lage, immer größere Lasten über immer größere Entfernungen zu transportieren [1]. Dies verändert das Szenario eines Anschlags grundlegend, da der Sprengstoff nun auch in höhere Ebenen eines Gebäudes transportiert werden kann, die bisher als sicher galten. Außerdem kann der Sprengstoff viel näher an das Ziel gebracht werden, da der Luftraum um ein Gebäude, insbesondere in einer städtischen Umgebung, schwer zu kontrollieren ist. Dadurch können Anschläge gezielter auf einen bestimmten Bereich eines Gebäudes gerichtet werden und mit geringeren Mengen an Sprengstoff als bei einem Fahrzeuganschlag

erhebliche Schäden anrichten. Die im Vergleich zu einer Fahrzeugbombe geringere Sprengstoffmenge wird dadurch kompensiert, dass die Detonation in unmittelbarer Nähe oder sogar in Kontakt mit einem Bauwerk erfolgt.

Bei einer Detonation in größerer Entfernung von einem Bauwerk (Fernfeld) hat die Druckwelle zunächst Zeit, sich in der Luft auszubreiten und das Bauwerk annähernd gleichmäßig zu treffen. Dabei ist neben den Materialparametern das statische System für die Reaktion des Bauwerks entscheidend.

Bei einer Kontaktdetonation hingegen wird die Druckwelle direkt vom Sprengstoff in das betroffene Bauteil eingeleitet. Nach Durchlaufen des Bauteils wird die Druckwelle durch Reflexion an der lastabgewandten Bauteiloberfläche in eine Zugwelle umgewandelt, die durch das Bauteil zurückläuft. Die resultierende Beanspruchung ist wesentlich stärker lokalisiert als bei einer Detonation im Fernfeld und die Schädigung hängt nicht von globalen Parametern wie dem statischen System ab, sondern hauptsächlich von der direkten Wechselwirkung der eingeleiteten Druckwelle und reflektierten Zugwelle mit dem Material.

Infolge der Zugschädigung des Betons entstehen Betonbruchstücke, die auf der lastabgewandten Seite aus dem Bauteil herausgeschleudert werden. Diese Betonbruchstücke stellen eine Gefahr dar, da sie Personen verletzen oder technische Einrichtungen beschädigen können.

Abb. 1 zeigt die Schädigung einer Stahlbetonplatte infolge einer Kontaktdetonation (links) sowie die resultierenden Betonbruchstücke auf der lastabgewandten Seite der Stahlbetonplatte. Die Zugschädigung der Stahlbetonplatte mit resultierenden Betonbruchstücken kann auch ohne einen vollständigen Durchbruch der Stahlbetonplatte auftreten.

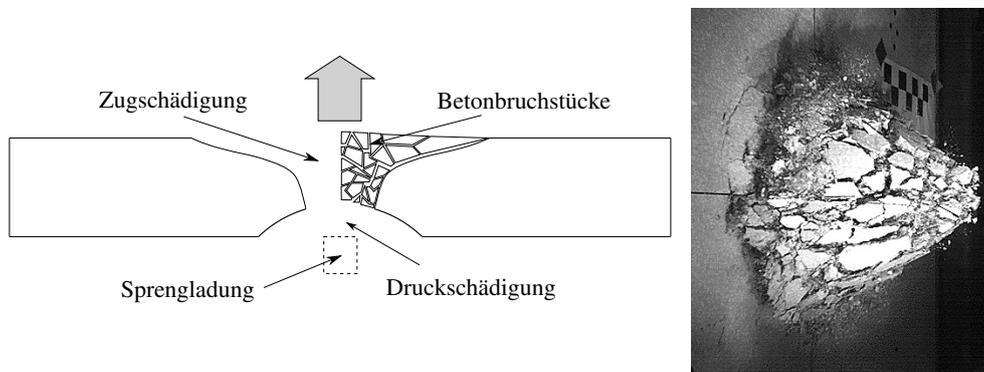


Abbildung 1: Schädigung bei einer Kontaktdetonation (links) und Betonbruchstücke auf der lastabgewandten Seite (rechts)

Zur Untersuchung der Entstehung und Wirkung von Betonbruchstücken auf der lastabgewandten Seite einer Stahlbetonplatte infolge einer Kontaktdetonation wurde vom Autor eine Versuchsreihe durchgeführt [2]. Dabei stellte sich die Frage, inwieweit das Verhältnis von Länge zu Durchmesser (L/D) der verwendeten zylindrischen Sprengladungen einen Einfluss auf die resultierende Beanspruchung hat.

