

Institut für Werkstoffe des Bauwesens
Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften

Beurteilung von Einflüssen auf den Beschusswiderstand von Beton mittels bruchmechanischer und oberflächen- charakteristischer Parameter

Steve Werner

Herausgeber:

Institut für Werkstoffe des Bauwesens

Universität der Bundeswehr München

Werner-Heisenberg-Weg 39

85579 Neubiberg

Telefon: 089/6004-2511

Fax: 089/6004-3895

Sekretariat.bauv3@unibw.de

www.unibw.de/baustoffe

ISSN 1436-4409

Kurzfassung

Beton unter dynamischer Belastung verhält sich anders als unter bekannter statischer Belastung. Diese Arbeit beschäftigt sich mit Einflüssen auf das Verhalten von Beton unter lokaler, dynamischer Belastung durch ein Projektil. Zu den untersuchten Betoneinflüssen zählen: das Alter, die Lagerungsbedingungen, die Prüfgeschwindigkeit, der w/z-Wert und der Größtkorndurchmesser. Es wurden bruchmechanische und oberflächenanalytische Parameter herangezogen, um eine energetische Bilanz zwischen Eintritts- und Austrittsenergie des Projektils einerseits und Bruchenergie des Zielobjekts andererseits zu erstellen. Die Eintritts- und Austrittsenergie des Projektils wurde aus der jeweiligen Geschwindigkeit abgeleitet. Diese konnte mittels Lichtschranken beim Projektileintritt und doppelt-belichteten Fotos beim Projektilaustritt ermittelt werden. Aus der spezifischen Bruchenergie und der Bruchfläche wurde die Bruchenergie bestimmt, die für die Schädigung des Zielobjekts verantwortlich war. Mit Hilfe von neu entwickelten Verfahren konnte dabei die gesamte Bruchfläche einschließlich der Fragmentoberfläche in der Bruchenergie berücksichtigt werden. Die Änderung der einzelnen Energieformen wurde in Abhängigkeit von den untersuchten Einflüssen dargestellt. Dabei zeigte sich, dass insbesondere der Größtkorndurchmesser und die Prüfgeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung für die Größe der einzelnen Energieformen und damit auch für den Beschusswiderstand sind.

Abstract

The behavior of concrete under dynamic loading is different compared to the behavior under well-known static loading. This study deals with influences of the behavior of concrete under local, dynamic loading of a projectile. The concrete influences determined are: age of concrete, storage conditions, loading rate, w/c-ratio and maximum aggregate diameter. Fracture mechanical parameters and surface analytical parameters were used to generate an energetic balance between, on the one hand, striking and output energy of the projectile and, on the other hand, fracture energy of the target specimen. The energies of the projectile were derived from the velocities. The velocities were measured with photo-optical barriers before striking the specimen and with double-exposed pictures after perforating the specimen. The specific fracture energy and the fracture area were used to calculate the fracture energy, which takes responsibility for the damage of the specimen. By means of new developed methods the whole fracture area including the fragments surface area was considered to calculate the fracture energy. The effects on the single forms of energy are shown as functions of the influences investigated. It can be seen that especially, the maximum aggregate diameter and the loading rate are decisive for the size of the forms of energy and therefore, for the resistance against projectile fire, too.

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften der Universität der Bundeswehr München zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.) genehmigten Dissertation

Thema der Dissertation: *„Beurteilung von Einflüssen auf den Beschusswiderstand von Beton mittels bruchmechanischer und oberflächencharakteristischer Parameter“*

Verfasser: Steve Werner

Promotionsausschuss:

Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr. rer. nat. habil. Thomas Apel
1.Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Karl-Christian Thienel
2.Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Viktor Mechtcherine
3.Berichterstatter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manfred Keuser

Eingereicht am: 09. Mai 2012

Tag der Prüfung am: 24. August 2012

Neubiberg, den 22. Oktober 2012

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Problemstellung und Ziel	1
1.2	Gliederung	2
2	Stand der Forschung	4
2.1	Grundlagen der Bruchmechanik	4
2.1.1	Einführung	4
2.1.2	Linear-Elastische Bruchmechanik	5
2.1.3	Fließbruchmechanik	6
2.1.4	Nicht-lineare Bruchmechanik	7
2.1.5	Dynamische Bruchmechanik	10
2.1.6	Einflüsse auf bruchmechanische Kennwerte des Betons	14
2.1.7	Zusammenfassung und Anwendung in dieser Arbeit	20
2.2	Betonverhalten unter lokaler, dynamischer Einwirkung	21
2.2.1	Einführung	21
2.2.2	Modelle zur Beschreibung von Beschussbelastungen	22
2.2.3	Einflüsse auf ballistische Kennwerte des Betons	27
2.2.4	Zusammenfassung und Anwendung in dieser Arbeit	31
2.3	Beschreibung von Bruchflächen und Partikeln	32
2.3.1	Einführung	32
2.3.2	Oberflächenkennwerte	34
2.3.3	Partikelkennwerte	38
2.3.4	Zusammenfassung und Anwendung in dieser Arbeit	40
2.4	Offene Fragen	41
3	Angewandte Untersuchungen und Methoden	43
3.1	Versuchsprogramm	43
3.2	Bruchmechanische Untersuchung	43
3.2.1	Einführung	43
3.2.2	Probekörper	43
3.2.3	Aufbau und Durchführung	44

3.3	Ballistische Untersuchung	45
3.3.1	Einführung	45
3.3.2	Probekörper und Munition	45
3.3.3	Aufbau und Durchführung	46
3.3.4	Ermittlung der Bruchenergie	48
3.4	Oberflächenuntersuchung	50
3.4.1	Einführung	50
3.4.2	Methoden der Meso-Mikro Ebene	51
3.4.3	Methoden der Makro-Meso Ebene	52
3.4.4	Berechnung der Bruchflächen und Oberflächenkennwerte	57
4	Untersuchungsprogramm und Ergebnisse	67
4.1	Einführung	67
4.2	Untersuchungsprogramm	67
4.2.1	Untersuchte Einflussgrößen	67
4.2.2	Betonzusammensetzungen und Ausgangsstoffe	69
4.2.3	Betoneigenschaften	70
4.3	Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchung	71
4.3.1	Referenzbeton	71
4.3.2	Einfluss des Betonalters	75
4.3.3	Einfluss der Lagerung	78
4.3.4	Einfluss der Prüfgeschwindigkeit	82
4.3.5	Einfluss des w/z-Werts	87
4.3.6	Einfluss des Größtkorndurchmessers	92
4.3.7	Diskussion der bruchmechanischen Ergebnisse	97
4.3.8	Zusammenfassung der bruchmechanischen Untersuchung	100
4.4	Ergebnisse der ballistischen Untersuchungen	101
4.4.1	Massenermittlung	101
4.4.2	Referenzbeton	102
4.4.3	Einfluss des Betonalters	110
4.4.4	Einfluss der Lagerung	114
4.4.5	Einfluss der Prüfgeschwindigkeit	118

4.4.6	Einfluss des w/z-Werts	123
4.4.7	Einfluss des Größtkorndurchmessers	129
4.4.8	Diskussion der ballistischen Ergebnisse	135
4.4.9	Zusammenfassung der ballistischen Untersuchung	140
5	Energetische Beschreibung des Materialverhaltens	142
5.1	Einführung	142
5.2	Austrittsenergie des Projektils	142
5.2.1	Einführung	142
5.2.2	Einfluss der Eintrittsenergie	143
5.2.3	Einfluss des Alters	144
5.2.4	Einfluss der Lagerung	145
5.2.5	Einfluss des w/z-Werts	145
5.2.6	Einfluss des Größtkorndurchmessers	146
5.2.7	Zusammenfassung	147
5.3	Verformungsenergie des Projektils	147
5.4	Bruchenergie des Zielobjekts	147
5.4.1	Einführung	147
5.4.2	Einfluss der Eintrittsenergie	148
5.4.3	Einfluss des Alters	150
5.4.4	Einfluss der Lagerung	150
5.4.5	Einfluss des w/z-Werts	151
5.4.6	Einfluss des Größtkorndurchmessers	152
5.4.7	Zusammenfassung	153
5.5	Kinetische Energie der Fragmente	153
5.5.1	Einführung	153
5.5.2	Einfluss der Eintrittsenergie	154
5.5.3	Einfluss des Alters	155
5.5.4	Einfluss der Lagerung	155
5.5.5	Einfluss des w/z-Werts	155
5.5.6	Einfluss des Größtkorndurchmessers	156
5.5.7	Zusammenfassung	156

5.6	Zusammenfassung des Materialverhaltens	157
6	Zusammenfassung und Ausblick	158
6.1	Zusammenfassung	158
6.2	Ausblick	165
	Literaturverzeichnis	166
	Anhang	179

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzungen

CPA	Camera Particle Analyzer
FBM	Fließbruchmechanik
LEBM	Linear-Elastische Bruchmechanik
LS	Lichtschanke
NLBM	Nicht-Lineare Bruchmechanik
w/z-Wert	Verhältnis der Wassermasse zur Zementmasse

Große lateinische Buchstaben

A_{2D}	Grundfläche
A_{3D}	Dreidimensional-gemessene Oberfläche
A_c	Luftporengehalt
A_{CPA}	Oberfläche der Partikel, die mit der CPA untersucht wurden
A_{EI}	Oberfläche eines Ellipsoiden
A_{FV}	Oberfläche aus dem fotografischen Verfahren
A_{GB}	Gesamtbruchfläche
A_{lig}	Fläche des Ligaments
A_{Ori}	Originaloberfläche eines Probekörpers vor der Perforation
A_Q	Querschnittsfläche der Balkens
$A_{RS,3D}$	Oberfläche des Ausbruchkraters der Rückseite
$A_{RS,Ori}$	Originaloberfläche der Ausbruchkraterrückseite
A_{SV}	Oberfläche aus dem Scannerverfahren
$A_{VS,3D}$	Oberfläche des Ausbruchkraters der Vorderseite
$A_{VS,Ori}$	Originaloberfläche der Ausbruchkratervorderseite
$CTOD_c$	Kritische Rissspitzenöffnung aus dem Zwei-Parameter Modell
D	Fraktale Dimension
D_{GS}	Fraktale Dimension nach der Grid Scaling Method
F	Kraft
F_{max}	Maximalkraft

E	Elastizitätsmodul
$E_{\text{kin,Fragmente}}$	Kinetische Energie der Fragmente
$E_{\text{kin,Projektil}}$	Kinetische Energie des Projektils
$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$	Kinetische Austrittsenergie des Projektils
$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$	Kinetische Eintrittsenergie des Projektils
$E_{\text{V,T,Fragmente}}$	Verformungs- und Wärmeenergie der Fragmente
$E_{\text{V,T,Projektil}}$	Verformungs- und Wärmeenergie des Projektils
G_{F}	Spezifische Bruchenergie
G_{F0}	Grundwert der Bruchenergie nach CEB FIP MC 1990
$G_{\text{F,3D}}$	Spezifische Bruchenergie unter Berücksichtigung der dreidimensional-gemessenen Bruchfläche
$G_{\text{F,RILEM}}$	Spezifische Bruchenergie unter Berücksichtigung der Querschnittsfläche nach RILEM
G_{Ic}	Kritische Energiefreisetzungsrate im Modus I
G_{P}	Plastische Verformungsenergie
K_{I}	Spannungsintensitätsfaktor im Modus I
K_{Ic}	Kritischer Spannungsintensitätsfaktor im Modus I
$K_{\text{Ic,dyn}}$	Dynamischer, kritischer Spannungsintensitätsfaktor im Modus I
K_{Ic}^{S}	Modifizierter, kritischer Spannungsintensitätsfaktor im Modus I aus dem Zwei-Parameter Modell
N	Anzahl
Q	Sprödigkeitsparameter nach Jenq und Shah
R	Rauheit
R_{min}	Minimale Rauheit (feinste Auflösung des Messsystems)
R_{EW}^2	Bestimmtheitsmaß der Einzelwerte
R_{MW}^2	Bestimmtheitsmaß der Mittelwerte
V_{EI}	Volumen eines Ellipsoiden
W	Bruchenergie
W_0	Arbeit (Fläche unter der Last-Verformungskurve)
Y	Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Geometrie bei der Berechnung des Spannungsintensitätsfaktors

Kleine lateinische Buchstaben

a_r	Halbe Risslänge
b	Halbe Gesamtrisslänge im Dugdale Modell
d	Fiktive, plastische Risslänge im Dugdale Modell
d_A	Ausbreitmaß
d_{GS}	Fraktales Inkrement (Grid Scaling Method)
d_{max}	Größtkorndurchmesser
e_1, e_2, e_3	Halbachsen eines Ellipsoiden
$f_{ct,fl}$	Biegezugfestigkeit aus 3-Punktbiegezugversuch
$f_{ct,sp}$	Spaltzugfestigkeit
f_{cm}	Mittlere Zylinderdruckfestigkeit
f_{cm0}	Grundwert der Druckfestigkeit (=10 MPa) nach CEB FIP MC 1990
f_t	Zentrische Zugfestigkeit
g	Erdbeschleunigung (hier: $9,81 \text{ m/s}^2$)
K_{dyn}	Korrekturfaktor der dynamischen Bruchenergie
$K_{dyn,kor}$	Korrekturfaktor der Projektilgeschwindigkeit
l	Länge; Rasterweite
l_{ch}	Charakteristische Länge in der Bruchmechanik
l_{crit}	Kritische Länge bei der Probekörperkerbung
l_{Fer}	Länge eines Partikels senkrecht zum minimalen Feretdurchmesser
l_{min}	Minimaler Abstand zweier benachbarter Punkte einer Punktwolke
m	Masse eines Probekörpers
m_{CPA}	Masse der Partikel, die mit der CPA untersucht wurden
m_{Fr}	Masse der Partikel und Bruchstücke nach der Perforation
m_n	Gesamtmasse des Probekörpers nach der Perforation
m_{PI}	Masse des Probekörpers (Platte) nach der Perforation
$m_{Projekttil}$	Masse des Projektils
m_{SV}	Masse der Bruchstücke im Scannerverfahren
m_v	Masse des Probekörpers vor der Perforation
s	Skalierungsfaktor
v_{aus}	Austrittsgeschwindigkeit des Projektils nach der Perforation

v_{Fr}	Geschwindigkeit der Fragmente
$v_{Projektil}$	Geschwindigkeit des Projektils
v_z	Geschwindigkeit des Projektils vor dem Auftreffen auf den Probekörper
$w_{\delta,0}$	Rissöffnung an der Stelle der maximalen Durchbiegung
$w_{F,max}$	Rissöffnung an der Stelle der maximalen Kraft
$x_{min,Fer}$	Minimaler Feretdurchmesser eines Partikels

Griechische Buchstaben

γ	Spezifische Oberflächenenergie
δ	Durchbiegung
δ_0	Maximale Durchbiegung
ΔE	Differenz der kinetischen Energie des Geschosses vor und nach der Perforation
ε	Dehnung
σ	Spannung
σ_c	Kritische Spannung
σ_{fiktiv}	Fiktive Spannung im Dugdale Modell
σ_{Ic}	Kritische Spannung im Modus I
ψ_c	Gemessene Zirkularität (Kehrwert ist die Sphärizität)
ψ_{Eli}	Zirkularität der Ellipse

1 Einleitung

1.1 Problemstellung und Ziel

Das Bedürfnis des Menschen nach Sicherheit ist so alt wie die Menschheit selbst. Sicherheit findet sich in allen Bereichen der Natur und Gesellschaft. Im Bauwesen wird die Sicherheit von Bauwerken durch unterschiedliche Maßnahmen gewährleistet. Beispielsweise können bei der Bemessung von Bauteilen je nach Belastungsfall und Eintrittswahrscheinlichkeit unterschiedliche Sicherheitsbeiwerte berücksichtigt werden. Die Eintrittswahrscheinlichkeit extremer Belastungen wie Beschuss oder Detonationen ist sehr gering. Dennoch rückt die Wahrnehmung dieser Belastungen durch die tagtägliche Berichterstattung der Medien vermehrt auch in den Fokus der Wissenschaft.

Der Belastungsfall Beschuss wird zu den dynamischen Belastungen gezählt. Gegenüber dem bekannten Verhalten im statischen Belastungsfall ändert sich das Verhalten eines Materials bzw. einer Konstruktion durch dynamische Belastungen deutlich. Dadurch können statisch ermittelte Materialparameter und -modelle zur Bemessung und Beurteilung von Konstruktionen nur bedingt genutzt werden. Bisherige Materialmodelle, die die Belastung Beschuss beinhalten, berücksichtigen auf der Einwirkungsseite verschiedene Parameter wie Projektilgeschwindigkeit, -form oder -masse. Dagegen wird als einzige Eigenschaft des Zielmaterials meist nur die Druckfestigkeit einbezogen. Für Beton gilt bisher, dass mit zunehmender Druckfestigkeit auch der Widerstand gegenüber einem Projektil wächst. Folglich befasst sich die Forschung schwerpunktmäßig mit der Untersuchung von Sonderbetonen, die eine hohe Festigkeit aufweisen. Normalbetone spielen in diesem Forschungsbereich eine untergeordnete Rolle.

Eigenschaften wie die Druckfestigkeit können in Beton durch seine heterogene Zusammensetzung und den kontinuierlichen Abbindeprozess des Zements auf sehr unterschiedliche Art und Weise geändert oder belassen werden. Es stellt sich folglich die Frage, ob die Druckfestigkeit allein geeignet ist, den Baustoff Beton unter Beschuss ausreichend detailliert abzubilden. Während Beton im statischen Belastungsfall als gut erforscht gilt, fehlen bisher Zusammenhänge zwischen der Einwirkung

durch das Auftreffen eines Projektils und Eigenschaften bzw. Einflüssen des Betons im dynamischen Belastungsfall Beschuss.

