

Anforderungen an die Mindestgröße von Probekörpern zur Untersuchung des Penetrationsverhaltens von Normalbeton infolge Beschuss

Dipl.-Ing. Steve Werner *
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel **

* Universität der Bundeswehr München, Deutschland, steve.werner@unibw.de
** Universität der Bundeswehr München, Deutschland, christian.thienel@unibw.de

Zusammenfassung

Die vorliegende Studie befasst sich mit dem Einfluss der Probekörpergröße auf die Widerstandsfähigkeit von hochdynamisch belastetem Beton unter Beschuss. Hierzu wurden unterschiedlich große Betonplatten hergestellt und mittig mit einem Hartkerngeschoss (7,62 x 51 mm) bei einer Geschwindigkeit von ca. 870 m/s perforiert. Die unter dieser hochdynamischen Belastung entstehenden Bruchflächen der Probekörper wurden mit einem neu entwickelten Auswerteverfahren analysiert. Dabei wurden die Ausbruchkrater an der Eintritts- und Austrittsseite dreidimensional vermessen und die Fragmente wurden mit einem automatischen Bildauswerteverfahren untersucht. Es zeigte sich, dass 5 cm-dicke Probekörper mit einer 30 x 30 cm großen Grundfläche ausreichend groß genug sind, um Rückschlüsse auf das lokale Versagen unter Beschuss ziehen zu können.

Keywords: Beschuss, Beton, Probekörpergröße

1 Einleitung

Unterschiedlichste Einwirkungen erfordern Untersuchungen zum dynamischen bzw. hochdynamischen Verhalten von Materialien. Zu diesen Einwirkungen zählen beispielsweise Erdbeben, das Rammen von Bohrpfehlen oder der Beschuss von Bauwerken. Alle dynamischen Einwirkungen sind im Gegensatz zu statischen Einwirkungen zeitlich veränderlich. Die Zeitspanne der maximalen Geschwindigkeiten reicht nach Riedel [1] von 5 m/s für einen Schlag mit einem Presslufthammer bis zu 10000 m/s für einen Meteoriteneinschlag. Die Geschwindigkeit beim Beschuss von Bauteilen liegt in der Regel zwischen 100 m/s und 1000 m/s. Dabei handelt es sich um lokale, punktförmige Belastungen, bei denen neben der Geschwindigkeit auch die Geometrie des Projektils eine Rolle für das Eindringen in Bauteile spielt. Nach Zukas [2] wird die kinetische Energie des Projektils genutzt, um in das Zielobjekt einzudringen bzw. es zu durchdringen (Perforation). Diese punktuelle Belastung unterscheidet sich deutlich von Sprengstoffeinwirkungen, die chemisch gebundene Energie nutzen und dabei auf einen größeren Bereich einwirken.

Zum Einfluss der Probekörpergröße, die notwendig ist, um Laborergebnisse sicher auf die Belastung realer Bauteile übertragen zu können, liegen nur wenige Informationen vor. Wie groß ein Probekörper sein muss, hängt nicht zuletzt von der Einwirkung bzw. vom Projektil ab. Frew et al. [3] untersuchten Probekörper mit runder Grundfläche aus Beton mit einer Druckfestigkeit von 23 N/mm² mit drei verschiedenen Durchmessern (1,83 m, 1,37 m und 0,91 m) im Hinblick auf ihren Widerstand gegen ein 13 kg schweres Projektil mit einem Durchmesser von 76,2 mm. Die Verhältnisse von Zielobjektdurchmesser zu Projektildurchmesser lagen folglich zwischen 1 : 24 und 1 : 12. Für die gewählten Geschwindigkeiten zwischen 160 m/s und 340 m/s konnten keine signifikanten Unterschiede in der Eindringtiefe der verschiedenen Probekörper festgestellt werden. Die Bruchbilder zeigen allerdings, dass selbst bei den größten Probekörper dieser Untersuchung eine große Anzahl an Rissen über den eigentlichen Ausbruchkrater hinaus bis zum Probekörpertrand verliefen. Eine nähere Auswertung der Rissbildung erfolgte nicht.