Während für Detonationen im Fernfeld eines Bauwerks empirische Formeln zur Abschätzung der resultierenden Belastung existieren (e.g. [3]), sind die entsprechenden Annahmen bei Kontaktdetonationen nicht gültig. Hier haben die Geometrie und Ausrichtung der Sprengladung relativ zum Bauteil sowie der Ort der Zündung innerhalb der Sprengladung einen großen Einfluss auf die resultierende Belastung eines Bauteils [10].

Im Folgenden werden daher numerische Simulationen vorgestellt, mit deren Hilfe die Belastung durch zylindrische Sprengladungen mit unterschiedlichem L/D -Verhältnis mit der Belastung durch sphärische Sprengladungen verglichen wird.

2 Einfluss der Sprengladungsgeometrie

Die numerischen Simulationen werden mit dem *structured ALE* Solver des kommerziellen Hydrocodes LS-Dyna [5] durchgeführt. Der verwendete Sprengstoff SEMTEX10 wird mit Hilfe der empirischen Jones-Wilkins-Lee Zustandsgleichung [4] abgebildet und der Detonationsvorgang mit `*MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN` gesteuert. Die zugehörigen Parameter basieren auf einer Simulation mit dem thermochemischen Code CHEETAH [6] und sind in Tab. 1 dargestellt.

A [MPa]	B [MPa]	E_0 [MPa]	$R1$ [-]	$R2$ [-]	Γ [-]	ρ [kg m ⁻³]	d [m s ⁻¹]	p_{cj} [MPa]
6711×10^2	9370	8447	4.91	1.19	0.4	1631	7474	22.62×10^3

Tabelle 1: Parameter des Sprengstoffes SEMTEX10

Um den Rechenaufwand zu reduzieren, wird die Symmetrie des Modells ausgenutzt, und nur ein Viertel mit symmetrischen Randbedingungen modelliert. Die Betonoberfläche wird als reflektierende Randbedingung abgebildet und die freien Modellränder werden mit *flow out* Randbedingungen versehen um eine ungestörte Ausbreitung der Druckwelle aus dem Modell zu ermöglichen. Die anschließende Auswertung erfolgt anhand von gleichmäßig verteilten Messpunkten entlang der reflektierenden Oberfläche.

Basierend auf einer Konvergenzstudie des resultierenden Gesamtimpulses wurde eine einheitliche Netzgröße von 1.25 mm ermittelt. Der nach Richardson-Extrapolation [7] abgeschätzte Fehler beträgt 1.0 % gegenüber der erwarteten „exakten“ Lösung. Abb. 2 zeigt eine Skizze des numerischen Modells.

Die Simulationen der zylindrischen Sprengladungen mit Durchmesser $D = 10$ cm und variabler Länge L erfolgen für eine Sprengstoffmasse von 1000 g mit L/D Verhältnissen zwischen 0.2 und 2.0. Zusätzlich werden Simulationen für sphärischen Sprengladungen mit Sprengstoffmassen zwischen 500 g und 3500 g durchgeführt. Die Zündung der zylindrischen Sprengladungen erfolgt an der vom Bauteil abgewandten Oberfläche der Sprengladung, die Zündung der sphärischen Sprengladungen in deren Zentrum.