Ziel dieser Arbeit ist es, durch die Untersuchung von Normalbeton unter Beschuss eine Grundlage für ein ausführliches Materialverständnis zu schaffen. Unterschiedliche Betonzusammensetzungen und bekannte äußere Einflüsse auf das Betonverhalten sollen in Zusammenhang mit der Einwirkung durch das Projektil gebracht werden. Das Projektil soll dabei den Probekörper perforieren. Diese Arbeit kann dabei auf vorherige Forschungsarbeiten des Instituts für Werkstoffe des Bauwesens zurückgreifen.

Um das skizzierte Ziel zu erreichen, soll eine gesamtenergetische Betrachtung des Beschussvorgangs erfolgen. In Folge dessen wird sowohl die Austrittsenergie des Projektils, als auch die Bruchenergie des Zielobjekts betrachtet werden. Dafür werden bruchmechanische und oberflächenanalytische Grundlagen und Methoden notwendig.

1.2 Gliederung

Diese Arbeit gliedert sich in vier Teile: Stand der Forschung, Untersuchungsmethoden, Ergebnisse und Zusammenhänge zwischen Energieformen und Betoneinflüssen.

Im Anschluss an die Einleitung wird im ersten Teil der Arbeit in Kapitel 2 der aktuelle Stand der Forschung in drei Abschnitten präsentiert. Dabei werden die Grundlagen zur Bruchmechanik, Ballistik und zur Oberflächenbestimmung jeweils im Bezug auf die eigene Untersuchung dargestellt.

Im Kapitel 3 werden die genutzten und zum Teil in dieser Arbeit neu entwickelten Untersuchungsverfahren vorgestellt. Dabei wird im Besonderen auf die teilweise diffizile Ermittlung der Bruchflächen eingegangen. In diesem Teil wird das zu Grunde liegende Modell der Fragmentoberflächen erläutert.

Kapitel 4 beinhaltet neben dem Versuchsprogramm die Ergebnisse der bruchmechanischen und ballistischen Untersuchung. Das Kapitel zeigt zuerst die untersuchten Einflüsse und Betonzusammensetzungen. Anschließend werden in zwei Abschnitten alle wesentlichen bruchmechanischen und alle wesentlichen ballistischen Ergebnisse

zu jedem Einfluss getrennt gezeigt. Die Ergebnisse werden jeweils zu jedem Einfluss einzeln und im Zusammenhang mit allen Ergebnissen diskutiert.

In Kapitel 5 werden Zusammenhänge zwischen den Betoneinflüssen und den gemessenen Energieformen dargestellt. Das Kapitel ist so gegliedert, dass die unterschiedlichen Energieformen einzeln, beginnend mit der Austrittsenergie, gezeigt werden.

Schließlich folgt nach einer ausführlichen Zusammenfassung dieser Arbeit ein Ausblick auf weitere Forschungsfragen, die sich aus dieser Arbeit ableiten lassen.

2 Stand der Forschung

2.1 Grundlagen der Bruchmechanik

2.1.1 Einführung

Als Teilgebiet der Festigkeitslehre befasst sich die Bruchmechanik mit dem Rissverhalten und dem Bruch ursprünglich ganzer Festkörper durch äußere Belastungen. Unter einem Bruch wird hierbei das mechanische Trennen des Materials infolge einer Rissentstehung oder eines Risswachstums durch Störung bzw. Ausschalten der Bindungskräfte der Atome verstanden. Aus der Materialtrennung entstehen neue Oberflächen, zu deren Bildung eine bestimmte Energiemenge benötigt wird, vgl. beispielsweise Blaschke [8].

Die Richtung des Bruches bzw. der Rissöffnung hängt von der Art der äußeren Belastung ab und wird, wie Abbildung 2.1.1 zeigt, in drei Grundbeanspruchungsmodi unterschieden – reine Zugbelastung (Modus I), ebene Schubbelastung (Modus II) und nicht ebene Schubbelastung (Modus III). Nach Keuser [74] beeinflussen sich Zug- und Schubbelastung im Beton nicht. Modus I besitzt die größte praktische Bedeutung.

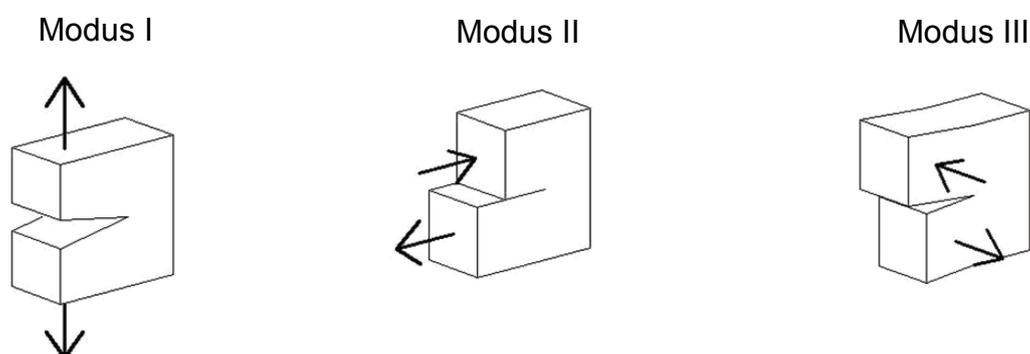


Abbildung 2.1.1: Modi der Rissöffnung in der Bruchmechanik

Seit der Veröffentlichung der Bruchtheorie von Griffith [55] wurden verschiedene Konzepte und Modelle im Bereich der Bruchmechanik verfasst und weiterentwickelt. Zu unterscheiden sind hierbei Modelle der Linear-Elastischen Bruchmechanik (LEBM), Modelle der Fließbruchmechanik (FBM) und Modelle der Nicht-Linearen Bruchmechanik (NLBM).

2.1.2 Linear-Elastische Bruchmechanik

Voraussetzung für die Anwendung der LEBM ist linear-elastisches Materialverhalten, das sich in der Regel bei spröden Materialien wie Keramiken findet. Für Glas bestätigte Griffith experimentell seine auf einem energetischen Ansatz beruhenden Überlegungen. Er stellte fest, dass Risswachstum in ideal-elastischen, homogenen, isotropen und spröden Materialien dann auftritt, wenn die gespeicherte elastische Verformungsenergie die zur Bildung neuer Oberflächen notwendige Energie übersteigt. Dieser Ansatz führte zur Griffithgleichung (Gleichung 2.1), in der die auftretende Spannung in Abhängigkeit einer Versagensgröße – hier: der Risslänge – enthalten ist. Sobald die Spannung den kritischen Wert σ_c erreicht, beginnt ein vorhandener Riss der Länge $2 \cdot a_r$ sich in einem spröden Körper instabil mit großer Geschwindigkeit bis zum Spröbruchversagen des Körpers auszubreiten.

$$\sigma = \sqrt{\frac{2 \cdot E \cdot \gamma}{\pi \cdot a_r}} \quad \text{Gl. 2.1}$$

Bei duktilen Materialien ist die Anwendung der LEBM nur dann näherungsweise möglich, wenn die plastische Verformung um die Risspitze im Vergleich zur elastischen Verformung des Gesamtmaterials sehr klein ist. Irwin [67] verallgemeinerte die Griffithgleichung unter Berücksichtigung geringer plastischer Verformungen an der Risspitze. Er führte eine weitere Energiekomponente für die an der Risspitze verbrauchte Energie ein – die plastische Verformungsenergie G_p . Die Summe aus spezifischer Oberflächenenergie und plastischer Verformungsenergie ergibt die Energiefreisetzungsrates G . Im Modus I gilt für die kritische Spannung σ_{Ic} Gleichung 2.2.

$$\sigma_{Ic} = \sqrt{\frac{(\gamma + G_p) \cdot E}{\pi \cdot a_r}} = \sqrt{\frac{G_{Ic} \cdot E}{\pi \cdot a_r}} \quad \text{Gl. 2.2}$$

Irwin entwickelte eine weitere Variante zur Berücksichtigung des oben genannten Verhaltens nach einem Ansatz von Sneddon [113], in der er die Spannungen nicht direkt an der Risspitze, sondern in unmittelbarer Nähe betrachtete. Diese Betrachtungsweise führt nach Gleichung 2.3 im Modus I zum Spannungsintensitätsfaktor K_I .

$$K_{Ic} = \sigma_{Ic} \cdot \sqrt{\pi \cdot a_r} \cdot Y \quad \text{Gl. 2.3}$$

Beim einsetzenden Rissfortschritt nimmt der Spannungsintensitätsfaktor K_I den Wert K_{Ic} an. Dieser Wert gilt als materialspezifische kritische Größe und wird Bruchzähig-

keit genannt. Zwischen kritischem Spannungsintensitätsfaktor und kritischer Energiefreisetzungsrates ergibt sich im ebenen Spannungszustand der Zusammenhang nach Gleichung 2.4.

$$G_{Ic} = \frac{K_{Ic}^2}{E} \quad \text{Gl. 2.4}$$

Erste Ergebnisse zum bruchmechanischen Verhalten von Beton wurden von Kaplan veröffentlicht [72]. Er untersuchte die kritische Energiefreisetzungsrates G_{Ic} für unterschiedliche Mörtel und Betone mit einer analytischen Methode ausgehend von der Griffithgleichung in 3- und 4-Punkt-Biegezugversuchen an gekerbten und ungekerbten, unterschiedlich großen Balken. Diese und weitere Untersuchungen anderer Autoren [z. B.: 1 und 111] führten zum Ergebnis, dass sich die LEBM nicht zur Bruchvorhersage und zur Voraussage des Zugtragverhaltens von Beton eignet, da sich eine ausgeprägte Bruchprozesszone vor dem Eintreten des Makrorisses entwickelt. Die LEBM kann aber dann eingesetzt werden, wenn bruchmechanische Kennwerte des Betons für sehr große Bauteile (z. B.: Staudämme) bestimmt werden, vgl. [47].

2.1.3 Fließbruchmechanik

Die FBM stellt einen Übergang von der LEBM zur NLBM dar. Mit Modellen der FBM können kleine Prozesszonen um die Risspitze berücksichtigt werden, so dass elastisch-plastisches Materialverhalten beschrieben werden kann.

Ein Konzept der Fließbruchmechanik erarbeiteten Cherepanov 1967 und Rice 1968 unabhängig voneinander [23 und 100]. Dabei wird zur Beschreibung des Energieumsatzes an der Risspitze die Verformungsenergie je Volumeneinheit und die Arbeit je Wegeinheit berücksichtigt. Dieses Konzept mündete in einem wegunabhängigen Liniennintegral – dem sogenannten J-Integral. Nach Großmann [57] wird unter dem J-Integral die Änderung der Verformungsenergie in Abhängigkeit von der Risslänge verstanden. Sie kann als Verallgemeinerung der Energiefreisetzungsrates angesehen werden. Die Verwendung des J-Integrals findet meist bei Metallen statt und weniger bei Beton [57]. Nach Hillerborg [63] wird das Entfestigungsverhalten des Betons nach Erreichen der Maximalspannung beim J-Integral nicht berücksichtigt.

Hillerborg entwickelte in [64] das Dugdale-Modell für Beton weiter. Dugdale [45] ging nach Beobachtungen des Verhaltens von Stahl davon aus, dass sich vor der wirklichen Risspitze eines elastisch-idealplastischen Materials ein Fließbereich mit kon-

stanter Fließspannung befindet. Die gesamte Risslänge $2 \cdot b$ setzt sich folglich aus der wirklichen Risslänge $2 \cdot a_r$ und einer fiktiven, plastischen Risslänge d zusammen. Dadurch ist der Riss komplett von einem elastischen Spannungsfeld umgeben. Die Vorgänge an der Rissspitze können dann, wie Abbildung 2.1.2 zeigt, in zwei Schritten mit Hilfe der LEBM berechnet werden.

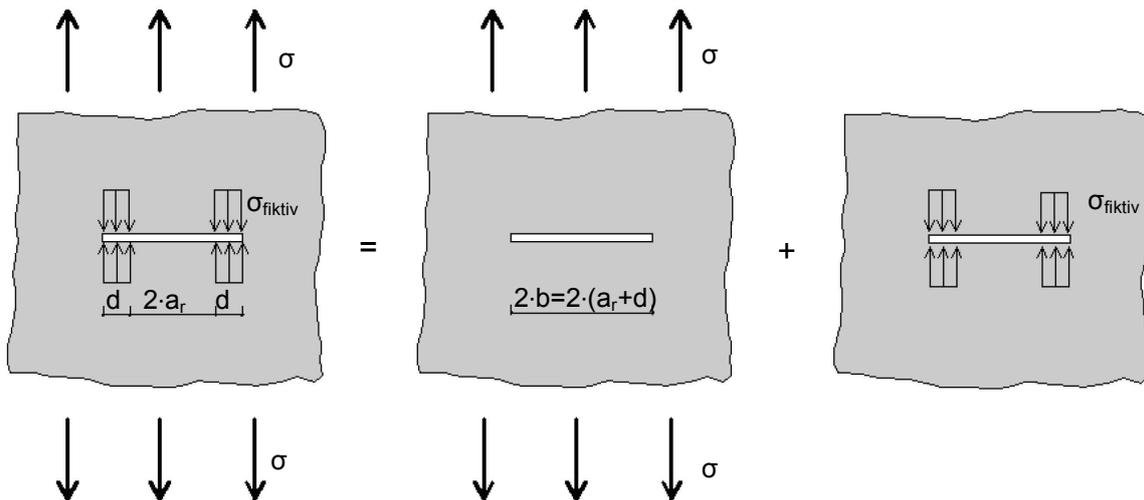


Abbildung 2.1.2: Dugdale-Modell nach Gross [56]

2.1.4 Nicht-lineare Bruchmechanik

Die Problematik der Anwendung der LEBM bzw. der FBM auf Beton liegt in der ausgeprägten, sich direkt vor einem spannungsfreien Riss ausbildenden Prozesszone. Das mögliche Verhalten des Materials an der Rissspitze haben Bažant et al. [6] für die drei Bereiche der Bruchmechanik in Abbildung 2.1.3 zusammengefasst.

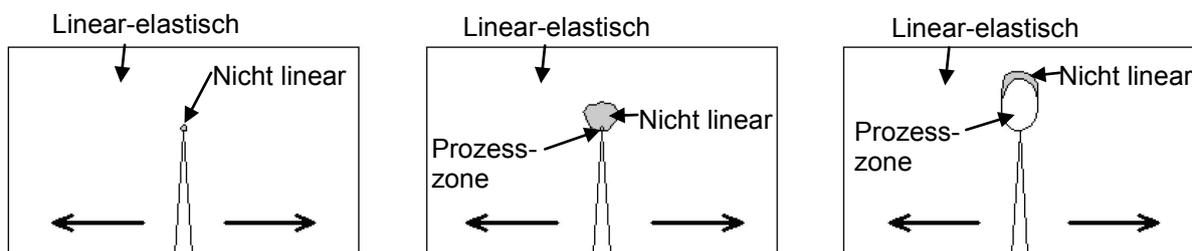


Abbildung 2.1.3: Verhalten um die Rissspitze in der LEBM (links), Fließbruchmechanik (Mitte), NLBM (rechts) nach Bažant et al. [6]

Reinhardt beschreibt die unter Zugbelastung entstandene Prozesszone in [97, Seite 63] als „ein System sehr feiner, z. T. parallel verlaufender Mikrorisse, die noch nicht kontinuierlich sind“. Nach Duda [44] laufen folgende, in Abbildung 2.1.4 gezeigte,

einzelne Abläufe beim verformungsgesteuerten, zentrischen Zugversuch bis zum Bruch der Probe ab:

Beim Aufbringen einer Zugbelastung bilden sich Mikrorisse zufällig über der gesamten Länge des Probekörpers und richten sich senkrecht zur Hauptspannungsrichtung aus (I), so dass von einer konstanten Dehnung ϵ über der kompletten Länge ausgegangen werden kann. Vor Erreichen der maximalen Belastung kommt es im Bereich der späteren Bruchflächen zur Bildung einer Schar von Mikrorissen (II) – der sogenannten Mikrorissakkumulationszone. Die Dehnung steigt über die gesamte Länge an und hat im Bereich der Mikrorissakkumulationszone ein lokales Maximum. Durch Zusammenschluss von einzelnen Mikrorissen bildet sich nach Überschreiten der Maximallast ein Makroriss (III) aus, der aber noch durch Materialbrücken und Kornverzahnungen Lasten übertragen kann.

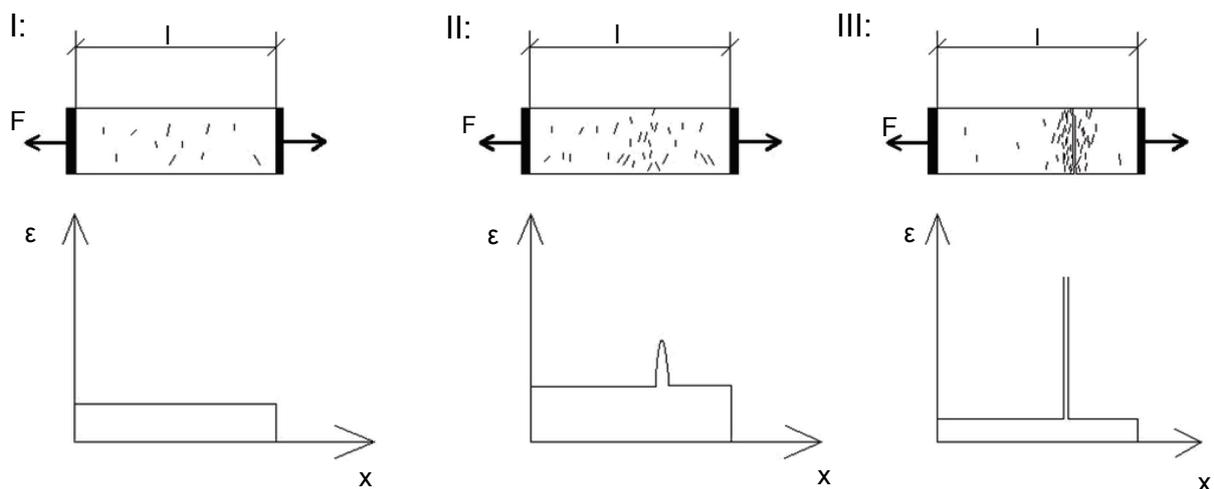


Abbildung 2.1.4: Ablauf der Rissbildung beim Zugversuch von Beton nach Duda [44]

Kohäsionsrissmodelle – oder Modelle des fiktiven Risses – gehen von einer Übertragung von Zugspannungen über den geöffneten Riss hinweg aus. Vertreter dieser Modellart sind das fiktive Rissmodell von Hillerborg [64] und das Rissbandmodell von Bažant und Oh [6]. Äquivalente elastische Rissmodelle – oder Modelle des effektiven Risses – versuchen das Betontragverhalten basierend auf der LEBM mit zusätzlichen Parametern zu beschreiben. Zu dieser Modellart gehören u. a. das Zwei-Parameter-Modell von Jenq und Shah [70] und das Größenabhängigkeitsmodell (engl.: Size Effect Model – SEM) von Bažant und Kazemi [5]. Elices zeigt in [48] eine Gliederung der gebräuchlichen Modelle der Bruchmechanik, die hier in Abbildung 2.1.5 mit einigen zu diesen Modellen gehörenden Autoren wiedergegeben wird. Ausführliche Be-

schreibungen dieser Modelle können in großer Zahl in der Literatur gefunden werden [z. B.: 5, 6, 7, 12, 18, 44, 48, 64, 70, 80, 84, 90 und 109].