Nach Bludau et al. [4] hängt die zum Vermeiden einer Perforation erforderliche Mindestdicke der Probekörper entscheidend von der verwendeten Gesteinskörnung ab. In ihrer Arbeit werden hochfeste Stahlfaserbetone mit Gesteinskörnungen aus Kalk, Quarz oder Basalt beschossen. Die Auftreffgeschwindigkeit der Dragunov-Hartkerngeschosse wird in einem „worst-case“ Szenario mit ca. 890 m/s festgelegt. Unabhängig vom Gestein erfolgt bei einer Probekörperdicke bis 5 cm immer eine Perforation; bei Plattendicken von 10 cm wird eine Perforation in allen Fällen verhindert. Der Versuchsaufbau von Bludau et al. wird auch von Kustermann et al. verwendet [5]. Sie stellen fest, dass für Normalbeton mit einer Gesteinskörnung aus Kalk eine Plattendicke von 10 cm nicht ausreichend ist. Das Projektil perforiert den Probekörper erst ab einer Dicke von 15 cm nicht mehr. Trotzdem können bei dieser Plattendicke noch Abplatzungen auf der Rückseite infolge der Druck- bzw. reflektierten Zugwelle entstehen.

In dieser Arbeit sollen verschiedene Probekörpergeometrien verglichen werden, um eine geeignete Probekörpergröße für Perforationsversuche mit Projektilen (7,62 x 51 mm) zu finden. Im Weiteren sollen die aus dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse für detaillierte Untersuchungen unterschiedlicher Betone hinsichtlich ihres Verhaltens unter Projektilperforation genutzt werden, um mit möglichst kleinen Proben zu repräsentativen Ergebnissen gelangen zu können.

2 Probekörper und Material

Die Untersuchung zum Einfluss der Probekörpergröße wurde an Probekörpern aus Normalbeton (C35/45) durchgeführt. Es wurden drei verschiedene Geometrien mit jeweils zehn Probekörpern geprüft: 20 x 20 x 8 cm, 30 x 30 x 5 cm und 40 x 40 x 5 cm. Zusätzlich wurden Begleitkörper zur Bestimmung der Festbetonkennwerte hergestellt.

Der Betonentwurf sah einen Portlandzement CEM I 42,5 R vor. Der w/z-Wert wurde zu 0,6 gesetzt und der Größtkorndurchmesser des verwendeten Münchner Moränenkalks betrug 16 mm. Nach der Herstellung wurden die Probekörper bis zur Prüfung nach DIN EN 12390-2 [6] im Wasser gelagert. Die Mischungszusammensetzung ist in Tabelle 1 wiedergegeben.

Tabelle 1: Mischungszusammensetzung für 1m³ Beton

	Festbetonrohddichte [kg/dm ³]	Masse [kg/m ³]
Zement CEM I 42,5 R	3,10	310
Sand 0/4 Münchner Moränenkalk	2,68	847
Kies 4/8 Münchner Moränenkalk	2,72	364
Kies 8/16 Münchner Moränenkalk	2,73	680
Münchner Leitungswasser	1,00	185

Die Prüfung erfolgte 28 Tage nach der Herstellung. Die Begleitkörper zur Prüfung der Festbetonkennwerte wiesen dabei die in Tabelle 2 dargestellten Mittelwerte auf. Die Probenvorbereitung and die Prüfung erfolgten nach DIN EN 12390-2 [6] und DIN 1048 [7].

Tabelle 2: Festbetonkennwerte nach 28 d

Festbetonrohddichte [kg/dm ³]	Druckfestigkeit [N/mm ²]	dynamischer E-Modul [GPa]	statischer E-Modul [GPa]
2,480	49,1	58,0	34,0

3 Untersuchungen

3.1 Beschussuntersuchung

Die Untersuchungen wurden im Beschusskanal des Labors „Ballistik, Waffen und Munition“ der Universität der Bundeswehr München durchgeführt. Für diese Arbeit wird ein Messwaffensystem der Firma Mauser mit einem Messlauf von W. & O. Dittmann verwendet. Der Messlauf ist eine Spezialanfertigung mit einer Länge von 550 mm. Das modifizierte Verschlussystem besteht aus einem Verschluss Karabiner 98.

Zwischen dem Messlauf und dem Probekörper (Abstand zueinander 8,1 m) befinden sich Lichtschranken, die die Mündungsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Projektils vor dem Auftreffen auf den Probekörper messen (siehe Abbildung 1). Die Lichtschranken und das Messwaffensystem sind mit unterschiedlichen Retardern verbunden, die Signale verzögert weitergeben können. Die Retarder sind außerdem an die Fototechnik angeschlossen, die aus zwei Kurzzeitblitzgeräten und einer Spiegelreflexkamera bestehen. Die Retarder haben die Aufgabe, die Auslösung der Fototechnik mit der Beschusstechnik abzustimmen.