Abb. 3 zeigt die resultierenden spezifischen Impulse der verschiedenen Simulationen in radialer Richtung, die durch eine zeitliche Integration der Druckverläufe an den verschiedenen Messpunkten ermittelt wurden. Die Integration erfolgt dabei bis zu einem Zeitpunkt von

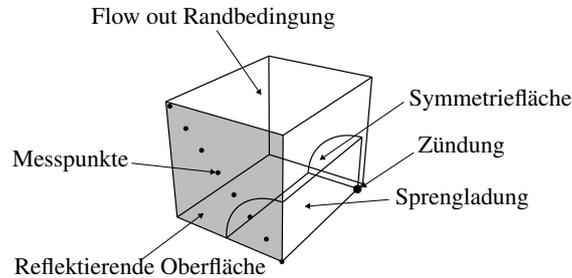


Abbildung 2: Numerisches Modell

0.1 ms nach der Zündung der Detonation, da zu diesem Zeitpunkt die wesentliche Interaktion an der reflektierenden Oberfläche abgeschlossen ist.

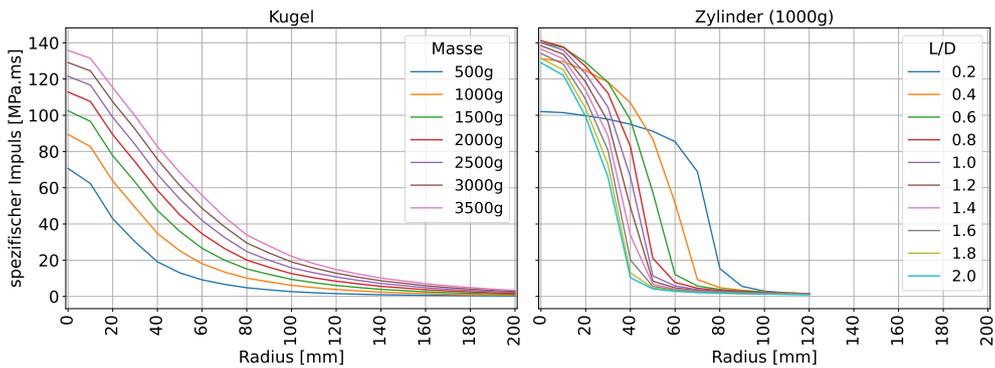


Abbildung 3: Spezifische Impulse der sphärischen (links) und zylindrischen (rechts) Sprengladungen nach 1.0 ms

Abb. 3 zeigt, dass sich die Belastung bei einer sphärischen Ladung über einen größeren Bereich verteilt, während sie bei einer zylindrischen Ladung fast ausschließlich auf den Bereich beschränkt ist, der in direktem Kontakt mit der Sprengladung steht.

Ein Vergleich verschiedener Sprengladungsgeometrien erfolgt anhand des von [8] eingeführten energieäquivalenten Impulses. Der energieäquivalente Impuls basiert auf dem Zusammenhang der kinetischen Energie E_k einer diskreten Masse $\rho t A$ mit dem einwirkenden Impuls I .

$$E_k = \frac{I^2}{2\rho t A} \quad (1)$$

Dabei sind ρ und t die Dichte und die Abmessung der Masse in Belastungsrichtung und A ist die zugehörige Oberfläche, auf die der Impuls wirkt.

Ausgehend von diesem Zusammenhang kann die Reaktion eines plattenförmigen Bauteils durch eine Reihe diskreter Massen dargestellt werden. Die einzelnen Massen bewegen sich zunächst unabhängig voneinander, sind aber durch Federelemente beliebiger Steifigkeit miteinander verbunden. In Abhängigkeit von der Schubsteifigkeit dieser Federn kann ein unterschiedliches Bauteilverhalten beschrieben werden. Abb. 4 zeigt die beiden Extremfälle dieser Betrachtung infolge eines spezifischen Impulses i für eine unendliche Federsteifigkeit (links) und eine Federsteifigkeit von Null (rechts).