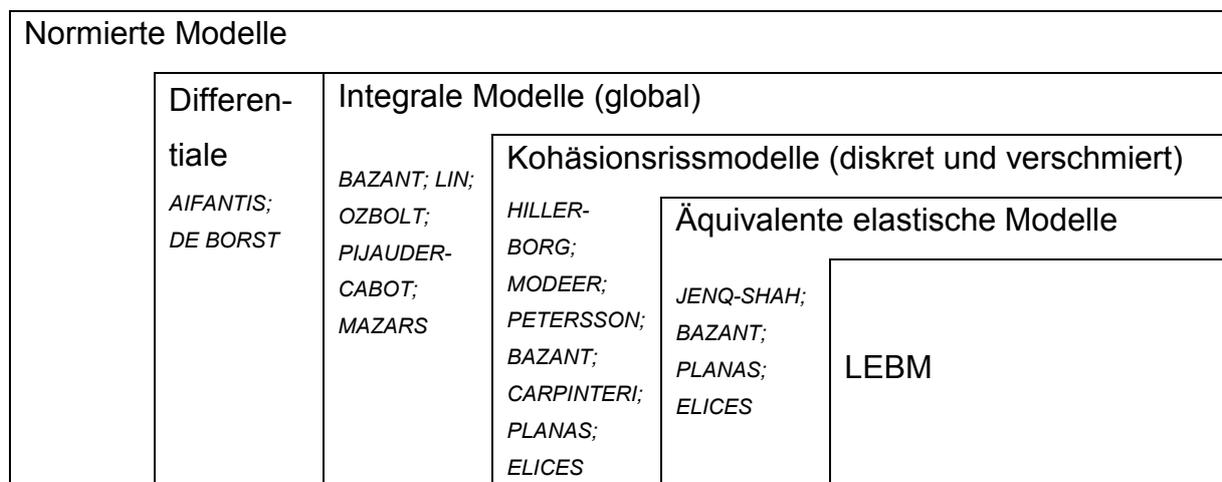


Abbildung 2.1.5: Gliederung bruchmechanischer Modelle und Angabe von Autoren nach Elices [48]

Die Modelle nutzen zum Teil unterschiedliche Kennwerte, um das Materialverhalten zu charakterisieren. Einer dieser Kennwerte ist die spezifische Bruchenergie, die in verschiedenen Modellen der NLBM vorkommt. Sie repräsentiert im Modell des fiktiven Risses die notwendige Energie pro Einheitsfläche (projizierte Bruchquerschnittsfläche), um zwei Oberflächen zu erzeugen. Praktisch stellt sie die Fläche unter der Spannungs-Rissöffnungs-Beziehung dar. Liu [80] gibt in seiner Arbeit einen Überblick über verschiedene Funktionen mit denen das Verhalten der Spannung zur Rissöffnung abgebildet werden kann. Im Größenabhängigkeitsmodell ist die Bruchenergie jene Energie, die für instabiles Risswachstum in einem unendlich großen Probekörper aufgewendet werden muss. Sie ist damit identisch mit der kritischen Energiefreisetzungsrate G_{Ic} eines solchen Probekörpers und wird mit Hilfe der LEBM (z. B.: R-Kurvenkonzept) ermittelt.

Die Bruchenergie kann durch verschiedene Versuche bestimmt werden. Neben dem technisch schwierig umzusetzenden zentrischen Zugversuch [z. B. in: 84 und 87], können der Keilspaltversuch [z. B. in: 112, 117 und 126], der kompakte Zugversuch [z. B. in: 133] und der 3-Punkt-Biegezugversuch zum Einsatz kommen. Der einfach durchzuführende 3-Punkt-Biegezugversuch entwickelte sich zu einem Standardversuch zur Bestimmung der Bruchenergie und wurde in einem RILEM Entwurf geregelt [102]. Hillerborg [63] konnte die Eignung dieser Versuchsdurchführung an Hand von Daten eines Ringversuchs mit Beteiligung von vierzehn Laboren aus unterschiedlichen Ländern belegen.

Im Gegensatz zu Hillerborg sieht Budnik [18] die Bruchenergie nicht als Materialkonstante, sondern als Maß für die aufgebrachte Energie. Als Materialkennwert schlägt er alternativ die Duktilitätslänge vor, die sich aus der Bruchenergie bezogen auf die Zugfestigkeit ergibt.

Hillerborg und Petersson führten eine weitere Kenngröße zur Beschreibung der Empfindlichkeit eines Materials gegen Risswachstum ein – die charakteristische Länge l_{ch} [64 und 90]. Sie entspricht in einem Zugversuch genau der Hälfte des Teils der Prüfkörperlänge, in dem die zur Erzeugung einer Bruchfläche notwendige Energie gespeichert ist. Die charakteristische Länge wird mittels Gleichung 2.5 bestimmt.

$$l_{ch} = \frac{G_F \cdot E}{f_t^2} \quad \text{Gl. 2.5}$$

Für l_{ch} gilt: Je kleiner ihr Wert bei unveränderter Spannungs-Rissöffnungs-Kurve wird, desto spröder verhält sich das Material. Ein ähnlicher Kennwert ist nach Jenq und Shah der Sprödigkeitsparameter Q [70]. Er gilt als Größe der Sprödigkeit mit der Dimension einer Länge. Mit diesem Kennwert werden der Elastizitätsmodul E , der modifizierte kritische Spannungsintensitätsfaktor K_{Ic}^S und die kritische Rissspitzenöffnung $CTOD_c$ aus dem Zwei-Parameter-Modell miteinander verknüpft. Die Größenordnung von Q entspricht der Größenordnung von l_{ch} .

2.1.5 Dynamische Bruchmechanik

Innerhalb der dynamischen Bruchmechanik werden einerseits Untersuchungen mit hohen Geschwindigkeiten durchgeführt, andererseits die Geschwindigkeit der Rissausbreitung beobachtet. Aus vielen Studien ist bekannt, dass sich eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bzw. der Verformungsgeschwindigkeit auf Materialkennwerte wie die Festigkeit auswirkt, vgl. Bachmann [2]. Gross [56] sieht als Folge der steigenden Belastungsgeschwindigkeit Änderungen der Bruchzähigkeit durch geringeres plastisches oder viskoses Fließen. Des Weiteren kann es in der Umgebung der Rissspitze zu erhöhten Spannungen infolge von Trägheitskräften kommen. Die Trägheitskräfte setzen der Rissentwicklung einen Widerstand entgegen und werden nach Bachmann [2] zur bestimmenden mechanischen Größe. Nach Gross [56] liegt der einzige Unterschied vom statischen zum dynamischen Belastungsfall bei der Betrachtung des Rissspitzenfeldes darin, dass die Spannungsintensitätsfaktoren von

der Zeit abhängen ($K_{Ic,dyn} = K_{Ic}(t)$). Bei der Bestimmung der Energiefreisetzungsrate muss die kinetische Energie berücksichtigt werden.

Einen Überblick über die Auswirkungen der Belastungsgeschwindigkeit auf die Druck- und Zugfestigkeit von Beton gibt Zheng in seiner Arbeit [139]. Beobachtungen zeigen demnach, dass mit zunehmender Belastungs- bzw. Dehngeschwindigkeit ein vermehrter Kornbruch festzustellen ist, der mit dem Festigkeitsanstieg in Verbindung gebracht werden kann. Zheng stellt des Weiteren in eigenen Untersuchungen fest, dass sich unter dynamischer Zugbelastung mehrere erkennbare Trennrisse einstellen können, während unter statischer Belastung nur ein Trennriss auftritt. Daraus folgert er eine zunehmende innere Schädigung im Bereich des gesamten Probekörpers mit steigender Dehngeschwindigkeit. Zielinski [140] führt den Anstieg der Festigkeit auf die Heterogenität des Betons zurück. Nach Mechtcherine steigt mit der höheren Belastungsgeschwindigkeit die Energiezufuhr rate, also die Energiezufuhr pro Zeiteinheit. Dadurch steht mehr Energie im gleichen Zeitraum zur Verfügung, so dass der Riss den kürzesten Weg und nicht den Weg des geringsten Widerstands nimmt. Der Rissverlauf führt vermehrt durch Größtkörner, so dass die Rauheit der Bruchfläche sinkt [84]. Laut Curbach hängt der Festigkeitsanstieg neben dem häufigeren Kornversagen auch von der veränderten Spannungsverteilung vor Fehlstellen und der begrenzten Rissgeschwindigkeit ab [27]. Er weist in seinen Untersuchungen maximale Rissgeschwindigkeiten von 100 bis 500 m/s nach. Dabei kommt es zu Änderungen der Bruchenergie infolge von Rissverzweigungen oder Rissbeschleunigungen bzw. Rissverzögerungen. Solche Rissverzweigungen wurden auch von Hilsdorf und Ziegelsdorf beschrieben [65]. Ein Überblick über weitere Untersuchungen zum Thema Rissausbreitung gibt Bachmann in [2]. In seiner Arbeit fasst er die unterschiedlichen Beobachtungen von Verzögerungen der Entwicklung der Rissgeschwindigkeit verschiedener Autoren nach einer Abbildung von Shah et al. [111] zusammen (Abbildung 2.1.6). Für die Bruchenergie bzw. die Bruchfläche kann folgendes abgeleitet werden:

- Ein Rissumlauf an der Oberfläche eines Gesteinskorns sorgt für eine größere messbare Bruchenergie des Betons, da die erzeugte Bruchfläche vergrößert wird. Wird das Gesteinskorn dabei komplett aus der Matrix gelöst, weisen beide Bruchflächen nach der Trennung des Probekörpers einen Krater an der Stelle des Gesteinskorns auf.

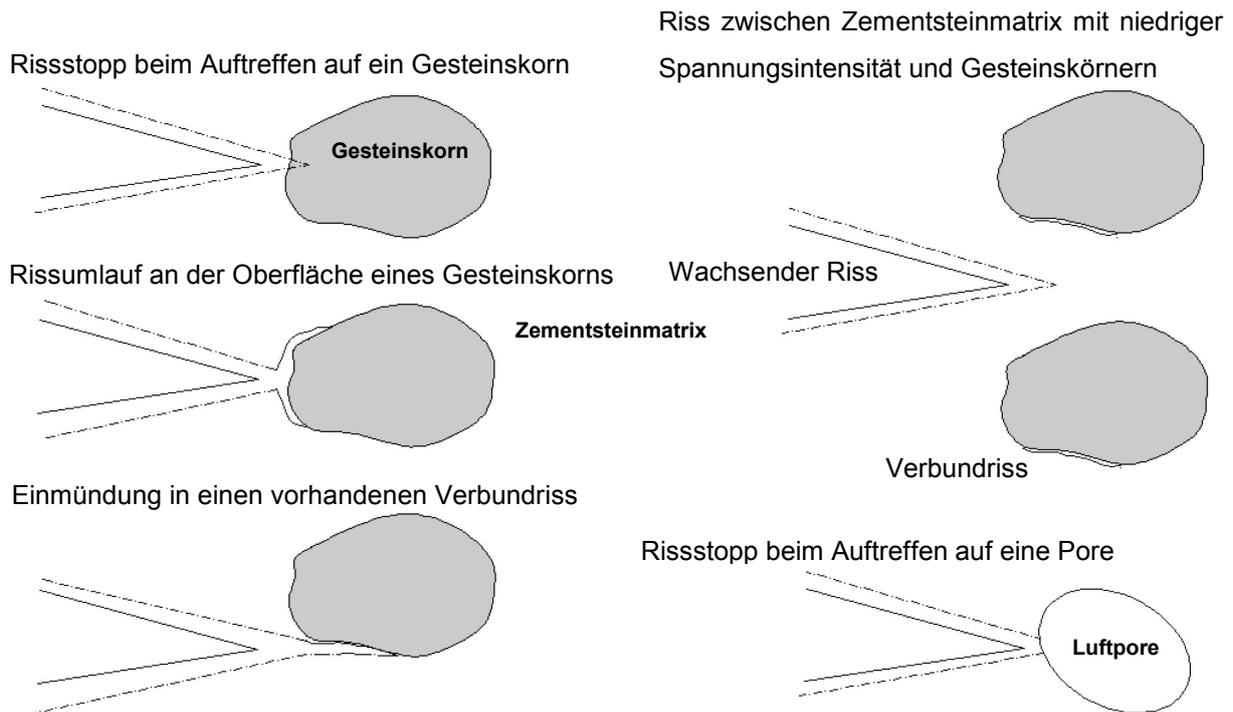


Abbildung 2.1.6: Arten der Rissverzögerung nach Shah et al. [111]

- Ein Riss kann beim Auftreffen auf ein Gesteinskorn gestoppt werden, wenn die Bruchenergie des Gesteinskorns größer ist als die der umgebenden Matrix. Damit der Riss fortschreiten kann, muss die äußere Belastung gesteigert werden. Der Rissstopp ist im Nachhinein nur schwierig an Hand der Bruchfläche zu erkennen. Der Makroriss wird bis zur Trennung des Probekörpers einen anderen Pfad nehmen. Kommt es zu vielen Änderungen des Risspfads durch vermehrte Rissstopps, steigt die Bruchenergie an.
- Sind im Verbund zwischen Gesteinskörnung und Matrix bereits Verbundrisse vorhanden, sinkt die Bruchenergie bei Einmündung des Risses in den Verbundriss ab. Um Rückschlüsse von der Bruchfläche auf die Bruchenergie zu ziehen, ist es notwendig, die Lage solcher Verbundrisse zu kennen oder ihre Bildung von vornherein weitestgehend zu unterbinden.
- Eine weitere Form eines Rissstopps kann durch Auftreffen des Risses auf eine Luftpore eintreten. Der Makroriss sucht sich bis zur Trennung einen anderen Pfad. An der Bruchfläche ist der Rissstopp nur schwierig zu erkennen. Bei vielen Rissstopps und damit verbundenen, wechselnden Risspfaden steigt die Bruchenergie.

Die Bruchenergie sinkt auch, wenn Risse innerhalb der Matrix wachsen. Hier schreitet der Riss auf direktem Weg fort, was bei der Betrachtung der Bruchfläche als relativ glatte und ebene Fläche beobachtet werden kann. Aus diesen Beobachtungen folgt, dass der Rissverlauf einen entscheidenden Einfluss auf die Bruchenergie und die entstehende Bruchfläche ausübt. Die Bruchenergie verhält sich ähnlich wie die Festigkeit und steigt mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit an. Ab einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 GPa/s steigt die Bruchenergie sehr stark an. Bekannte Untersuchungsergebnisse sind in Abbildung 2.1.7 aus [14, 108, 120, 130 und 138] wiedergegeben.