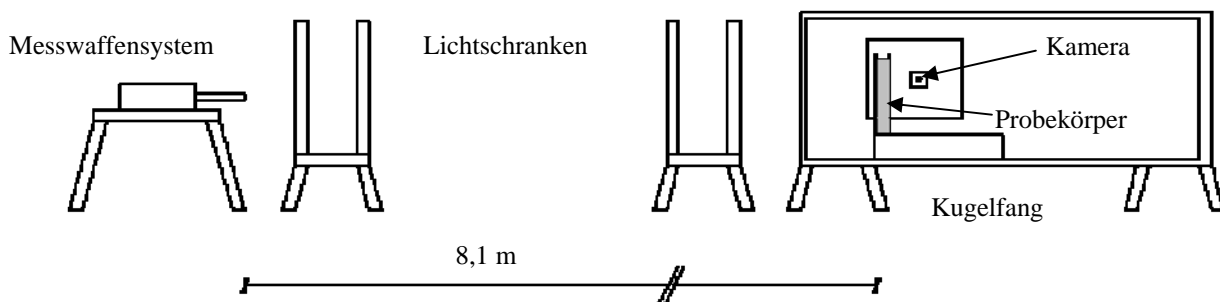


Abbildung 1: Schematischer, nicht maßstäblicher Aufbau des Beschusskanals (Seitenansicht)

Die Probekörper sind in einem Stahlrahmen eingespannt, der an einem Kugelfang fest verspannt wird. Der Kugelfang ist ein etwa 71 x 71 x 200 cm großer Stahlkasten (Stahldicke: 8 mm), der auf der einen Seite als Schutz dient, da die Projektil in ihm gefangen werden; andererseits kann er genutzt werden, um den Großteil der beim Durchschuss entstehenden Fragmente sicher zu stellen. An seiner Vorderseite befindet sich eine etwa kreisrunde, im Durchmesser 15 cm große Öffnung, durch die das Projektil eintritt. Seitlich am Kugelfang steht eine digitale Spiegelreflexkamera hinter einem 20 x 20 cm großen „Fenster“. Hierbei handelt es sich um eine Canon 450 D mit einer Brennweite von 24-70 mm und einer Blende F 5,6.

Nach dem Auslösen des Schusses am Abfeuergerät wird das Signal um 200 ms verzögert an die Messwaffe weitergegeben. Gleichzeitig erfolgt eine sofortige Signalweitergabe an die Kamera, die 200 ms später auslöst. Der Schuss wird aus

der Messwaffe gelöst und das Projektil durchquert die erste Lichtschranke, die ein Signal an einen PC weitergibt. Nach dem Durchqueren der zweiten Lichtschranke wird ein weiteres Signal mit einer Verzögerung von 1,4 ms über den Retarder geleitet, so dass der erste Kurzzeitblitz ausgelöst wird. Mit einer Verzögerung von 0,1 ms wird dann über einen zweiten Retarder ein Signal an den zweiten Kurzzeitblitz geschickt. Dieser löst aus, so dass eine Doppelbelichtung in einem von der Kamera gemachten Foto entsteht, siehe Abbildung 2. Durch die Verzögerungen hat das Projektil den Probekörper bereits durchschlagen und ist auf dem Foto zweimal zu erkennen. Über die Verzögerungszeit zwischen den beiden Blitzen und die in diesem Zeitintervall zurückgelegte Strecke kann die Austrittsgeschwindigkeit und mit Hilfe der bekannten Projektilmasse auch die Austrittsenergie bestimmt werden kann. Die für die weitere Betrachtungen interessierende Energiedifferenz entspricht der vom Probekörper absorbierten Energie und ergibt sich aus Auftreff- und Austrittsgeschwindigkeit des Projektils.