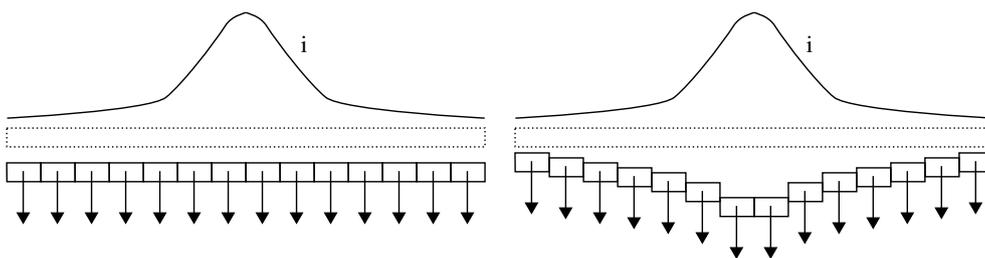


Abbildung 4: Verformung einer Platte repräsentiert durch mit Schubfedern verbundene diskrete Massen infolge eines spezifischen Impulses i für eine unendliche Federsteifigkeit (links) und eine Federsteifigkeit von Null (rechts)

Bei unendlicher Federsteifigkeit (Abb. 4, links) bewegen sich alle diskreten Massen simultan und repräsentieren eine starre Platte. Das resultierende Geschwindigkeitsprofil und damit die kinetische Energie der diskreten Massen sind unabhängig von der Belastungsverteilung. Die resultierende kinetische Gesamtenergie stellt die untere Grenze für die Energieaufnahme des Bauteils dar.

Bei einer Federsteifigkeit von Null (Abb. 4, rechts) bewegen sich die diskreten Massen unabhängig voneinander. Folglich sind die Verteilungen der Geschwindigkeit und der kinetischen Energie direkt proportional zur Verteilung des einwirkenden Impulses. Die resultierende kinetische Gesamtenergie stellt die obere Grenze für die Energieaufnahme des Bauteils dar.

Die untere Grenze $E_{k,u}$ und die obere Grenze $E_{k,o}$ für die Energieaufnahme des Bauteils können auf Basis von Gl. (1) berechnet werden:

$$E_{k,u} = \frac{(\int_A i dA)^2}{2\rho t A} \quad (2) \quad E_{k,o} = \frac{1}{2\rho t} \int_A \frac{(i dA)^2}{dA} \quad (3)$$

Unterschiedlich ausgeprägte spezifische Impulse i werden dann als energieäquivalent definiert, wenn sie zur gleichen oberen Grenze der Energieaufnahme des Bauteils nach Gl. 3 führen.

In den Untersuchungen von [9] mit dünnen Stahlplatten wird die Anwendung des energieäquivalenten Impulses auf eine Biegeschlankheit des Bauteils von $l/d > 20$ beschränkt, deren Verformung ein Vielfaches der Plattendicke beträgt. Dieses Schlankheitskriterium wird von den untersuchten Stahlbetonplatten nicht erfüllt. Da das Versagen der Stahlbetonplatte infolge einer Kontaktdetonation jedoch sehr stark lokalisiert ist, wird die Anwendbarkeit des

energieäquivalenten Impulses für die durchgeführten Versuche dennoch als geeignet angesehen.

Für den Vergleich der untersuchten zylindrischen Sprengladungen mit den sphärischen Sprengladungen wird ein sphärischer Äquivalenzfaktor EF definiert. Dieser Faktor ist definiert als der Quotient der Masse einer zylindrischen Sprengladung W_z und der entsprechenden Masse einer sphärischen Sprengladung W_s , die einen energieäquivalenten Impuls erzeugen.

$$EF = \frac{W_s}{W_z} \quad (4)$$

Abb. 5 zeigt den resultierenden sphärischen Äquivalenzfaktor EF in Abhängigkeit vom L/D -Verhältnis einer zylindrischen Sprengladung.

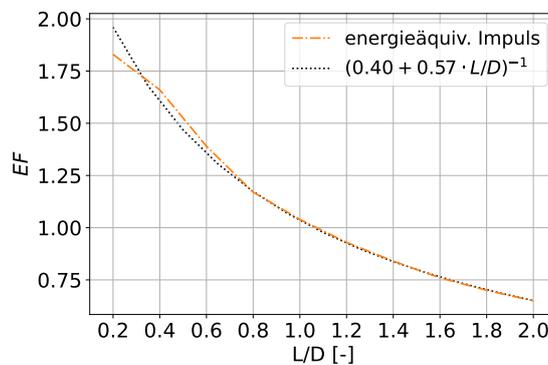


Abbildung 5: Sphärischer Äquivalenzfaktor EF in Abhängigkeit des L/D -Verhältnisses einer zylindrischen Sprengladung

Es ist ersichtlich, dass für $L/D \approx 1.0$ eine sphärische und eine zylindrische Sprengladung bei gleicher Sprengstoffmasse einen energieäquivalenten Impuls erzeugen. Während für $L/D < 1.0$ die zylindrische Sprengladung zu einer höheren Energieaufnahme und damit Belastung des Bauteils führt, ist für $L/D > 1.0$ die Belastung der sphärischen Sprengladung größer.