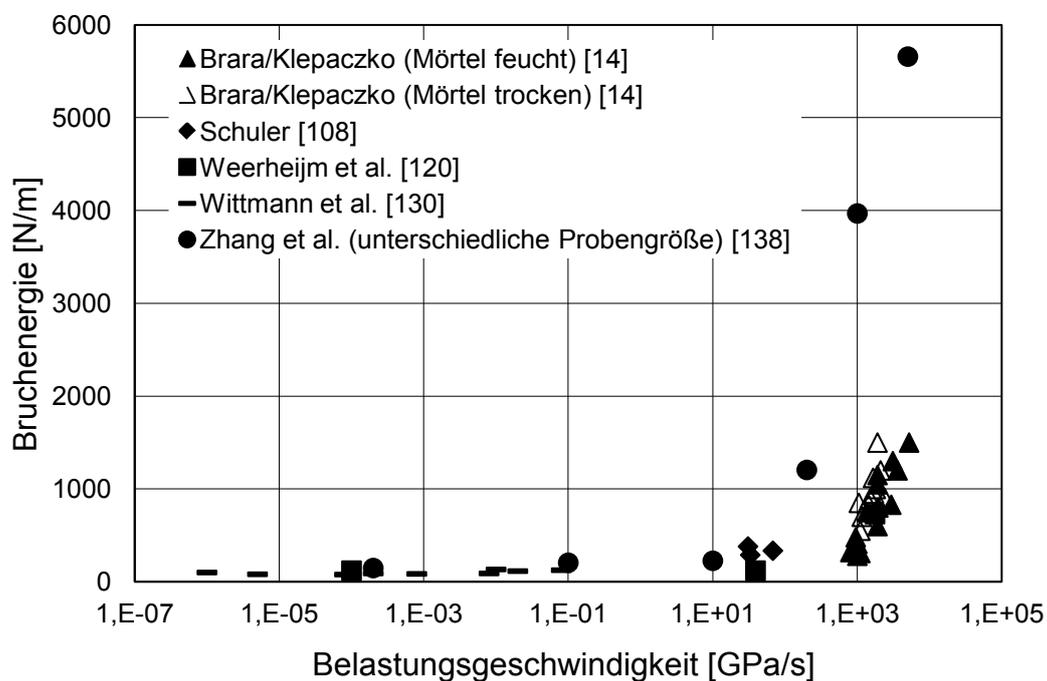


Abbildung 2.1.7: Bruchenergie in Abhängigkeit von der Belastungsgeschwindigkeit (bei Angabe der Dehngeschwindigkeit wurde diese nach Angaben in [96] umgerechnet)

Die Ergebnisse wurden für unterschiedliche Beton- und Mörtelzusammensetzungen sowie in unterschiedlichen Versuchsaufbauten ermittelt. Weerheijm et al. stellten in mehreren Studien mit einem modifizierten Split-Hopkinson-Bar fest, dass die Bruchenergie bis zu einer Belastungsgeschwindigkeit von 10 GPa/s unabhängig von der Belastungsgeschwindigkeit ist [120, 122 und 123]. Bei Belastungen von 1000 GPa/s steigt die Bruchenergie auf das sechsfache gegenüber einer statischen Belastungsgeschwindigkeit des gleichen Materials an. Dabei unterscheiden sich die Spannungs-Verformungs-Kurven und die daraus berechneten Bruchenergien für die Vorder- und Rückseite des Probekörpers. Ähnliche Ergebnisse für die Bruchenergie erzielten Zhang et al. [138] in 3-Punkt-Biegezugversuchen mit einem Fallhammer. Diese Ver-

suche wurden in Anlehnung an eine Empfehlung von RILEM zur Bestimmung der Bruchenergie durchgeführt [102]. Untersucht wurden unterschiedliche Probekörpergrößen, um den Größeneffekt einschätzen zu können. Die Bruchenergie bei höheren Belastungsgeschwindigkeiten von bis zu 5000 GPa/s wurden von Brara et al. [14] für feuchte und trockene Mörtelproben geprüft. Einen Überblick über verschiedene Untersuchungsmethoden zu Impulsbelastungen an Beton wie beispielsweise Stoßmaschinen, Fallhammer, Split-Hopkins-Bar oder Geschosse gibt Ortlepp in [89].

2.1.6 Einflüsse auf bruchmechanische Kennwerte des Betons

2.1.6.1 Einführung

Die meisten Kennwerte des Betons unterliegen verschiedensten Einflüssen. Diese treten meist kombiniert auf. Beispielsweise ist die Druckfestigkeit unter anderem abhängig von der Lagerung, dem Alter und der Geometrie des Probekörpers. Mechtcherine unterteilte in [84] diese Einflüsse in die vier folgenden Gruppen:

- Versuchsaufbau (Probekörpergeometrie und -größe, Versuchsart usw.)
- von der Betonzusammensetzung abhängige Einflüsse (w/z-Wert, Größtkorn usw.)
- zeitliche Einflüsse (Betonalter, Prüfungsgeschwindigkeit, Belastungsgeschichte usw.)
- Umwelteinflüsse (Temperatur, Feuchte usw.)

Im Folgenden sind aus der Literatur entnommene Einflüsse auf die Bestimmung der bruchmechanischen Kennwerte aufgeführt. Diese Zusammenfassung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, sondern konzentriert sich auf die in dieser Arbeit dynamisch untersuchten Einflüsse. Unabhängig vom jeweiligen Einfluss ist die Streuung der bruchmechanischen Kennwerte aus der Literatur sehr groß. Das hängt zum einen mit dem heterogenen Baustoff Beton zusammen, zum anderen aber auch damit, dass unterschiedliche Messverfahren genutzt wurden, sowie bestimmte Randbedingungen, welche die Werte beeinflussen, nicht gemessen und berücksichtigt wurden (z. B.: Einflüsse aus der Lagerung).

2.1.6.2 Einfluss einer Kerbung

Eine Kerbe wird in Probekörper eingebaut, wenn eine Sollbruchstelle vorgegeben werden muss. Diese Kerbungen sind in der Literatur sehr umstritten, da Spannungsspitzen am Kerbende die Prüfung beeinflussen können. Brameshuber [12] schreibt

zur Kerbempfindlichkeit, dass die Spannungsspitzen am Kerbgrund bei duktilen Materialien durch Fließen abgebaut werden können. Bei spröden Materialien wie Beton kommt es aber auf Grund des fehlenden Fließverhaltens zum vorzeitigen Bruch – die Nettozugfestigkeit ist kleiner als die Zugfestigkeit des ungekerbten Materials. Ergänzend berichtet Budnik [18, Seite 17], dass durch Kerbung des Probekörpers „(...) eine zufällige, durch Unzulänglichkeiten des Materialgefüges bedingte Rissbildung (...) nicht ermittelt werden kann“. Mit Blick auf ein weiteres Problem beim zentrischen Versuch an ungekerbten Probekörpern, kommen Duda [44] und Slowik [112] aber zu dem Schluss, dass eine Kerbung der Probekörper ab einer bestimmten kritischen Länge $l_{crit} (= 2 \cdot l_{ch})$ durch das Phänomen des Zurückschnappens beim verformungs-gesteuerten Versuch notwendig ist.

Hillemeier bestätigte in [62] Ergebnisse von Shah et al. zur Kerbempfindlichkeit von Zementstein. Er wies nach, dass gekerbte Biegebalken bis zu 50 % geringere Festigkeiten gegenüber nicht gekerbten aufwiesen. Shah et al. [111] kamen zu dem Schluss, dass zwar die Festigkeit von Zementstein kerbempfindlich ist, die von Beton und Mörtel aber als kerbunempfindlich einzustufen ist. Andere Autoren (u. a. Bra-meshuber [12], Gjørv et al. [54]) widersprechen diesem Schluss und zeigen, dass die Festigkeitsabnahme des Betons bei Kerbung nur geringer ist als bei Zementstein (siehe Abbildung 2.1.8).

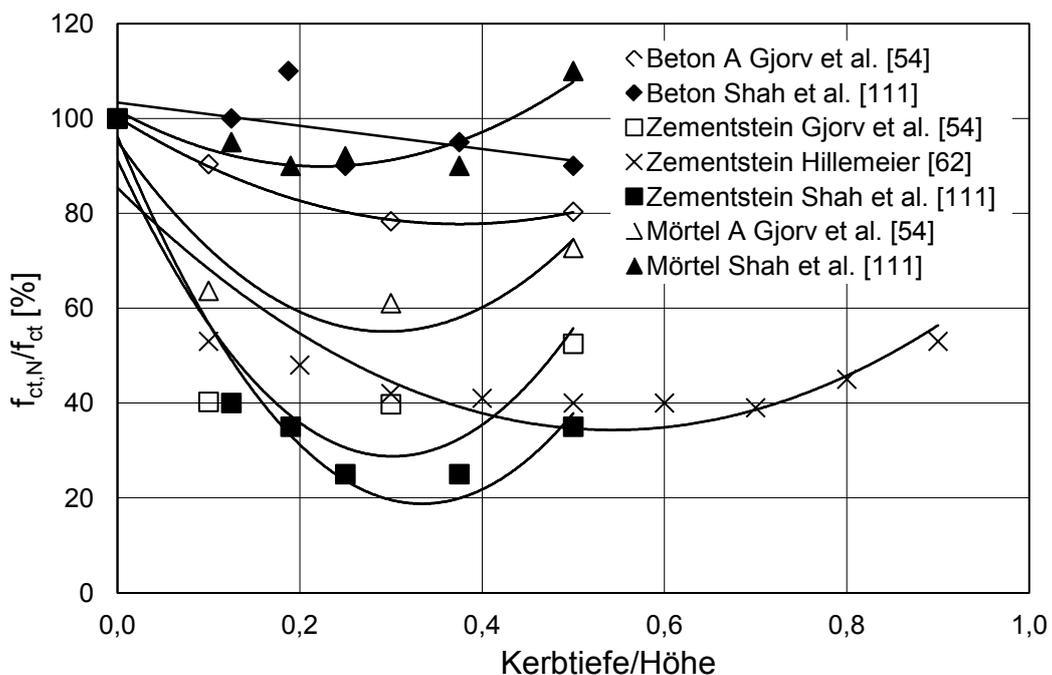


Abbildung 2.1.8: Einfluss der Kerbtiefe auf die Festigkeit nach [54, 62 und 111]

2.1.6.3 Einfluss der Probekörpergröße und -geometrie

Die üblichen Materialkennwerte sind von der Probekörpergröße und -geometrie abhängig. Dies ist hinreichend bekannt und soll daher nicht weiter vertieft werden, vgl. beispielsweise Umrechnungsfaktoren in DIN 1045-2 [40]. Auch auf die Bestimmung bruchmechanischer Kennwerte hat die Probekörpergröße einen Einfluss. Sie fand u. a. Eingang in das Größenabhängigkeitsmodell nach Bažant [5]. Er untersuchte den Einfluss der Probekörpergröße an geometrisch ähnlichen Probekörpern, was zur Formulierung eines Vorschlags einer Prüfvorschrift zur Berücksichtigung des Größeneffekts durch RILEM führte [110]. Carpinteri [21] stellt eine Abnahme der Bruchenergie mit kleinerer Probekörpergröße unter Nutzung des von ihm entwickelten multifraktalen Maßstabgesetzes fest. Dieses Modell beschreibt den Einfluss der Probengröße auf die Festigkeit und berücksichtigt dabei eine fraktale Beschreibung der Bruchflächen. Trunk zeigt in seiner Arbeit [117], dass die aus dem 3-Punkt-Biegezugversuch ermittelte Bruchenergie einerseits nicht bzw. nur unwesentlich von der Probendicke beeinflusst wird, andererseits aber mit zunehmender Probengröße (Höhe, Länge) ansteigt. Die Bruchenergie strebt dabei einem Grenzwert entgegen. Die Probekörpergeometrie ist meist durch die Kraffteinleitung im Experiment und den Versuchsaufbau bestimmt. So können sowohl Prismen als auch Zylinder mit oder ohne unterschiedliche Aussparungen vorkommen, vgl. Blaschke [8]. Einen Überblick verschiedener Geometrieinflüsse auf die Bruchenergie findet sich in Trunk [117].

2.1.6.4 Einfluss der Art der Gesteinskörnung und des Größtkorns

Untersuchungen von Petersson [90] zeigen die Abhängigkeit der Materialkennwerte von der Art der Gesteinskörnung. In seiner Arbeit wurden die Zugfestigkeit, der E-Modul, die Bruchenergie und die charakteristische Länge von Betonen mit Quarz, einem aus dem Meer gewonnenen Gestein (ohne nähere Angaben), gebrochenem Kalkstein und Blähton mit einem maximalen Größtkorn von 12 mm bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass Betone mit gebrochenem Kalkstein die höchste Zugfestigkeit besitzen, Betone mit Quarz oder „Meerbodengestein“ aber die höchsten Bruchenergien und dynamischen E-Moduln erreichen. Daraus ergeben sich für die charakteristischen Längen dieser Betone die größten Werte. Deutlich geringere Werte und damit ein spröderes Materialverhalten werden nach dieser Untersuchung Betonen mit gebrochenem Kalkstein oder Blähton zugesprochen. Scheidler [107] stellte fest, dass die Zugfestigkeit – sowohl die zentrische als auch die Biegezugfestigkeit –

durch die Art der Gesteinskörnung beeinflusst wird. Er untersuchte Basaltsplitt und „Rheinkies“ und konnte beim Basalt eine höhere Zugfestigkeit registrieren.

Bei der Betrachtung der Größtkorndurchmesser verifizierte Scheidler [107] die Ergebnisse von Petersson [90] zur Zugfestigkeit. Dieser hatte mit zunehmendem Größtkorn von 8 mm über 12 mm bis 16 mm eine Abnahme der Zugfestigkeit bemerkt. Die Bruchenergie und die charakteristische Länge nehmen zu [90]. Scheidler erweiterte den Untersuchungsbereich auf 8 mm, 16 mm und 32 mm Größtkorn. Der Anstieg der Bruchenergie mit steigendem Größtkorndurchmesser konnte z. B. von Brameshuber, Duda und Hordijk bestätigt werden [12, 44 und 66]. Mechtcherine erklärt die Zunahme der Bruchenergie durch eine höhere Energiedissipation größerer Körner; die Gesteinskörner dienen als Materialbrücken zwischen den Rissufern [84]. Abbildung 2.1.9 zeigt zusammenfassend Ergebnisse verschiedener Studien nach Hordijk [66]. Es fehlen aber oftmals Angaben über die verwendete Sieblinie oder das Volumenverhältnis von Zementstein zu Gesteinskörnung.

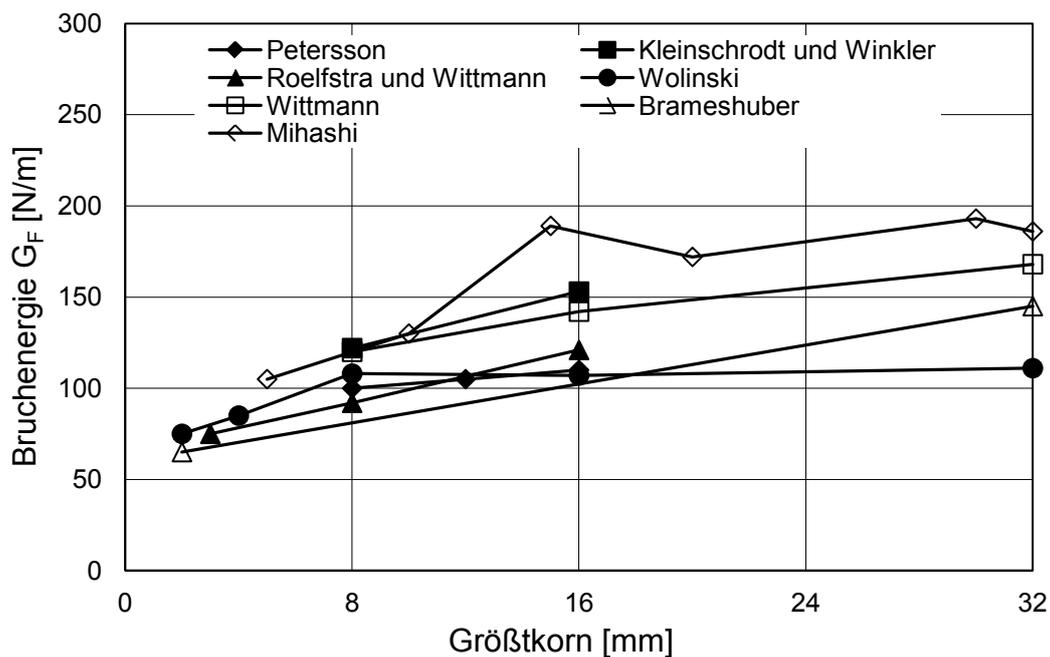


Abbildung 2.1.9: Einfluss des Größtkorns in einzelnen Studien nach Hordijk [66]

Der Einfluss des Größtkorndurchmessers auf die Bruchenergie fand Eingang in den CEB-FIP Model Code durch Berücksichtigung in einem Grundwert der Bruchenergie. Die Grundwerte sind in Tabelle 2.1.1 wiedergegeben [25].

Tabelle 2.1.1: Grundwerte der Bruchenergie nach CEB-FIP Model Code [25]

d_{\max} [mm]	8	16	32
G_{F0} [N/m]	20	30	50

Die Bruchenergie kann demnach durch Gleichung 2.6 mit Hilfe der Druckfestigkeit abgeschätzt werden.

$$G_F = G_{F0} \cdot \left(\frac{f_{cm}}{f_{cm0}} \right)^{0,7} \quad \text{Gl. 2.6}$$

2.1.6.5 Einfluss des w/z-Werts

Der w/z-Wert ist einer der bestimmenden Faktoren bei der Zusammensetzung eines Betons. Im Allgemeinen sinkt mit steigendem w/z-Wert die Festigkeit des Betons ab. Nach Wittmann et al. [130] und Petersson [90] gilt diese Beobachtung auch für die Bruchenergie, wenn der w/z-Wert größer als 0,40 ist. Für w/z-Werte kleiner als 0,40 sinkt die Bruchenergie nach Wittmann et al. [130] geringfügig ab. Unterschiedliche Studien sind von Hordijk zusammengestellt worden [66] (siehe Abbildung 2.1.10). Da der w/z-Wert maßgeblich für die Größe der Festigkeit verantwortlich ist, folgt nach Hordijk, dass die Bruchenergie auch mit zunehmender Druckfestigkeit ansteigt. Die Druckfestigkeit ist nach CEB FIP Model Code neben dem Größtkorndurchmesser die zweite entscheidende Größe zur Bestimmung der Bruchenergie nach Gleichung 2.6.