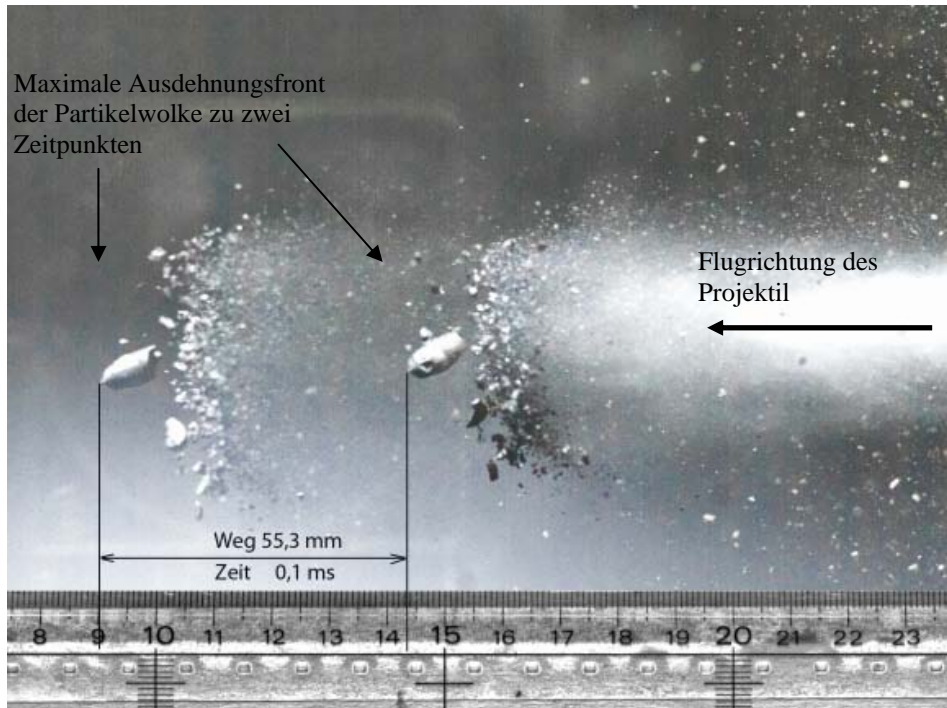


Abbildung 2: Doppelt belichtetes Foto mit Lineal zur Vermessung des zurückgelegten Weges des Projektils

Nach dem Beschuss werden die Fragmente im Kugelfang und in einem Umkreis von 3 m um den Kugelfang herum mit einem handelsüblichen Sauger eingesammelt. Dadurch sollen möglichst alle Fragmente aufgenommen werden. Die Ermittlung der Massen und Abmessungen sowie die bildliche Dokumentation erfolgt jeweils zeitnah vor Ort.

3.2 Bruchflächenanalyse

Die entstandenen Gesamtbruchflächen als Schädigungsparameter wurden mit unterschiedlichen Verfahren analysiert:

- Modellierung der Fragmente mit Hilfe eines automatischen Bildauswerteverfahrens,
- 3-dimensionale Laservermessung für die Krater sowie
- Fotografieren und Nachzeichnen der großen Bruchstücke in AutoCAD.

Die Bestimmung der Gesamtbruchfläche eines Probekörpers unterscheidet sich je nach Zustand der beschossenen Probe in zwei Fälle: Im ersten Fall bleiben die Probekörper als vollständige Platten erhalten, im zweiten zerfallen die Probekörper in mehrere große Bruchstücke. In beiden Fällen wurden die Fragmente in einem ersten Untersuchungsschritt mit dem automatischen Bildauswerteverfahren CPA (Camera Particle Analyser) klassifiziert. Dazu wurden sie ihrer Größe nach in Klassen der Siebreihe R20/3 der DIN ISO 565 [8] einsortiert. Der genutzte Größenparameter war der Feretdurchmesser. Der Feretdurchmesser entspricht dem maximalen Abstand zwischen der Begrenzung des Fragments senkrecht zur Messrichtung [9]. Er entspricht damit der Siebweite bei einer herkömmlichen Siebanalyse. Die Versuchsdurchführung sah wie folgt aus:

Die Fragmente wurden in den Trichter gefüllt und fielen anschließend auf eine Vibrationsrinne. Sie wurden auf der Rinne durch Vibration vorwärts bewegt und fielen zwischen eine digitale Zeilenkamera und ein Gegenlicht. Ihre Schattenprojektion wurde genutzt, um die Fragmentgröße zu bestimmen. Die Geschwindigkeit der Vibrationsrinne wurde automatisch durch die Software unter Berücksichtigung der Messwerte angepasst. Der Aufbau des CPA ist in Abbildung 3 gezeigt. Im Anschluss wurden die Fragmente zu Kugeln mit dem Feretdurchmesser als Kugeldurchmesser idealisiert, um ihre Oberfläche zu bestimmen.