Zur Validierung des ermittelten Äquivalenzfaktors mit den experimentellen Messungen wird auf eine skalierte Dicke T_W der Stahlbetonplatte zurückgegriffen.

$$T_W = \frac{T}{W^{1/3}} \quad (5)$$

Dabei ist T die Dicke der Stahlbetonplatte und W die Masse einer Sprengladung. Die skalierte Dicke ermöglicht dabei eine Berücksichtigung der maßgebenden Eingangsgrößen durch einen einzelnen Parameter.

Als experimentelle Größe zur Validierung des eingeführten Äquivalenzfaktors, werden die maximalen Geschwindigkeiten der Betonbruchstücke verwendet. Diese wurden vom Autor

mittels *Tracking* in Hochgeschwindigkeitsaufnahmen der Versuche bestimmt [2]. Bei den Probekörpern handelt es sich um Stahlbetonplatten mit Dicken von 20 cm, 25 cm und 30 cm, die mit 1000 g, 1500 g und 2000 g SEMTEX10 belastet wurden. Die zylindrischen Sprengladungen wurden mit einer ihrer ebenen Flächen bündig auf die Mittelpunkte der Stahlbetonplatten aufgesetzt. Die zugehörigen L/D -Verhältnisse der Sprengladungen mit einem Durchmesser von 10 cm betragen 0.71, 1.07 und 1.43.

Abb. 6 zeigt die maximale Geschwindigkeit der Betonbruchstücke in Abhängigkeit von der skalierten Dicke der Stahlbetonplatte. Dabei wurde die skalierte Dicke der Stahlbetonplatte links ohne und rechts mit Berücksichtigung des L/D -Verhältnisses durch den sphärischen Äquivalenzfaktor EF berechnet. Zusätzlich ist eine lineare Regressionsgerade als gestrichelte Linie eingezeichnet und R^2 ist das Bestimmtheitsmaß dieser Regressionsgeraden mit den experimentellen Messungen. Die Gruppen der einzelnen Stahlbetonplattendicken sind farblich gekennzeichnet und die Sprengstoffmasse nimmt jeweils mit abnehmender skaliertes Dicke zu.

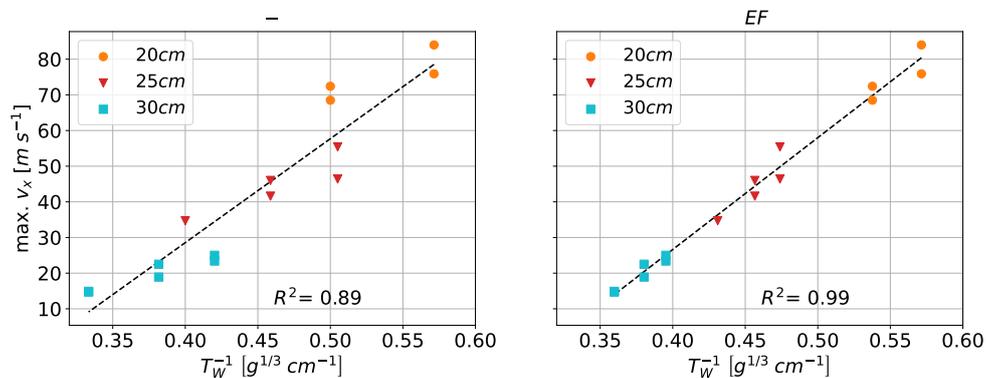


Abbildung 6: Maximale Geschwindigkeit der Betonbruchstücke in Abhängigkeit von der skalierten Dicke der Stahlbetonplatte ohne (links) und mit (rechts) Berücksichtigung des L/D -Verhältnisses