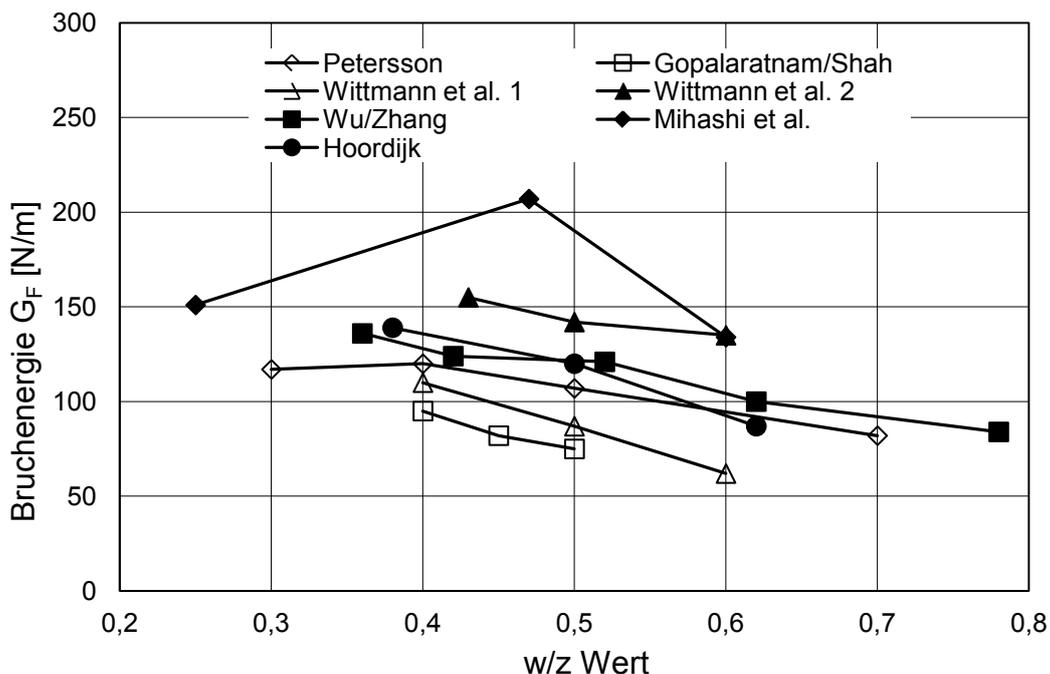


Abbildung 2.1.10: Einfluss des w/z-Wertes in einzelnen Studien nach Hordijk [66]

Nach Prokopski et al. [92] steigt mit abnehmendem w/z -Wert die Bruchzähigkeit. Er begründet diesen Anstieg mit der steigenden Festigkeit in der Kontaktzone zwischen Korn und Zementsteinmatrix und der geringeren Porosität dieser Zone.

2.1.6.6 Einfluss des Betonalters

Mit zunehmendem Betonalter nimmt die Festigkeit – sowohl Zug- als auch Druckfestigkeit – durch Fortschreiten der Hydratation zu. Auch der E-Modul steigt mit dem Alter an. Blaschke bestätigt in [8] die Zunahme der Zugfestigkeit und die Ergebnisse zur Bruchenergie und charakteristischen Länge von Petersson [90]. Dieser stellt fest, dass die Bruchenergie mit dem Alter zunimmt und die charakteristische Länge gleichzeitig abnimmt. Ältere Probekörper verhalten sich in Zugversuchen folglich spröder als jüngere Probekörper des gleichen Betons. Die Versprödung führt dazu, dass die vollständige Kraft-Verformungsbeziehung schwieriger messbar ist, vgl. Blaschke [8]. Abbildung 2.1.11 zeigt die Ergebnisse zur Untersuchung des Verhaltens der Bruchenergie mit zunehmendem Betonalter von Blaschke [8] und Petersson [90]. Während Blaschke einzelne Werte ermittelt, gibt Petersson für einzelne Altersstufen Bereiche der Bruchenergie an.

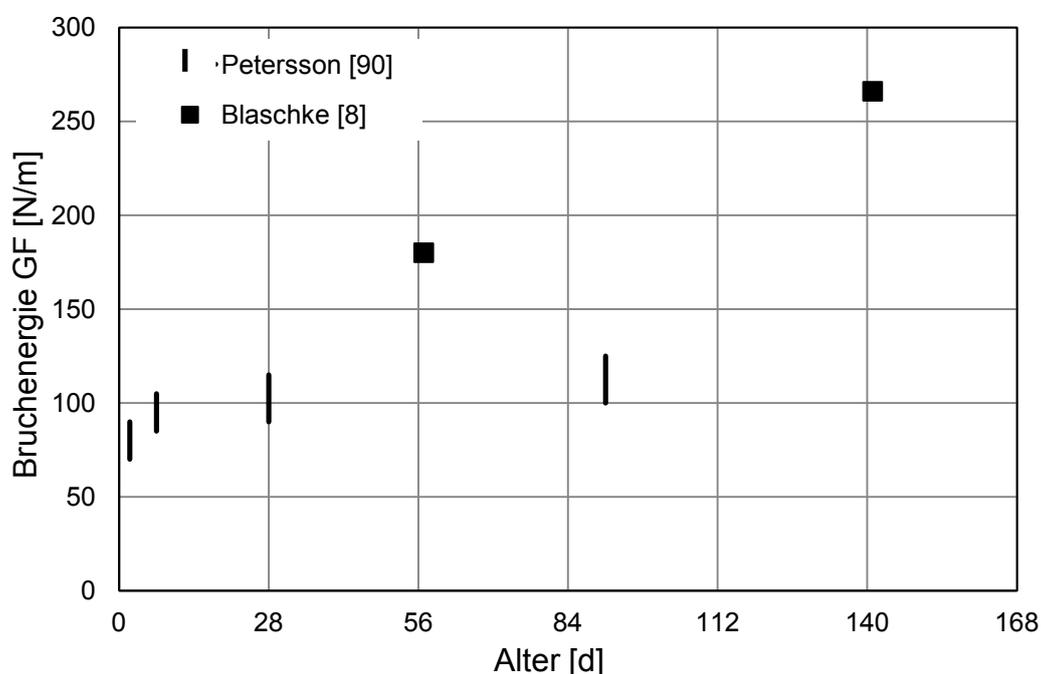


Abbildung 2.1.11: Einfluss des Probenalters auf die Bruchenergie nach Blaschke [8] und Petersson [90]

2.1.6.7 Einfluss aus der Lagerung bzw. der Probenfeuchte

Der Einfluss der Lagerung wurde unter anderem von Scheidler untersucht [107]. Er stellte bei der Bestimmung der Zugfestigkeit geringere Werte für trocken gelagerte Probekörper im Vergleich zu feucht gelagerten Probekörpern fest. Aussagen über die Bruchenergie oder die charakteristische Länge trifft er in Bezug auf den Einfluss der Lagerung nicht. Brameshuber [12] fand in seiner Arbeit heraus, dass die Bruchenergie bei trockenen Proben gegenüber feucht gelagerten bzw. im Wasser gelagerten Proben nach 24 h deutlich zunimmt. Proben, die nur 6 h trocken gelagert wurden, zeigen einen Abfall der Bruchenergie. Die kurzfristige Abnahme von G_F führt er auf eine Konzentration von Schwindrissen am Kerbgrund zurück. Die langfristige Zunahme der Bruchenergie sieht er in den dann über den gesamten Querschnitt verteilten Schwindrissen begründet. Bei der Prüfung wird der sich bildende Makroriss durch die verteilten Schwindrisse immer wieder neu verzweigt, was zur Erhöhung der Bruchfläche und damit der Bruchenergie führt. Mechtcherine [84] ergänzt, dass die größere Bruchfläche auch aus der geschwächten Kontaktzone infolge des Austrocknungsschwindens der Zementsteinmatrix resultiert. Der Riss strebt den Weg des geringsten lokalen Widerstands an, der auf Grund seiner Länge energetisch nicht der günstigste sein muss.

2.1.7 Zusammenfassung und Anwendung in dieser Arbeit

Mit Hilfe bruchmechanischer Untersuchungen kann das Rissverhalten und der Bruch ursprünglich ganzer Probekörper beschrieben werden. Wie in den vorangegangenen Abschnitten gezeigt, kann die Beschreibung von Betonproben auf Grund einer sich vor dem Trennriss einstellenden ausgeprägten Prozesszone nur mit nicht-linearen Modellen der Bruchmechanik erfolgen. Zu diesen Modellen gehört das Modell des fiktiven Risses von Hillerborg, das auf einer energetischen Betrachtung basiert. Hillerborg geht davon aus, dass Energie zur Erzeugung von Oberflächen notwendig ist. Er führt die spezifische Bruchenergie ein, die sich praktisch aus der Gesamtfläche unter der Spannungs-Rissöffnungsbeziehung und der Bruchquerschnittsfläche berechnen lässt. Versuchstechnisch kann ein 3-Punkt-Biegezugversuch unter Berücksichtigung einer Empfehlung von RILEM angewandt werden. Dieser Versuch ist im Vergleich zu anderen Testmethoden einfach umzusetzen; die eingesetzten Probekörper sind gekerbte Balken. Studien, die der RILEM Empfehlung zur Ermittlung der Bruchenergie folgen, liegen in großem Umfang vor. Dabei wurde eine Vielzahl von

Einflüssen auf das bruchmechanische Verhalten von Beton untersucht. Die für diese Arbeit bedeutenden Einflüsse wurden in den vorherigen Abschnitten präsentiert. Es zeigte sich, dass Beschreibungen der Bruchfläche nur begrenzt vorhanden sind, so dass in dieser Arbeit ein Schwerpunkt auf die Auswertung der Bruchflächen gelegt werden soll. Im Abschnitt 2.3 werden dazu einige Grundlagen der Oberflächenbestimmung vertieft. Zur Auswertung der Bruchflächen sollen Theorien zum Rissverhalten berücksichtigt werden, die im Abschnitt „dynamische Bruchmechanik“ dargelegt sind.

2.2 Betonverhalten unter lokaler, dynamischer Einwirkung

2.2.1 Einführung

Auf Grund unterschiedlichster Einwirkungen werden Untersuchungen zum dynamischen bzw. hochdynamischen Verhalten von Materialien notwendig. Zu diesen Einwirkungen zählen beispielsweise Erdbeben, das Rammen von Bohrpfählen oder der Beschuss von Bauwerken. Alle dynamischen Einwirkungen sind im Gegensatz zu statischen Einwirkungen zeitlich veränderlich. Die maximalen Geschwindigkeiten reichen nach Riedel [101] von 5 m/s für einen Schlag mit einem Presslufthammer bis zu 10000 m/s für einen Meteoriteneinschlag. Diese große Bandbreite macht eine Einschränkung für diese Arbeit auf hochdynamische Belastungen notwendig; die betrachteten Belastungen sollen zwischen ca. 100 m/s und ca. 1000 m/s liegen. In diesem Geschwindigkeitsbereich liegen die meisten Mündungsgeschwindigkeiten verbreiteter Projektile.

Eine weitere Einschränkung bei der Betrachtung der notwendigen Grundlagen entsteht aus der lokalen, punktförmigen Belastung des Zielobjekts durch ein Projektil. Nach Zukas [144] wird die kinetische Energie des Projektils genutzt, um in das Zielobjekt einzudringen bzw. es zu durchdringen (Perforation). Dieses Belastungsverhalten steht im Gegensatz zu Sprengstoffeinwirkungen, die chemisch gebundene Energie nutzen. Die folgenden Abschnitte beschränken sich daher auf lokale, punktförmige Belastungen zwischen 100 m/s und 1000 m/s.

2.2.2 Modelle zur Beschreibung von Beschussbelastungen

2.2.2.1 Grundlegende Vorstellungen

Das Auftreffen des Projektils auf das Zielobjekt stellt eine stoßartige Belastung dar, durch die nach Zukas [144] eine Druckwelle im Projektil und im Zielobjekt ausgelöst wird. Die Druckwelle wird von langsameren Scherwellen begleitet. Beim Erreichen einer freien Oberfläche des Zielobjekts wird die Druckwelle als Zugwelle reflektiert. Die Vorstellungen dieses Modells sind in Abbildung 2.2.1 nach Eibl [46] wiedergegeben. Zukas [144] hat die dabei auftretende Schädigung des Projektils und des Zielobjekts zusammengefasst; am Projektil entstehen folglich plastische Verformungen, Zersplitterung oder Bruch und Temperaturanstiege. Das Zielobjekt ist durch die Wellenfortpflanzung elastischen und plastischen Verformungen unterworfen; des Weiteren kommt es zur Rissbildung und Materialausbrüchen.

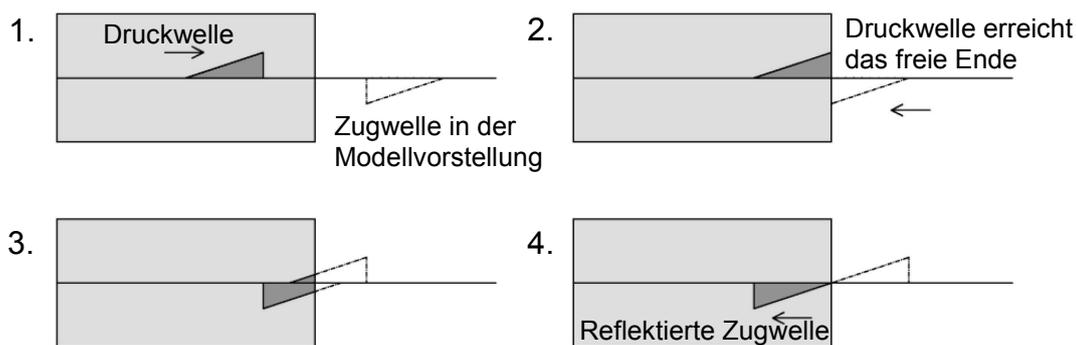


Abbildung 2.2.1: Idealisertes Modell einer Wellenreflexion am freien Ende in vier Zeitzuständen nach Eibl [46]

Nach Ockert [88] tritt am Zielobjekt lokales Versagen auf, dem ein globales Versagen folgen kann. Globales Versagen entsteht meist durch Biegung der Gesamtstruktur, die durch Stöße des Projektils mit geringer Geschwindigkeit ausgelöst wird. Das lokale Versagen von Beton wird in vier Arten unterschieden (vgl. Abbildung 2.2.2), die von der Belastung und dem Widerstand des Zielobjekts abhängen.

Nach einer Zusammenfassung der Versagensarten von Backman et al. [3] bezeichnet Eibl das lokale Versagen an der lastzugewandten Seite als Aufplatzung (engl. spalling) [46]. Die mit dem Auftreffen des Projektils auf das Zielobjekt initiierte Druckwelle schiebt das Material im Penetrationsbereich zur Seite. Dabei entsteht ein Ausbruchkrater; Fragmente unterschiedlicher Größe und Form werden aus dem Ziel-

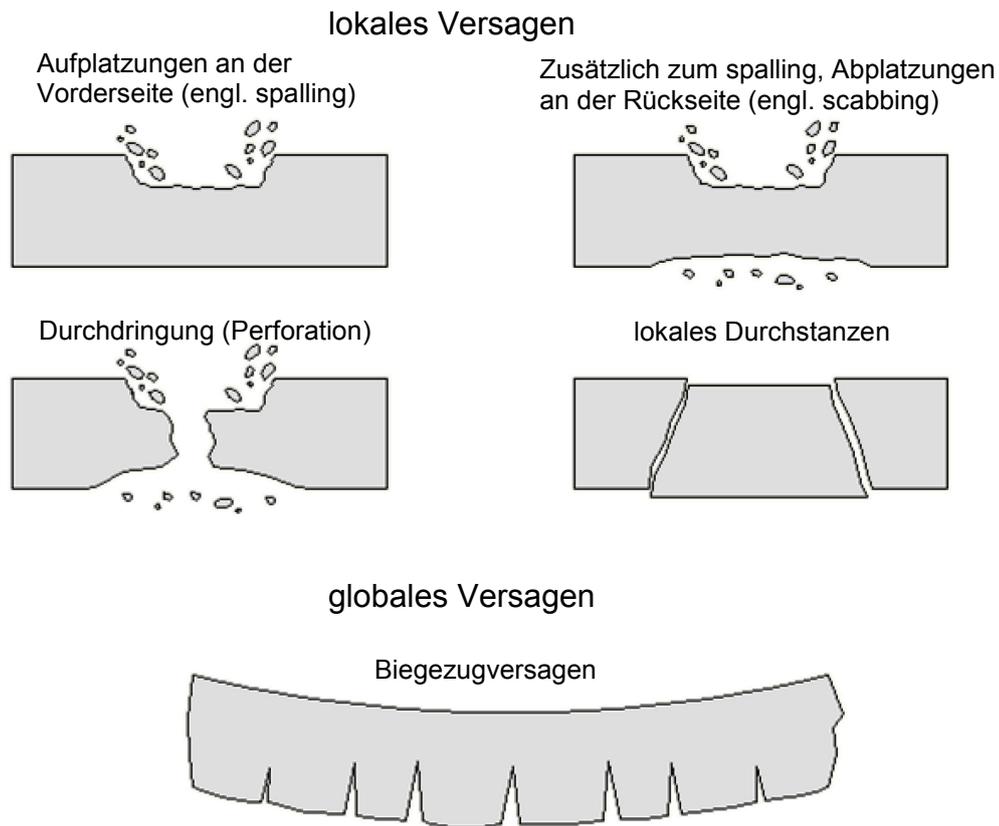


Abbildung 2.2.2: Globale und lokale Schädigung nach Ockert [88]

objekt gelöst, fliegen in alle Richtungen und stellen die größte Gefahr für die Umgebung dar, vgl. Herrmann [61]. Abplatzungen auf der Rückseite des Zielobjekts (engl. scabbing) entstehen aus der als Zugwelle reflektierten Druckwelle am freien Rand. Diese Abplatzungen führen wie auf der Vorderseite zur Krater- und Fragmentbildung. Nach Ockert [88] sind bei unbewehrten Betonteilen die Durchmesser der Ausbruchkrater auf der Rückseite des Zielobjekts größer als auf der lastzugewandten Vorderseite. Beim Durchstanzen entsteht ein Ausbruchkegel mit annähernd demselben Durchmesser wie der des Projektils; entlang des Ausbruchkegels tritt das Versagen in Folge großer Scherkräfte auf. Durchstanzen tritt in der Regel dann auf, wenn stumpfe Projektile auf dünne, harte Platten treffen, vgl. Backman et al. [3]. Nach Hermann entsteht Durchstanzen auch in Folge „von schnellem Beschuss“ [61, Seite 36]. Ein vollständiges Durchdringen des Zielobjekts durch das Projektil heißt Perforation. Durch die Perforation werden an Zielobjekten aus Beton neben inneren Schädigungen (z. B.: Risse) äußerlich sichtbar Ausbruchkrater und Fragmente gebildet. Die Ausbruchkrater an Vorder- und Rückseite sind im Bereich der Durchdringung miteinander verbunden.