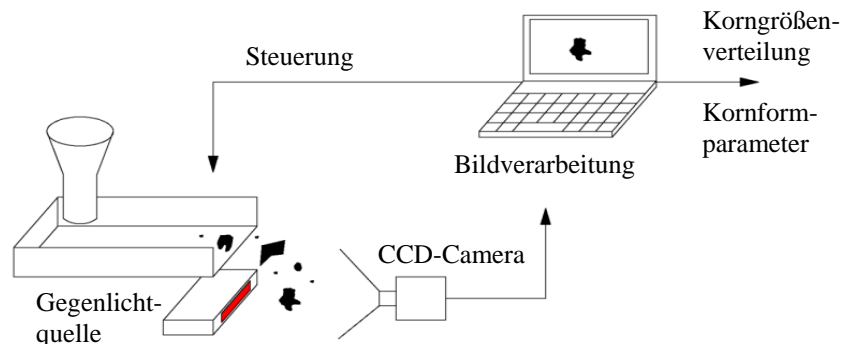


Abbildung 3: Versuchsaufbau CPA

Die Erfassung der Gesamtbruchfläche der vollständigen Platten erfolgte im nächsten Untersuchungsschritt über die Vermessung der Krater mit dem Laserscanner. Die Funktionsweise des eingesetzten Laserscanners David 3D basiert auf der Lasertriangulation [10]. Der Aufbau des Laserscannersystems ist in Abbildung 4 (links) dargestellt. Vor dem Scannen wurde die Software mit Hilfe des Kalibrierungsmusters auf die Umgebung eingestellt. Dadurch wurden die Lage und Ausrichtung der Kamera und ihre inneren Parameter (Brennweite, Linsenverzerrungen) bestimmt [11]. Der Probekörper wurde anschließend mittig zwischen den beiden Ebenen angeordnet. Die Entfernung der Probekörper zur Kamera betrug etwa 2,5 m. Der Linienlaser stand in einem Winkel von etwa 30° zur Kamera. Er tastete die Bruchfläche mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ab. Dies konnte durch den Einbau des Lasers in eine motorisierte, vertikale Zahnradlinearführung (Aufzug) erreicht werden, die den Laser mit konstanter Geschwindigkeit auf und ab bewegte. Auf die gescannten Rohdaten wurde innerhalb der Software ein Filter gelegt, der die erzielten Daten glättet und zwischen gemessenen Werten weitere Werte interpoliert. Diese Maßnahme war notwendig, um das Punktrauschen zu minimieren. Unter dem Punktrauschen wird die Abweichung der einzelnen Punkte von einer aus allen Punkten berechneten idealen Fläche (hier: ca. 0,03 mm) verstanden. Die Filtereigenschaften wurden, wie vom Hersteller empfohlen, auf 4 (Interpolation), 2 (Average-Glättung) und 0 (Median-Glättung) gesetzt. Daraus ergab sich ein Abstand benachbarter Punkte von ca. 0,45 mm. Die dreidimensionalen Koordinaten der gescannten Punkte wurden im ASCII-Format „obj“ gespeichert und in ein in Matlab[®] geschriebenes Programm eingelesen, um die Koordinaten in ein Dreiecksnetz zu vermaschen. Aus diesem konnte die Oberfläche der Krater bestimmt werden. Eine ausreichende Leistungsfähigkeit des Laserscanners wurde in einem Vergleich mit einem hochwertigen Industrielaserscanner in [12] nachgewiesen.