In Abb. 6 wird deutlich, dass ohne Berücksichtigung des L/D -Verhältnisses eine Überlappung der Gruppen mit unterschiedlichen Stahlbetonplattendicken in Richtung der skalierten Dicke auftritt. Mit Berücksichtigung des L/D -Verhältnisses tritt diese Überlappung nicht auf und es ergibt sich ein linearer Zusammenhang ($R^2 = 0.99$) zwischen der skalierten Dicke und der maximalen Geschwindigkeit. Der vorgestellte Äquivalenzfaktor wird daher als geeignet angesehen, um den Einfluss des L/D -Verhältnisses von zylindrischen Sprengladungen auf die resultierende Belastung in einer Bewertung zu berücksichtigen.

3 Zusammenfassung und Ausblick

Nach einer kurzen Einführung zur Wirkung einer Kontaktdetonation auf ein Bauteil wurde ein Äquivalenzfaktor zur Berücksichtigung des L/D -Verhältnisses von zylindrischen Sprengladungen auf die resultierende Belastung vorgestellt. Ein Vergleich mit der experimentell er-

mittelten Maximalgeschwindigkeit der entstehenden Betonbruchstücke zeigt, dass der vorgestellte Äquivalenzfaktor auf der Basis des energieäquivalenten Impulses gut geeignet ist, um den Einfluss des L/D -Verhältnisses von zylindrischen Sprengladungen auf die resultierende Belastung in einer Bewertung zu berücksichtigen. In einem nächsten Schritt können mit dem gleichen Verfahren Äquivalenzfaktoren für alternative Sprengladungsgeometrien abgeleitet werden, um einen besseren Vergleich verschiedener Versuchsreihen zu ermöglichen.

Literatur

- [1] EUROPEAN COMMISSION, J. R. C.: *Protection against unmanned aircraft systems: handbook on UAS risk assessment and principles for physical hardening of buildings and sites*. Publications Office, 2023
- [2] HUPFAUF, M. ; GEBBEKEN, N. : Secondary debris resulting from concrete slabs subjected to contact detonations. In: *Advances in Structural Engineering* 25 (2022), Nr. 7
- [3] KINGERY, C. N. ; BULMASH, G. : Airblast Parameters From TNT Spherical Air Bursts and Hemispherical Surface Bursts / ARBRL-TR-02555. 1984. – Forschungsbericht
- [4] LEE, E. L. ; HORNIG, H. C. ; KURY, J. W.: Adiabatic Expansion Of High Explosive Detonation Products. Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 1968. – Forschungsbericht
- [5] LSDYNA ; LIVERMORE SOFTWARE TECHNOLOGY CORPORATION (Hrsg.): *LS-DYNA keyword user's manual*. 2021
- [6] LU, J. P.: Evaluation of the Thermochemical Code - CHEETAH 2.0 for Modelling Explosives Performance. Weapons Systems Division, Aeronautical and Maritime Research Laboratory, 2001. – Forschungsbericht
- [7] RICHARDSON, L. F. ; GAUNT, J. A.: The deferred approach to the limit. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character* 226 (1927)
- [8] RIGBY, S. ; AKINTARO, O. ; FULLER, B. ; TYAS, A. ; CURRY, R. ; LANGDON, G. ; POPE, D. : Predicting the response of plates subjected to near-field explosions using an energy equivalent impulse. In: *International Journal of Impact Engineering* 128 (2019)
- [9] RIGBY, S. ; OSBORNE, C. ; LANGDON, G. ; COOKE, S. ; POPE, D. : Spherical equivalence of cylindrical explosives: Effect of charge shape on deflection of blast-loaded plates. In: *International Journal of Impact Engineering* 155 (2021)
- [10] XIAO, W. ; ANDRAE, M. ; GEBBEKEN, N. : Influence of charge shape and point of detonation of high explosive cylinders detonated on ground surface on blast-resistant design. In: *International Journal of Mechanical Sciences* 181 (2020)