2.2.2.2 Beschreibung des Eindringverhaltens

Modelle zur Bestimmung der Perforation bzw. der Eindringtiefe (Penetration) eines Projektils in ein Zielobjekt werden seit vielen Jahren von verschiedenen Autoren formuliert. Einen Überblick verschiedener Modelle zur Beschreibung des Eindringverhaltens in Zielobjekte aus Beton geben beispielsweise Kennedy [73], Yankelevsky [135] und Li et al. [79]. Für andere Materialien (zumeist Metalle) werden Modelle von Backman et al. [3] und von Corbett et al. [26] zusammengefasst.

Die für die einzelnen Modelle notwendigen Kennwerte können experimentell, analytisch oder numerisch bestimmt werden. Nach Li et al. [79] werden die folgenden vier Kennwerte zur Beurteilung des lokalen Eindringverhaltens von Projektilen in Zielobjekte aus Beton häufig genutzt:

- die Eindringtiefe: Tiefe, in die das Projektil ohne vollständige Durchdringung in ein massives Betonzielobjekt eindringt,
- die Abplatzungsgrenze: minimale Dicke des Zielobjekts, bei der Abplatzungen an der Rückseite noch vermieden werden,
- die Durchdringungsgrenze: minimale Dicke des Zielobjekts, bei der eine Durchdringung noch vermieden wird,
- die ballistische Grenze: minimale Einschlaggeschwindigkeit, um das Zielobjekt zu durchdringen.

Dancygier vergleicht in [28] zwei empirische Modelle mit einem eigenen Ansatz unter Berücksichtigung eigener Versuchsergebnisse an bewehrtem und unbewehrtem Beton. Das erste Modell beinhaltet eine modifizierte Formel des NDRC (National Defense Research Committee) [73] und beruht auf einer statistischen Anpassung experimenteller Daten. Dieses Modell ist weitverbreitet und findet sich beispielsweise in Arbeiten von Dancygier und Vossoughi et al. [29 bzw. 121]. Das zweite Modell ist einer Arbeit von Barr entnommen [4]. Diese Modelle und der Ansatz von Dancygier haben die Beurteilung der Schädigung anhand des Volumens und der Größe der Ausbruchkrater gemeinsam. Der Vorteil dieser Modelle liegt in der einfachen Bestimmung der Kennwerte (Ausbruchvolumen, Eindringtiefe usw.). Die Bestimmung der Volumina erfolgt durch eine Vereinfachung der Krater zu Kegeln, deren Durchmesser und Tiefe vermessen werden. Auch andere Studien wie Zimbelmann et al. vereinfachen das Volumen des Ausbruchkraters zu einem idealisierten Kegelvolumen.

men, um die Schädigung des Zielobjekts beurteilen zu können [142]. Børvik et al. [11] ermitteln das Kratervolumen, indem sie die Krater mit Ton befüllen, anschließend diesen wieder entfernen und wiegen. Aus bekannter Dichte und Masse des eingesetzten Tons ergibt sich das Kratervolumen. Bludau et al. vergleichen verschiedene Methoden zur Ermittlung des Volumens. Sie bestimmen das idealisierte Kegelvolumen (vgl. Zimbelmann et al. [142]), das Volumen durch Befüllen des Kraters mit Sand bekannter Schüttdichte und das Volumen durch Erfassung mit einem 3D Laser-Scanner am gleichen Ausbruchkrater. Das Bestimmen des idealisierten Kegelvolumens erfordert den geringsten Zeitaufwand und wird von Bludau et al. trotz einer Abweichung von 8 % gegenüber dem 3D Laser-Scanner als ausreichend genau für weitere Arbeiten empfohlen [10]. Als weitere vereinfachte Beschreibung der Schädigung schlägt Dancygier sechs Schadensklassen vor [30]. Basierend auf den Schäden an der Rückseite und dem Gesamtzustand des Zielobjekts werden die sechs Klassen von 1 (kein sichtbarer Schaden) bis 6 (Perforation des Zielobjekts) unterteilt. Diese Schadensklassen werden auch in anderen Arbeiten genutzt [z. B.: 10 und 31].

Neben der Schädigung (Eindringtiefe, Kraterdurchmesser usw.) enthalten die meisten Modelle verschiedene Parameter, die den Einfluss der Belastung durch das Projektil berücksichtigen. Diese Belastung wird in der Regel durch die Belastungsgeschwindigkeit sowie die Form, die Größe, das Material und die Masse des Projektils auf unterschiedliche Art ausgedrückt, vgl. Li et al. und Murthy et al. [79 und 93].

Im Gegensatz dazu wird das Material bzw. die Zusammensetzung des untersuchten Betons des Zielobjekts in die meisten Modelle nur wenig einbezogen. In den meisten empirischen und analytischen Modellen, wie beispielsweise dem modifizierten Modell des NDRC, geht nur die Betondruckfestigkeit als Parameter des Zielobjekts ein. Zusätzliche Materialkennwerte werden nur im Modell nach Kar mit dem Elastizitätsmodul und dem Größtkorndurchmesser berücksichtigt, vgl. [93]. In numerischen Modellen werden Materialien oft auf makroskopischer Ebene abgebildet; dadurch wird der Beton vereinfacht als homogenes Material angesehen. Es können Materialkennwerte wie Festigkeit oder Steifigkeit in diese Modelle implementiert werden. Des Weiteren wird meist der Einfluss der Dehngeschwindigkeit auf den Beton berücksichtigt, vgl. Li et al. [79]. Riedel betrachtet Beton auf mesoskopischer Ebene und unterscheidet zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung, um das Materialverhalten zu beschreiben. Er beachtet die Dichte des Betons, die Druckfestigkeit und die Massen-

teile seiner Komponenten in seinem RHT-Modell [101]. Nach Bludau [9] kann dieses Modell aber nur für Betonzusammensetzungen eingesetzt werden, die denen aus diesem Modell ähneln; eine Erweiterung steht noch aus.

2.2.2.3 Beschreibung von Partikelwolken

Untersuchungen von Partikelwolken in Folge einer Perforation eines Zielobjekts durch ein Projektil wurden bisher nur begrenzt durchgeführt und behandeln meist die Folgen in Zielobjekten aus Metall. Einen Überblick über verschiedene Modelle zur Fragmentierung dünner Metallplatten gibt Schäfer [105]. In einer weiteren Arbeit beschäftigt er sich mit dem Hochgeschwindigkeitsimpakt auf Gasdruckbehälter in Raumfahrtanwendungen [104]. Darin wird ein Fragmentierungsmodell auf Grundlage einer Energie- und Impulsbilanz entwickelt, das auf Druckbehälter abgestimmt ist. Zur Beschreibung der Partikelwolke sind die Masse, der Winkel und die Geschwindigkeit der Partikel notwendig. Die räumliche Verteilung der Partikel im Modell erfolgt nach Versuchsbeobachtungen gleichmäßig auf einem Rotationsellipsoiden (siehe Abbildung 2.2.3). Zusätzlich wird die Fragmentierung des Impaktors in Kugelform betrachtet, auf die hier nicht weiter eingegangen werden soll.

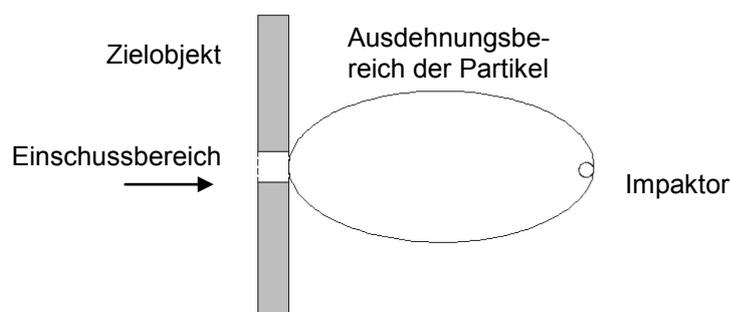


Abbildung 2.2.3: Modell der Partikelausbreitung nach dem Beschuss in Anlehnung an Schäfer [104]

Dinovitzer et al. [42] entwickeln ein Partikelmodell, das auf rein energetischen Überlegungen basiert. In ihrem Modell definieren sie einzelne Energieanteile, durch die Partikel entstehen und bewegt werden. Die Summe der einzelnen Energieanteile entspricht der vom Projektil „zur Verfügung gestellten“ kinetischen Energie; diese Energiebalance ist in Gleichung 2.7 dargestellt.

$$E_{V,T,Fragmente} = E_{kin,Projektil, Eintritt} - (E_{kin,Fragmente} + E_{kin,Projektil, Austritt} + E_{V,T,Projektil}) \quad \text{Gl. 2.7}$$

Die Verformungsenergie des Projektils $E_{V,T,Projektile}$ wird als Funktion der kinetischen Energie der ballistischen Grenze beschrieben (vgl. Abschnitt 2.2.2.2); dieser Zusammenhang wurde empirisch ermittelt. Die kinetischen Energien des Projektils $E_{kin,Projektile}$ werden mit der jeweiligen Eintritts- bzw. Austrittsgeschwindigkeit bestimmt. Die kinetische Energie der Fragmente $E_{kin,Fragmente}$ erhält man aus der Summe der Fragmentmassen multipliziert mit ihrer Geschwindigkeit. In diesem Modell wird angenommen, dass die Projektilmasse konstant bleibt und die Verformung des Projektils klein ist [42].

Eine Beschreibung der Partikel, die aus hochdynamischen Untersuchungen stammen, kann Wu et al. [131] entnommen werden. Sie untersuchen Partikel aus Stahlbetonplatten nach Blast-Versuchen hinsichtlich ihrer Größenverteilung durch eine Siebanalyse. Die Größenverteilung entsprechen sowohl Weibull als auch RRSB (Rosin-Rammler-Sperling-Bennet). Zusätzlich wurde ein Formfaktor an 200 Partikeln durch mikroskopische Untersuchungen ermittelt. Dieser Formfaktor ist definiert als Länge des stabil-liegenden Partikels zu seiner Breite. Er ist logarithmisch normal verteilt. Weitere Interpretationen der Ergebnisse werden nicht aufgeführt.

2.2.3 Einflüsse auf ballistische Kennwerte

2.2.3.1 Einführung

Ballistische Untersuchungen zu Einflüssen auf das Betonverhalten bzw. zu Einflüssen bezüglich der Betonzusammensetzung konzentrieren sich in großen Teilen auf zwei Aspekte:

- die Auswirkungen auf das Materialverhalten bei hohen Prüfgeschwindigkeiten und unterschiedlichen Projektilen und
- auf Sonderbetone wie beispielsweise Stahlfaserbeton oder hochfester Beton.

Dass sich Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten anders verhält als bei niedrigen, wurde bereits im Abschnitt 2.1.5 angesprochen. Bei Einwirkungen aus Beschuss hat zusätzlich die Geometrie und Masse des Projektils Einfluss auf die Untersuchungsergebnisse. Dieser Einfluss wird in nahezu alle ballistischen Modelle einbezogen.

Die Entwicklung und Untersuchung von Sonderbetonen basiert darauf, dass die meisten ballistischen Modelle die Druckfestigkeit als einzigen und maßgebenden Kennwert des Zielobjekts berücksichtigen. Sonderbetone werden dann mit beson-

ders hoher Druckfestigkeit entwickelt, da davon ausgegangen wird, dass diese Entwicklung zu einer Verbesserung des Beschusswiderstands führt. Dass eine Änderung der Druckfestigkeit eines Betons auf unterschiedlichen Wegen erreicht werden kann, wird oft vernachlässigt.

In den folgenden Abschnitten werden bekannte Ergebnisse in Anlehnung an die im Abschnitt 2.1.6 aufgeführten Einflüsse zusammengetragen.

2.2.3.2 Einfluss der Eintrittsenergie

Mit steigender Eintrittsgeschwindigkeit nimmt die kinetische Energie des Projektils zu. Mit der größeren kinetischen Energie geht eine größere Schädigung einher. Forrestal et al. [51] beschreiben die Schädigung durch die Eindringtiefe des Projektils in massive Zielobjekte aus Beton. Bei zwei Betonen unterschiedlicher Druckfestigkeit (23 N/mm^2 bzw. 39 N/mm^2) werden Eindringtiefen jeweils für sechs verschiedene Eintrittsgeschwindigkeiten zwischen 140 m/s und 460 m/s gemessen. Vorangegangene Untersuchungen durch Frew et al. und Forrestal mit anderen Projektilen und Eintrittsgeschwindigkeiten zwischen 400 m/s und 1200 m/s lieferten ähnliche Ergebnisse [50 bzw. 53]. Die Betone in diesen Studien werden hinsichtlich ihrer Dichte, ihrer Druckfestigkeit und ihres Größtkorns unterschieden. In Abbildung 2.2.4 sind Ergebnisse dieser Studien zusammengefasst.

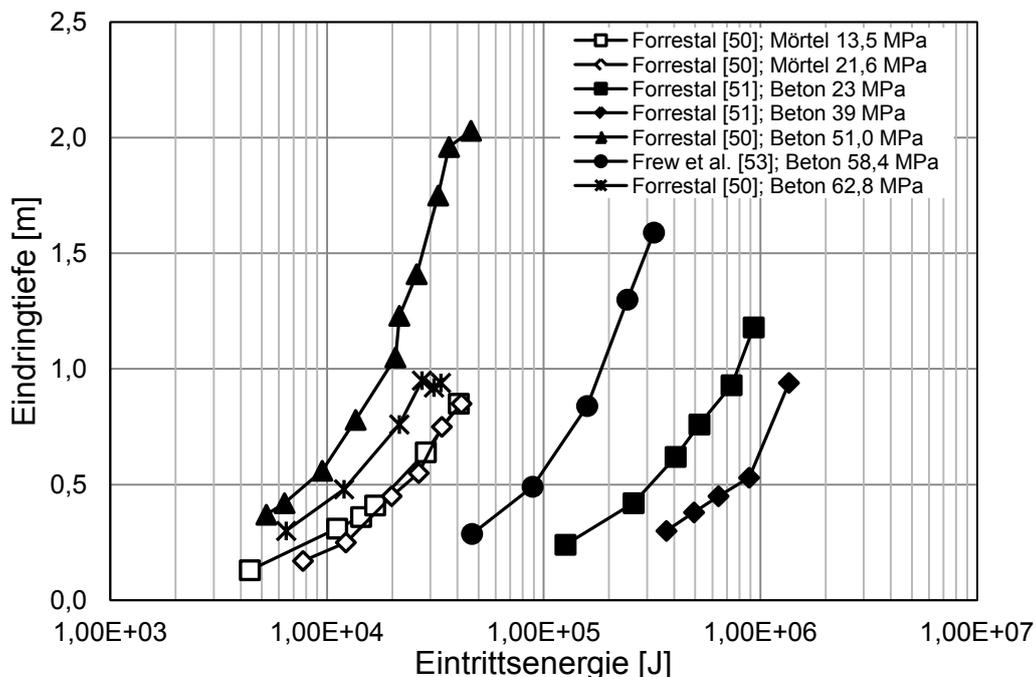


Abbildung 2.2.4: Einfluss der Eintrittsenergie verschiedener Projektilen auf die Eindringtiefe in Beton und Mörtel unterschiedlicher Druckfestigkeit nach [50, 51 und 53]

Zusätzlich sind Ergebnisse zweier Mörtel dargestellt. Der Anstieg der Eindringtiefe mit zunehmender Eintrittsenergie wird deutlich. Die Größe der Steigung der abgebildeten Linienzüge hängt vor allem von der Projektilart und der dadurch geänderten kinetischen Energie ab (Projektilmassen zwischen 0,064 kg und 13 kg).

2.2.3.3 Einfluss der Probengröße

Zur Untersuchung der Probengröße liegen nur wenige Informationen vor. Wie groß ein Probekörper sein muss, hängt nicht zuletzt von der Einwirkung bzw. vom Projektil ab. Frew et al. [52] untersuchen runde Probekörper aus Beton mit einer Druckfestigkeit von 23 N/mm^2 mit drei verschiedenen Durchmessern (1,83 m, 1,37 m und 0,91 m) auf ihren Widerstand gegen ein 13 kg schweres Projektil mit einem Durchmesser von 76,2 mm. Die Verhältnisse von Zielobjektdurchmesser zu Projektildurchmesser sind folglich 1 : 24 (, 18 und 12). Bei Geschwindigkeiten zwischen 160 m/s und 340 m/s können keine signifikanten Unterschiede in der Eindringtiefe der verschiedenen Probekörper festgestellt werden. Die Bruchbilder zeigen allerdings, dass selbst die größten Probekörper dieser Untersuchung eine große Anzahl an Rissen bis zum Probekörpertrand zusätzlich zu den Ausbruchkratern aufweisen. Angaben darüber finden sich nicht.

Zur Dicke der Probekörper schreiben Bludau et al. [10], dass diese von der verwendeten Gesteinskörnung abhängt. In ihrer Arbeit werden hochfeste Stahlfaserbetone mit Gesteinskörnungen aus Kalk, Quarz oder Basalt beschossen. Die Prüfungsgeschwindigkeit der Dragunov-Hartkerngeschosse wird in einem „worst-case“ Szenario mit ca. 890 m/s festgelegt. Unabhängig vom Gestein erfolgt bei einer Probekörperdicke $< 5 \text{ cm}$ immer eine Perforation; bei Plattendicken $> 10 \text{ cm}$ wird eine Perforation in allen Fällen verhindert. Der Versuchsaufbau von Bludau et al. wird auch von Kustermann et al. verwendet [76]. 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 Abplatzungen infolge der Druck- bzw. reflektierten Zugwelle entstehen.