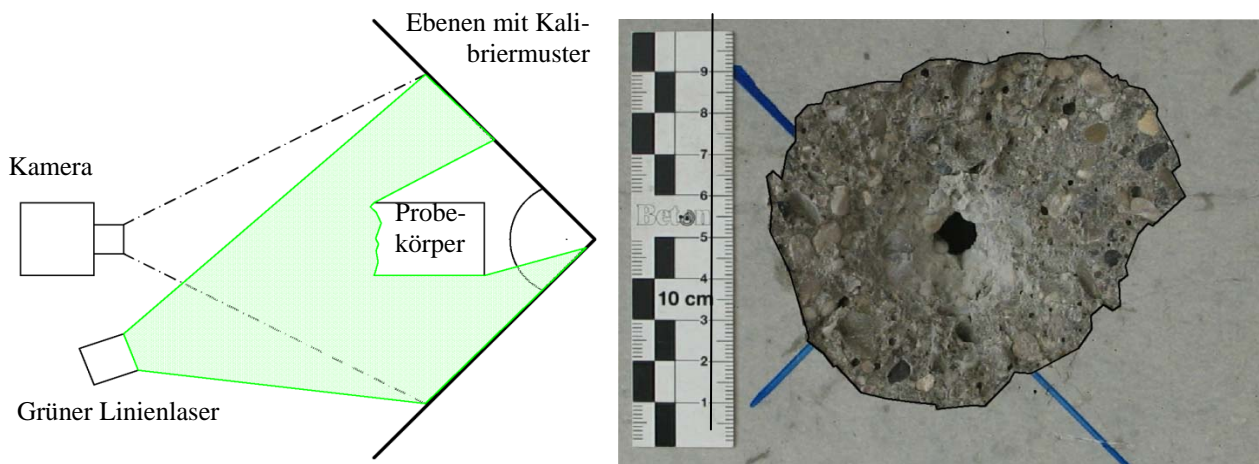


Abbildung 4: links: Versuchsaufbau Laserscannersystem David 3D (Draufsicht), rechts: Foto eines Kraters mit Polygonzug und Maßstab

Im letzten Untersuchungsschritt wurden die Originaloberflächen des Kraterbereichs mit Hilfe von Fotografien des Kraters ermittelt. Die Fotografien wurden in AutoCAD[®] eingelesen und der Kraterbereich mit einem Polygonzug umgeben. Die Fläche innerhalb des Polygons entspricht der Originaloberfläche, siehe Abbildung 4 (rechts). Die Gesamtbruchfläche eines Probekörpers ergibt sich folglich aus der Summe der Krater- und der Fragmentoberflächen abzüglich der Originaloberfläche des Probekörpers im Bereich der Krater.

Im zweiten Fall zerfielen die Probekörper in mehrere große Bruchstücke, so dass ein Krater nicht vermessen werden konnte. Nach der oben beschriebenen Fragmentuntersuchung wurden bei diesen Proben die Bruchstücke von sechs Seiten zusammen mit einem Maßstab fotografiert und die Fotografien in AutoCAD[®] importiert. Nach Anpassung des fotografierten Maßstabs an den Maßstab des Programms wurden die Bruchstückränder mit einem Polygonzug umgeben und der Flächeninhalt bestimmt. Die Summe dieser sechs Teilflächen und der Fragmentoberflächen abzüglich der ge-

samten Originaloberfläche der Probekörper vor dem Beschuss ergab die Gesamtbruchfläche dieser zerfallenen Probekörper.

4 Ergebnisse

Die Massenermittlung vor und nach dem Beschuss ergab einen Massenunterschied von unter 0,6 % in allen Testreihen. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass nahezu alle Fragmente nach dem Beschuss erfasst wurden.

Die mittleren Auftreffgeschwindigkeiten der drei Testreihen lagen zwischen 876 und 879 m/s. Dabei wurden Einzelwerte von minimal 869 m/s bis maximal 885 m/s gemessen, so dass sich kinetische Energien des Projektils zwischen 3662 J und 3722 J ergaben. Die Auftreffgeschwindigkeit und -energie kann folglich als konstant gelten.

Alle Probekörper wurden trotz der unterschiedlichen Probendicken (5 cm und 8 cm) perforiert. Beim Austritt des Projektils wurden zwischen den einzelnen Testreihen dennoch Unterschiede sichtbar: In der Testreihe der kleinsten Probekörper (20 x 20 x 8 cm) wurden die geringsten Austrittsgeschwindigkeiten bzw. -energien gemessen. Im Mittel lag die Austrittsenergie bei 1342 J (Var = 20 %). Die größte Austrittsenergie wurden für die größten Probekörper (40 x 40 x 5 cm) ermittelt: 2355 J (Var = 5,7 %). Die mittlere Austrittsenergie der Probekörper mit den Abmessungen 30 x 30 x 5 cm wurde zu 2105 J (Var = 10,8 %) bestimmt. Der Unterschied der Austrittsenergie zwischen den gleichdicken Probekörpern ist gering.

Alle Probekörper der kleinsten Abmessungen (20 x 20 x 8 cm) zerfielen in mehrere große Bruchstücke, während die größeren Probekörper als vollständige Platten erhalten blieben, siehe Abbildung 5.

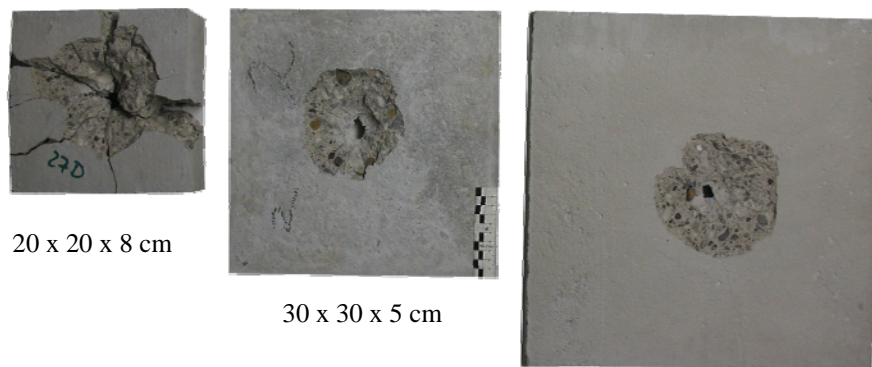


Abbildung 5: Exemplarische Aufnahmen von Probekörpern der untersuchten Abmessungen

Die Bruchstücke der kleinen Probekörper besaßen im Mittel eine Oberfläche von 2061 cm². Die zusätzlich entstandenen Fragmente wiesen eine Oberfläche von 11857 cm² auf. Die ursprüngliche Oberfläche der Probekörper betrug 1477 cm², so dass die Gesamtbruchfläche 12441 cm² (Var = 27 %) groß war. Dabei entstanden im Mittel 4,54 Millionen Fragmente unterschiedlichster Größe. Die Probekörper mit den Abmessungen 30 x 30 x 5 cm hatten an der Eintrittsseite durchschnittlich 68 cm² große Krater und an der Austrittsseite 146 cm² große Krater. Die Originaloberfläche im Bereich der Krater betrug in Summe 193 cm². Hier fanden sich im Mittel 4,18 Millionen Fragmente mit einer Oberfläche von 7816 cm². In Summe ergab sich für diese Probekörper eine Gesamtbruchfläche von 7837 cm² (Var = 8,8 %). Die größten Probekörper (40 x 40 x 5 cm) wiesen durchschnittlich auf der Eintrittsseite 73 cm² große Krater und an der Austrittsseite 123 cm² große Krater auf bei einer summierten Originaloberfläche beider Seiten von 178 cm². Hier fanden sich 4,20 Millionen Fragmente nach dem Beschuss wieder. Diese hatten eine Oberfläche von 7829 cm², so dass sich eine Gesamtbruchfläche von 7848 cm² (Var = 11,1 %) einstellte. Abbildung 6 zeigt die Ergebnisse der Bruchflächenuntersuchung.