2.2.3.4 Einfluss der Art der Gesteinskörnung und des Größtkorns

In Kustermann et al. [76] findet sich ein Vergleich verschiedener Gesteinsarten bezüglich ihres Einflusses auf den Beschusswiderstand. Zu den untersuchten Ge-

steinskörnungen zählen Basalt, Quarzit, Korund und Kalk. Die mit diesen Gesteinskörnungen entwickelten Betone sind alle hochfest ($f_{cm} > 102 \text{ N/mm}^2$ nach 28 d). Die Schädigung der Probekörper wird über das Ausbruchvolumen und die Perforation definiert. Während Betonplatten mit gebrochenen Gesteinskörnungen (Basalt, Quarzit und Korund) bei einer Dicke von 6 cm einen geeigneten Beschusswiderstand darstellen, besitzen Betonplatten mit rundem Kalkstein nur einen geringen Beschusswiderstand. Auffällig ist die unterschiedliche Größe der Schädigung an Vorder- und Rückseite. Basalt- und Korundbetonplatten sind an der Vorder- und Rückseite gleichmäßig stark geschädigt; dagegen weisen Quarzitbetonplatten an der Rückseite nur minimale Krater auf. Die Schädigung der Probekörper mit Kalkstein als Gesteinskörnung ist auf der Vorderseite fast zehnmal so groß wie auf der Rückseite.

Des Weiteren werden in dieser Arbeit hochfeste Betone mit verschiedenen Größtkorndurchmessern (16 mm, 8 mm und 5 mm) untersucht. Die untersuchte Gesteinskörnung ist Basaltsplitt. Kustermann et al. [76] kommen zu dem Ergebnis, dass ein hoher Beschusswiderstand (kleines Volumen der Ausbruchkrater) dann erreicht wird, wenn der Größtkorndurchmesser mindestens so groß ist wie der Projektildurchmesser. Gleichzeitig muss das Größtkorn in ein möglichst dichtes Korngerüst eingebaut werden.

2.2.3.5 Einfluss des w/z-Werts

Zhang et al. präsentieren in ihrer Studie [137] zum Widerstand von hochfestem Beton zwei Normalbetone mit w/z-Werten von 0,55 bzw. 0,45; diese Betone weisen leicht unterschiedliche Sieblinien auf. Sie stellen fest, dass bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,55 die Eindringtiefe größer ist als bei Betonen mit einem w/z-Wert von 0,45. Børvik et al. [11] untersuchen unter anderem drei Betone unterschiedlicher Druckfestigkeit hinsichtlich ihrer ballistischen Grenze. Die Erhöhung der Festigkeit erreichen sie durch eine Kombination von sinkendem Wasser-Bindemittelwert (w/b-Wert), einer größeren Menge an Silikastaub und einer leicht veränderten Sieblinie (weniger Feinanteile). Die w/b-Werte ändern sie von 0,59 über 0,37 zu 0,23. Mit steigender Druckfestigkeit nimmt auch die ballistische Grenze zu.

2.2.3.6 Einfluss des Betonalters

Kustermann et al. [76] bestimmen die Volumina der Ausbruchkrater zweier Betonmischungen im Alter von 56 d und 90 d. Sie stellen nach 90 d kleinere Ausbruchkrater

fest, weisen aber auf die großen Streuungen und die geringe Untersuchungsanzahl hin. Sie folgern, dass sich der Beschusswiderstand nicht mehr wesentlich ändert, nachdem die Erhärtung des Betons zum Großteil abgeschlossen ist.

2.2.3.7 Einfluss der Lagerung bzw. der Probenfeuchte

Ergebnisse zum Einfluss der Lagerung bzw. der Probenfeuchte können in der Literatur nicht gefunden werden.

2.2.4 Zusammenfassung und Anwendung in dieser Arbeit

Die Beobachtungen von Beschussversuchen an Probekörpern aus Beton führten zur Entwicklung einer Wellentheorie. Diese Theorie geht von der Initiierung einer Druckwelle beim Auftreffen des Projektils auf das Zielobjekt aus. Dabei wird kinetische Energie des Projektils vom Probekörper absorbiert und es entstehen aus dieser Energie unterschiedliche Schädigungen (Aufplatzungen, Abplatzungen, Fragmente oder Durchdringungen). Basierend auf dieser Vorstellung wurde eine Vielzahl von Modellen mit Hilfe empirischer, analytischer oder numerischer Methoden entwickelt. Die Modelle sind in der Regel so aufgebaut, dass Kennwerte der Schädigung durch Kennwerte der Einwirkung und Kennwerte des Materials bestimmt werden können. Die Einwirkung wird beispielsweise durch die Projektilgröße, die Projektilform oder die Projektilmasse charakterisiert. Untersuchungen zum Einfluss verschiedener Projektile liegen vor.

Das Material ist meist nur durch seine Druckfestigkeit berücksichtigt. Die Druckfestigkeit des heterogenen Betons kann durch sehr unterschiedliche Einflüsse und Maßnahmen eingestellt werden. Betone gleicher Druckfestigkeit können unterschiedliche Zusammensetzungen aufweisen und / oder verschiedenen äußeren Einflüssen (Alter, Lagerung usw.) unterliegen. Ihr Verhalten unter Belastung kann sich sehr differenziert zeigen (vgl. Abschnitt 2.1.6). Es müssen folglich weitere Einflüsse und Kennwerte ermittelt werden, die sich auf das Betonverhalten unter lokaler, dynamischer Einwirkung auswirken. Tendenzen, wie sich einzelne Einflüsse auswirken können, können in geringem Umfang in der Literatur gefunden werden und sind in Abschnitt 2.2.3 aufgeführt.

Die Schädigung als Zielgröße der Modellierungen wird sehr unterschiedlich definiert. Sie wird in den meisten Fällen als Eindringtiefe des Projektils in den Probekörper angegeben. Die Ausbruchkrater an der Vorder- und Rückseite der Zielobjekte sind

ebenfalls eine näher untersuchte Schädigung, von denen in der Regel die idealisierten Volumina bestimmt werden. Ein kaum erforschter Bereich der Schädigung sind die sich bildenden Fragmente bzw. Partikel und ihre Ausbreitung. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit liegt folglich in der Entwicklung eines Schädigungskriteriums, das auch diese Partikel berücksichtigt. Die Beurteilung dieser Partikel muss ihre unterschiedlichen Formen und Größen einbeziehen. Kennwerte zur Beschreibung der Partikel werden im folgenden Abschnitt 2.3 näher erläutert.

2.3 Beschreibung von Bruchflächen und Partikeln

2.3.1 Einführung

Um Risse und Bruchflächen beschreiben zu können, hat Wittmann [129] gezeigt, dass es vorteilhaft ist, verschiedene Betrachtungsebenen einzuführen – die Makroebene, die Mesoebene und die Mikroebene (siehe Abbildung 2.3.1).

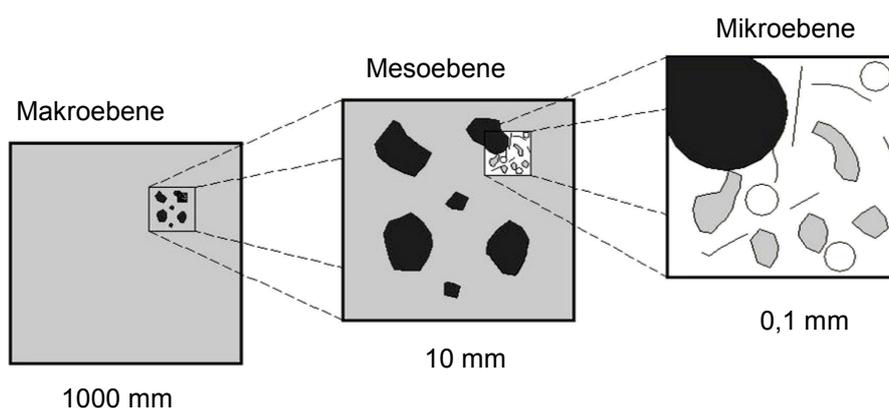


Abbildung 2.3.1: Betrachtungsebenen des Betons in Anlehnung an Wittmann [129] (nicht maßstäblich)

Die Makroebene wird genutzt, um das Materialverhalten direkt in konstruktiven Bemessungsregeln zu beschreiben. Der Beton wird als homogenes Material angesehen, dessen heterogenes Verhalten auf den anderen Betrachtungsebenen bestimmt und in der Makroebene berücksichtigt wird (vgl. Mechtcherine [84]). Das Erscheinungsbild der Bruchfläche des homogenisierten Betons kann als sehr glatt beschrieben werden. Die Bruchfläche entspricht der (zweidimensionalen) Querschnittsfläche des Probekörpers, so dass die Größe der Bruchfläche aus den äußeren Abmessungen des Probekörpers bestimmt werden kann. Diese Bruchfläche wird genutzt, um beispielsweise die spezifische Bruchenergie nach RILEM zu ermitteln [102].

Die charakteristischen Elemente, die auf der Mesoebene betrachtet werden, sind Poren, Risse und die Kontaktzone zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung. Nach Mechtcherine [84] werden diese Elemente als homogen auf der Mesoebene idealisiert. Beobachtungen zu Bruchprozessen wie Rissverzweigung, Rissfortschritt, Rissgeschwindigkeit usw. lassen sich relativ genau beschreiben. Wenn Bruchflächen auf dieser Ebene betrachtet werden, muss eine dreidimensionale Erfassung erfolgen. Dadurch können Gesteinskörner, Krater von ausgezogenen Gesteinskörnern, Poren usw. berücksichtigt werden. Untersuchungen von Bruchflächen auf dieser Ebene wurden in verschiedenen Studien durchgeführt, z. B.: [21, 22, 24, 68, 69, 84 und 89].

Auf der Mikroebene werden die einzelnen Bestandteile des Betons heterogen dargestellt. Nach Hilsdorf et al. [65] können auf dieser Ebene Mikrorisse erkannt werden, die sich zu einem Makroriss verbinden können. Nach Mechtcherine [84] können diese Risse auf die Heterogenität der einzelnen Bestandteile des Betons zurückgeführt werden. Eine Analyse und genaue Beschreibung der Bruchflächen kann in dieser Ebene nur mit Hilfe der Mikroskopie erfolgen. Lange et al. [77] untersuchen die Oberflächenrauheit von Zementstein und Mörtel mittels konfokaler Mikroskopie. Andere Studien, die Bruchflächen bzw. -vorgänge auf dieser Ebene beschreiben, finden sich beispielsweise in [16, 43, 84, 125 und 136].

Bei der Beschreibung von Partikeln kommt zusätzlich zu den Betrachtungsebenen hinzu, dass die Partikel in sehr unterschiedlichen Größen vorliegen können (vom Nanometer- bis in den Zentimeterbereich). Das heißt, dass manche Partikel nur auf der Mikroebene untersucht werden können, während die Oberflächeneigenschaften größerer Partikel auf verschiedenen Betrachtungsebenen variieren können. Da eine Untersuchung jedes entstandenen Partikels unmöglich durchzuführen ist, kann eine Beschreibung der Partikel vereinfachend mit Hilfe der Partikelmesstechnik erfolgen. Die Größe der Partikel kann beispielsweise durch Siebverfahren bestimmt werden, vgl. Stieß [116]. Die Partikelform kann nach Zlatev [143] mit verschiedenen Methoden charakterisiert werden. Diese unterscheiden sich in manuelle / visuelle Methoden, Quantifizierungen durch Kornformkennzahlen oder mathematische Beschreibungen mit Formfunktionen.

In den folgenden Abschnitten werden einige bedeutende Kennwerte zur Beschreibung von Oberflächen und Partikeln näher erläutert.

2.3.2 Oberflächenkennwerte

2.3.2.1 Rauheit

Die Rauheit kennzeichnet die Struktur einer Oberfläche und ermöglicht ihre quantitative Beschreibung. Sie ist beim Beton vor allem bei Sanierungsaufgaben und Untersuchungen zum Haftverhalten unterschiedlicher Schichten von Bedeutung, vgl. [71, 94, 95, 106 und 141].

Die Rauheit ergibt sich aus dem Quotienten der gemessenen Oberfläche zur zweidimensionalen Grundfläche, vgl. Ortlepp [89]. Die Grundfläche kann praktisch aus den Querschnittsabmessungen des Probekörpers gewonnen werden. Die gemessene Oberfläche hängt von der Betrachtungsebene bzw. vom genutzten Messsystem und dessen Auflösung ab. Zur Verdeutlichung kann die Rauheit nach Reinecke [94] weiter unterteilt werden. Die größte zu messende Rauheit entspricht demnach der globalen Rauheit (0. Ordnung). Gestaltabweichungen 1. und höherer Ordnung gelten nach DIN 4760 [39] als lokale Rauheit. Diese kann wiederum in Makro- und Mikro- rauheit gegliedert werden (siehe Abbildung 2.3.2).

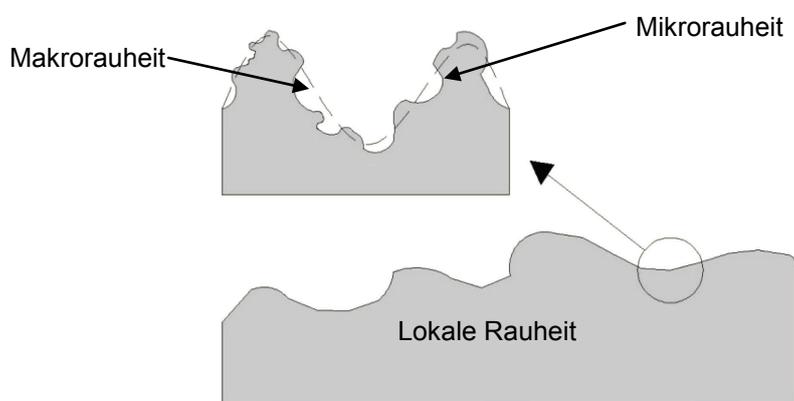


Abbildung 2.3.2: Makro- (gestrichelte Linie) und Mikrorauheit (durchgezogene Linie) nach Reinecke [94]

Zur Bestimmung der Rauheit können vergleichende, berührende und berührungslose Verfahren eingesetzt werden. Die größte Messgenauigkeit bieten dabei berührungslose Verfahren wie Lasermessungen oder Streifenprojektionsverfahren, vgl. Reinecke [94]. Mit unterschiedlichen Messverfahren werden durch deren Auflösung unterschiedliche Rauheiten ermittelt; daher ist es nach Ortlepp [89] zur Beurteilung einer Oberfläche erforderlich, die Messgenauigkeit der Rauheit zusätzlich mit anzugeben.

2.3.2.2 Fraktale Dimension

Ein Kennwert, bei dem die Auflösung bzw. die Genauigkeit des Messsystems keine Rolle spielt, ist die fraktale Dimension, vgl. [84 und 89]. Die fraktale Dimension geht auf die fraktale Geometrie nach Mandelbrot zurück, die sich mit der Selbstähnlichkeit bzw. Skaleninvarianz geometrischer Muster befasst [82]. Selbstähnliche Muster oder Körper weisen auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen dieselben oder ähnliche Strukturen auf. In der Natur gibt es unendlich viele solcher fraktalen Muster wie beispielsweise die Verästelung von Blutgefäßen oder Küstenlinien. Auch Betonbruchflächen sind fraktal. Ein viel zitiertes Beispiel, das die fraktale Dimension verdeutlicht, ist die Koch-Kurve, vgl. [13, 19, 49, 78, 84, 89 und 103]:

Ausgehend von einer Geraden der Länge $L(1) = 1$ wird diese im ersten Generierungsschritt durch vier Geraden der Gesamtlänge $L(1/3) = 4/3$ ersetzt, die in einem 60° -Winkel angeordnet werden (siehe Abbildung 2.3.3). Im folgenden Generierungsschritt wird diese Prozedur für jede der vier entstandenen Geraden wiederholt. Es ergeben sich 16 Geraden mit einer Gesamtlänge $L(1/9) = 16/9$. Nach unendlich vielen Generierungsschritten entsteht die Koch-Kurve. Diese hat eine unendlich große Gesamtlänge, während die Länge der einzelnen Strecken gegen Null tendiert.

Die Länge ist daher kein geeignetes Maß zur Beschreibung eines solchen Objekts, stattdessen kann die Hausdorf-Besicovitch Dimension genutzt werden, vgl. [49 und 84]. Diese ist nach Gleichung 2.7 bestimmbar.

$$D = \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\ln(N)}{\ln(1/l)} = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{\ln(N)}{\ln(s)} \quad \text{Gl. 2.7}$$

Nach Feder [49] beschreibt die Hausdorf-Besicovitch Dimension den exakten Wert der fraktalen Dimension eines selbstähnlichen Objekts. Für die Kochkurve ergibt sich $D = \ln(4)/\ln(3) = \ln(16)/\ln(9) = \dots = 1,26186$.

Nach Ortlepp [89] beschreibt eine ganzzahlige fraktale Dimension die geometrische Dimension. Eine Gerade ist beispielsweise in der herkömmlichen Geometrie eindimensional und besitzt die fraktale Dimension $D = 1$. Für einen Skalierungsfaktor von 10 ergeben sich 10 Streckenabschnitte der Geraden mit einem $1/10$ der Ursprungslänge. Folglich kann die fraktale Dimension aus $D = \ln(10)/\ln(10) = 1$ bestimmt werden.