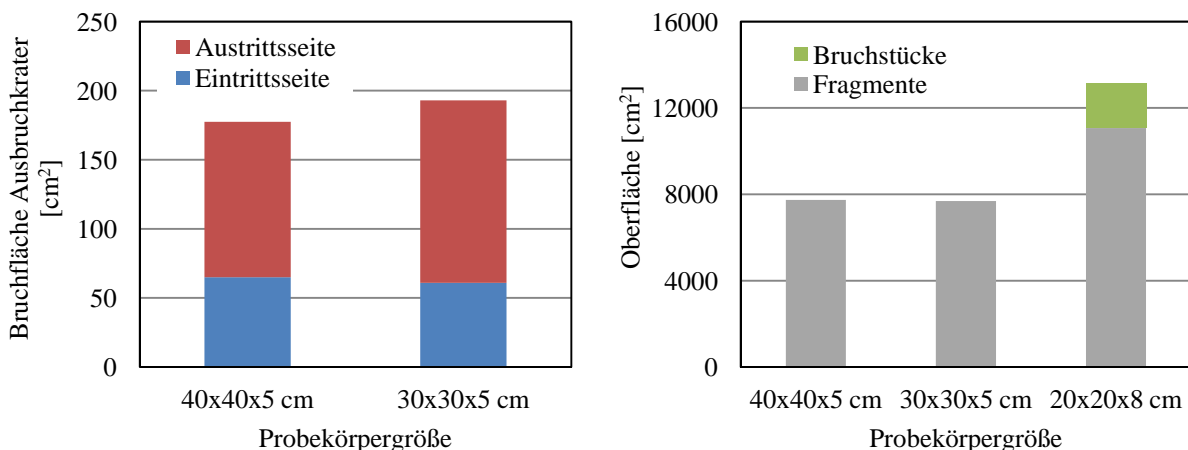


Abbildung 6: Ergebnisse der Bruchflächenuntersuchung

5 Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen die Erwartungen, dass die Austrittsenergie des Projektils durch eine größere Probendicke verkleinert werden kann. Bei gleichdicken Probekörpern, kann ab einer Grundfläche von 30 x 30 cm kein bedeutsamer Unterschied der Austrittsenergie des Projektils im Vergleich zu größeren Probekörpern gleicher Dicke festgestellt werden.

Die Schädigung, beschrieben durch die Gesamtbruchfläche, ist bei den beiden größeren Probekörpern nahezu identisch. Die Größe der Ausbruchkrater an der Eintritts- und Austrittsseite sowie die Anzahl und Verteilung der Fragmente ist bei beiden Testreihen sehr ähnlich. Es kann folglich darauf geschlossen werden, dass eine Probengröße von 30 x 30 cm ausreichend ist, um Ergebnisse zu erzielen, die sich auf das Verhalten in größeren Bauteilen unter dieser Belastung übertragen lassen.

Hingegen zerfallen kleinere Platten in Bruchstücke, so dass hier von einer zusätzlichen Beeinflussung zum Beispiel durch die Lagerung des Probekörperandes ausgegangen werden muss. Durch den geringeren Abstand vom Einschlagort zum Rand bei kleineren Probekörpern zerbrechen die Proben. Durch diese Prüferfekte werden die Ergebnisse der lokalen Belastung „Beschuss“ überlagert und können nicht für eine Verallgemeinerung herangezogen werden.

6 Schlussfolgerung

Diese Studie zeigte, dass die Probekörpergröße sowohl die Ausprägung der Schädigung als auch die Austrittsenergie des Projektils beeinflussen kann, wenn bei zu geringen Abmessungen Randeffekte eine Rolle spielen. Ab einer Größe der Grundfläche von 30 x 30 cm wurde keine Auswirkung der Probekörperabmessung mehr festgestellt. Daher genügen für weitere Perforationstests mit Hartkerngeschossen (7,62 x 51 mm) Betonprobekörper mit den Abmessungen 30 x 30 x 5 cm, was die Handhabung gegenüber größeren Platten erleichtert.

7 Literatur

- [1] Riedel, W.: Beton unter dynamischen Lasten. EMI-Verlag. Freiburg, Deutschland, 2000.
- [2] Zukas, J.A. (ed.): High velocity impact dynamics. Wiley. New York, USA, 1990.
- [3] Frew, D. et al.: The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. Int. J. Imp. Eng. 32, 10 (2006) p. 1584-1594.
- [4] Bludau, C. et al.: Schutzplatten aus hochfestem Beton. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Neubiberg, 2006.
- [5] Kustermann A. et al.: Hochfeste Bindemittel und Zuschlagstoffe für hochfeste Betone unterschiedlicher Güte für Schutzanlagen der militärischen Sonderinfrastruktur. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau, Neubiberg, 2005.
- [6] DIN EN 12390-2: Prüfung von Festbeton. Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern. 2009.
- [7] DIN 1048: Prüfverfahren für Beton. 1991.
- [8] DIN ISO 565: Analysensiebe - Metalldrahtgewebe, Lochplatten und elektrogeformte Siebfolien - Nennöffnungsweiten. 1998
- [9] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. 3.Auflage, Springer Verlag, Berlin, 2009.
- [10] Winkelbach, S. et al.: Low-Cost Laser Range Scanner and Fast Surface Registration Approach. In: Pattern recognition. Franke, K. et al. (ed.), Springer Verlag, Berlin, 2006
- [11] homepage: www.David-laserscanner.com, zuletzt abgerufen am 30.07.2012
- [12] Werner, S. et al.: A fractal-based approach for the determination of concrete surfaces using laser scanning techniques: a comparison of two different measuring systems. Mater. & Struct. (2012), DOI: 10.1617/s11527-012-9898-y.