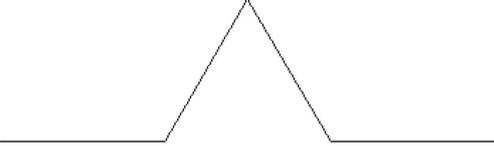
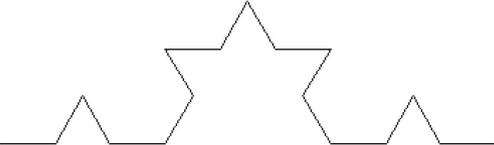
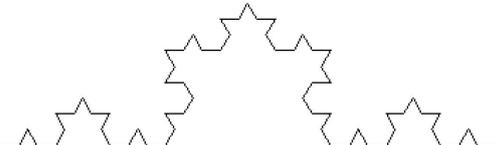
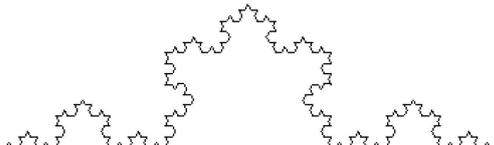
Abbildung	Streckenanzahl N	Streckenlänge l	Skalierungsfaktor s
	1	1	1
	4	1/3	3
	16	1/9	9
	64	1/27	27
	256	1/81	81

Abbildung 2.3.3: Generierung der Koch-Kurve in Anlehnung an Feder [49]

Die fraktale Dimension ist ein Kennwert zur Beschreibung der Oberfläche, der die Auflösung des Messsystems durch den Skalierungsfaktor berücksichtigt. Oberflächenanalysen und Beurteilungen des Betonbruchverhaltens mit Hilfe der fraktalen Geometrie sind in verschiedenen Studien vorgestellt worden, z. B.: [13, 16, 20, 21, 24, 68, 78, 83, 84, 89, 103, 132 und 134].

Die Bestimmung der fraktalen Dimension erfolgt durch die Entwicklung unterschiedlicher Methoden. Bei Untersuchungen von Betonbruchflächen werden vor allem die Box-Counting Methode und die Grid-Scaling Methode angewandt, z. B. in Mechtcherine [84].

Bei der Box-Counting Methode werden auf die betrachtete Kurve (z. B. ein Rissverlauf) Kästchennetze unterschiedlicher Feinheit gelegt, siehe Abbildung 2.3.4. Die Anzahl der Kästchen, die die Kurve schneiden, und der zugehörige Skalierungsfaktor werden in einem doppel-logarithmischen Diagramm eingetragen. Wenn die Werte-

paare eine Gerade bilden, handelt es sich um eine fraktale Kurve, deren fraktale Dimension aus der Steigung der Geraden berechnet werden kann. Um diese Methode auf Flächen anzuwenden, wurde sie zur Cube-Counting Methode weiterentwickelt [84]. Hier werden statt der Kästchennetze Würfelgitter unterschiedlicher Feinheit über die Fläche gelegt. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der fraktalen Dimension entspricht dann der der Box-Counting Methode.

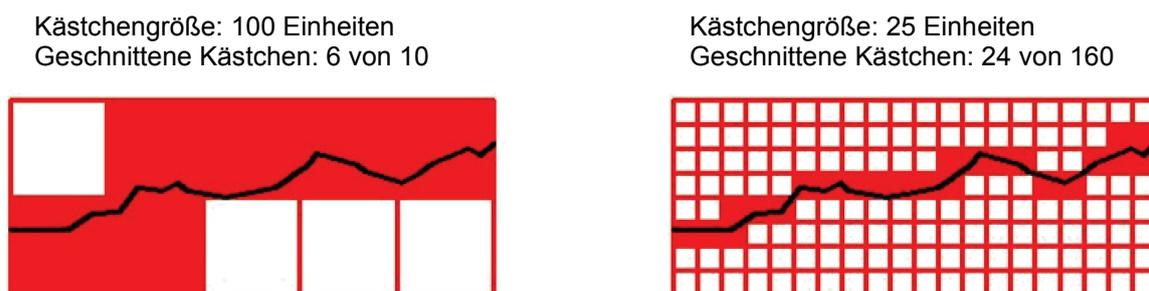


Abbildung 2.3.4: Unterschiedlich große Kästchen auf einem Riss (schwarz) zur Bestimmung der fraktalen Dimension mittels Box-Counting Methode, in Anlehnung an Carpinteri et al. [21]

Die Grid-Scaling Methode baut auf der Patchwork Methode auf. Nach dem Erfassen der Oberfläche sind die Koordinaten einzelner Punkte der Oberfläche bekannt. Liegen die Punkte in einem festen quadratischen Raster vor (z. B. in: [84 und 89]), entstehen durch Verbinden einzelner Punkte gleichmäßige Dreiecke. Für unterschiedliche Rasterfeinheiten wird die Summe der Dreiecksflächen bestimmt. Diese Flächen können in Abhängigkeit von der Rasterfeinheit in einem doppel-logarithmischen Diagramm dargestellt werden. Wie bei der Box-Counting Methode wird die Steigung der sich einstellenden Geraden genutzt, um die fraktale Dimension auszurechnen.

Mechtcherine [84] untersuchte mit beiden Methoden Bruchflächen von unterschiedlichen Betonen, siehe Abschnitt 2.1.6. Er stellte fest, dass die fraktalen Dimensionen aus beiden Methoden zwar in gleicher Größenordnung liegen (zwischen 2,029 und 2,060), die Werte der Cube-Counting Methode aber immer etwas größer waren. Bei diesen Werten wird auch eine größere Streuung festgestellt. Des Weiteren ist der Programmieraufwand der Cube-Counting Methode größer [84]. Andere Autoren wie Carpinteri et al. [20] sehen die fraktale Dimension von Betonbruchflächen in einer Größenordnung bis 2,29. Die fraktale Dimension wie auch die Rauheit variiert dabei mit veränderter Betonzusammensetzung und / oder anderen äußeren Betoneinflüs-

sen wie der Belastungsgeschwindigkeit in Folge eines geänderten Bruchverhaltens, vgl. [84 und 134].

2.3.3 Partikelkennwerte

2.3.3.1 Größenkennwerte

Nach Stieß [116] sind alle Eigenschaften, die mit der Größe eines Partikels zusammenhängen, Feinheitsmerkmale. Zu diesen zählen direkte geometrische Abmessungen, statistische Längen, geometrische und physikalische Äquivalentdurchmesser und spezifische Oberflächen. Direkte geometrische Abmessungen können meist nur dann als charakteristisch für einen Partikel angesehen werden, wenn es sich um regelmäßig geformte Partikel handelt (z. B.: Durchmesser einer Kugel). Statistische Längen werden aus den Projektionen von Bildauswerteverfahren gewonnen. Da die Projektionen der Partikel durch die zufällige Lage der Partikel im Untersuchungsgerät beeinflusst werden, können sich diese Längen selbst bei zwei gleichen Partikeln unterscheiden. Zu den statistischen Längen gehört der Feretdurchmesser. Allgemein wird unter dem Feretdurchmesser die „senkrechte Projektion des Partikelbildes in Messrichtung auf einer Geraden (Das ist trotz der Bezeichnung kein Durchmesser!), [...]“ [116, Seite 13] verstanden. Als Äquivalentdurchmesser wird ein Durchmesser eines regelmäßigen Körpers (meist einer Kugel) bezeichnet, der die gleichen Eigenschaft wie das betrachtete unregelmäßige Partikel besitzt. Ein geometrischer Äquivalentdurchmesser ist beispielsweise der Durchmesser einer zum Partikel volumengleichen Kugel; ein physikalischer Äquivalentdurchmesser ist z. B. der Durchmesser einer Kugel mit gleicher Sinkgeschwindigkeit [116].

Die Erfassung von Größenkennwerten kann mit manuellen Messmethoden, mit automatisierten Bildauswerteverfahren, Sedimentationsanalysen oder Laserbeugungsverfahren erfolgen, vgl. Stark [115]. Für Untersuchungen einer großen Anzahl an Partikeln unterschiedlichster Größe (Beschussfragmente) sind automatisierte Bildauswerteverfahren am geeignetsten. Des Weiteren ist mit Bildauswerteverfahren „eine Quantifizierung der Partikelform zur Charakterisierung der Makro- und Mesogestalt möglich“ [143, Seite 24]. Bildauswerteverfahren werden vor allem bei der Qualitätskontrolle von Produkten wie Sand und Kies angewandt, vgl. Unland et al. [118]. In anderen Studien werden diese Verfahren genutzt, um Korngrößenverteilungen von Sand und Brechsand zu bestimmen [15 und 75]. Die Ergebnisse dieser Stu-

dien zeigen eine gute Übereinstimmung von Kornformverteilungen klassischer Siebanalysen mit denen aus fotooptischen Bildaufnahmeverfahren. Die Kenngröße, die mit dem Siebdurchgang der Siebanalyse verglichen wird, ist der minimale Feretdurchmesser. Unter dem minimalen Feretdurchmesser $x_{\min, \text{Fer}}$ wird der kleinstmögliche Abstand zwischen zwei parallelen Tangenten der Partikelkontur unabhängig von der Messrichtung verstanden; senkrecht zu diesem Kennwert steht die Länge l_{Fer} (\neq der maximalen Länge), siehe Abbildung 2.3.5. Weitere statistische Längen sind für diese Arbeit nicht von Bedeutung.

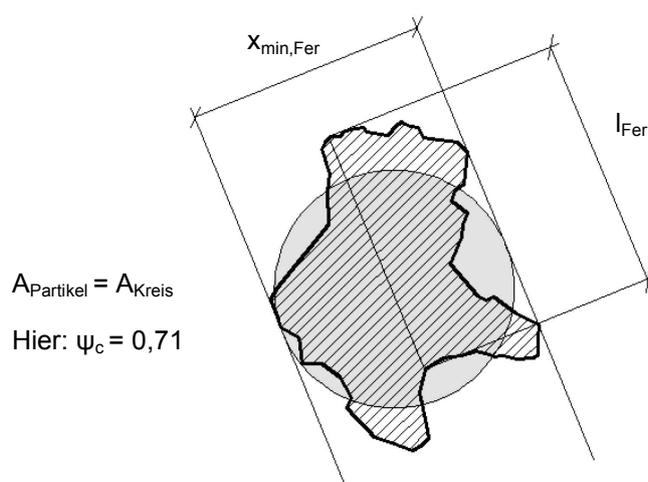


Abbildung 2.3.5: Minimaler Feretdurchmesser und senkrecht dazu stehende Länge in Anlehnung an [116]

2.3.3.2 Formkennwerte

In [143] zeigt Zlatev verschiedene Möglichkeiten der Kornformcharakterisierung. Zu diesen zählen:

- verbale Beschreibungen,
- mathematische Formfunktionen und
- Formfaktoren.

Verbale Beschreibungen beschränken sich nach visueller Beurteilung auf Bezeichnungen wie „kugelig“, „rund“, „plattig“ usw.

Mathematische Formfunktionen versuchen die Umrisslinien der Partikel und die darin enthaltenen Forminformationen zu nutzen. Sie werden an Hand ihrer Konturdarstellung in Radius-Winkel Funktionen, Sehnen-Winkel Funktionen und Tangenten-Winkel Funktionen unterschieden, vgl. Zlatev [143]. Nach E DIN ISO 9276 [35] verlangen

diese Funktionen eine relativ hohe Auflösung der Partikelabbilder. Dazu können Elektronen- oder Lichtmikroskope eingesetzt werden.

Nach Stieß [116] ist die Beschreibung der Kornform mit einer Vielzahl an Formfaktoren möglich. Zlatev spricht in diesem Zusammenhang von über 2000 verschiedenen Formfaktoren. Formfaktoren sind im Allgemeinen dimensionslose Größen, die aus dem Verhältnis zweier unabhängig voneinander gemessenen Partikelgrößen bestimmt werden [143]. Einer dieser Formfaktoren, der die Rundheit der Partikel charakterisiert, ist die Zirkularität ψ_c . Sie ist definiert als der Quotient des Umfangs eines projektionsflächengleichen Kreises zum tatsächlichen Umfang der Partikelprojektion, siehe Abbildung 2.3.5. Die Zirkularität ist damit immer ≤ 1 (= 1 für einen kreisrunden Partikel). Stieß weist darauf hin, dass diese Definition nicht einheitlich verwendet wird. Neben ψ_c werden auch ihr Kehrwert oder ihr Quadrat zur Beurteilung der Partikelform angegeben [116]. Die notwendigen Partikelgrößen zur Berechnung der Zirkularität (oder anderer Formfaktoren) werden mit automatisierten Bildauswerteverfahren ermittelt.

2.3.4 Zusammenfassung und Anwendung in dieser Arbeit

Bei Beschreibungen von Bruchflächen muss die Betrachtungsebene berücksichtigt werden. Unterschieden werden die Makro-, Meso- und Mikroebene nach Wittmann [129]. Die meisten Untersuchungen finden auf der Mesoebene statt, in der Zementstein, Gesteinskörner, Poren und die meisten Risse einzeln dargestellt werden können. Dabei werden die Rauheit und die fraktale Dimension zur Beurteilung der Oberfläche herangezogen. Während die Rauheit ein skalenabhängiger Kennwert ist, gilt die fraktale Dimension als weitgehend unabhängig von der Betrachtungsebene und der Auflösung des Messsystems. Bei der Bestimmung der fraktalen Dimension kann aber von einem Einfluss der Berechnungsmethode auf diesen Kennwert ausgegangen werden. Die Eignung der fraktalen Dimension sollte daher verifiziert werden.

Die Fragmente bzw. Partikel, die in Folge des Beschusses entstehen, können mit Hilfe der Partikelanalyse beschrieben werden. Auf Grund der erwarteten großen Anzahl an Partikeln unterschiedlicher Größe bietet sich für die eigene Untersuchung ein automatisches Bildauswerteverfahren an, das sowohl Größenkennwerte als auch Formkennwerte ermittelt. Ein geeigneter Kennwert zur Größenklassifizierung von

Partikeln ist der Feretdurchmesser; zur Beschreibung der Partikelform kann die Zirkularität genutzt werden. Diese beschreibt die Rundheit der Partikel.

2.4 Offene Fragen

Die Bruchmechanik bietet vielfältige Möglichkeiten, Risse und Brüche des Betons zu beschreiben. Die Untersuchung unterschiedlicher Einflüsse auf bruchmechanische Kennwerte kann als gut erforscht gelten. Aus den bekannten Studien wird aber auch deutlich, dass die Bruchenergie bzw. spezifische Bruchenergie keine Materialkonstante ist, sondern sich durch unterschiedliche Einflüsse ändert. Daher muss erst die Bruchenergie des Betons für einen zu untersuchenden Einfluss ermittelt werden, bevor bruchmechanische Ergebnisse in andere Forschungsbereiche übertragen werden können. Zur Bestimmung der Bruchenergie bei quasi-statischer Belastung kann auf normierte Versuche zurückgegriffen werden.

Vor dem Versagen eines Probekörpers entstehen in Folge der Belastung Trennrisse, deren Entwicklung und Ausbreitung vielfach beschrieben wurde. Die aus diesen Studien gewonnenen Erkenntnisse können zum Teil genutzt werden, um die entstehenden Bruchflächen zu erklären. Trennrisse bzw. Bruchflächen entstehen durch Bruchenergie. Folglich stehen Bruchenergie und Bruchfläche in einem Zusammenhang, mit dem das Bruchverhalten des Betons charakterisiert werden kann. Eigene Untersuchungen sollen der Frage nachgehen, wie ein solcher Zusammenhang für verschiedene Einflüsse aussehen kann. Dazu können neue Messsysteme und -methoden den bisherigen Stand der Forschung bestätigen und ergänzen.

Bruchflächen entstehen auch in Folge lokaler, dynamischer Einwirkungen von Projektilen. Sie können als Schädigung des Zielobjekts angesehen werden. Bekannte Studien nutzen meist die Größe des Ausbruchkraters oder die Eindringtiefe als Maß der Schädigung. Eine einheitliche Definition der Schädigung existiert nicht. In der eigenen Arbeit soll untersucht werden, wie groß die durch den Beschuss entstandene Bruchfläche nach Perforation des Probekörpers ist. Dabei soll die Bruchfläche der aus dem Ausbruchkrater gelösten Fragmente berücksichtigt werden, um ein umfassendes Schädigungskriterium zu erhalten. Kennwerte aus der Partikelanalyse können genutzt werden, um die Fragmentgröße und -form zu beurteilen. Aus diesen Kennwerten soll ein Modell zur Beschreibung der Fragmentoberfläche entwickelt werden.

Die zur Entstehung von Bruchflächen notwendige Energie wird durch die kinetische Energie des Projektils bei der Einwirkung auf das Zielobjekt übertragen. Inwieweit Rückschlüsse aus Erkenntnissen bruchmechanischer Untersuchungen auf ballistische Bruchprozesse angewandt werden können, soll in der eigenen Arbeit untersucht werden. Auf einen energetischen Ansatz von Dinovitzer et al. [42] kann aufgebaut werden. Darin wird die Differenz der kinetischen Energie des Projektils vor und nach der Perforation des Zielobjekts in Verformungsenergie, Bruchenergie und kinetische Energie der Fragmente dissipiert. Weitere energetische Modelle sind dem Autor nicht bekannt. Viele ballistische Modelle zur Beschreibung des Eindringverhaltens berücksichtigen die Energie der Projektile aber indirekt, d. h. in diesen Modellen wird die Einwirkung beispielsweise durch die Projektilmasse und / oder die Prüfgeschwindigkeit beschrieben. Die Auswirkungen auf eine Schädigungsgröße durch unterschiedliche Projektile ist in verschiedenen Studien umfangreich beschrieben worden, so dass in der eigenen Arbeit keine weitere Variation der Projektile vorgenommen werden soll.

Untersuchungen von Normalbeton auf seinen Widerstand gegen Beschuss sind bisher kaum veröffentlicht worden. Ein Grund dafür kann darin gesehen werden, dass im Allgemeinen eine hohe Betondruckfestigkeit den Widerstand gegen Beschuss verbessert. Um widerstandsfähige Betone für praktische Anwendungen zu erhalten, wurden Betonzusammensetzungen dahin gehend optimiert und Sonderbetone mit hoher Druckfestigkeit bevorzugt eingesetzt. Ob die Druckfestigkeit das Betonverhalten infolge lokaler, dynamischer Einwirkungen ausreichend genau charakterisiert, muss in eigenen Untersuchungen überprüft werden. Dazu werden grundlegende Einflüsse von Normalbetonen in Beschussuntersuchungen unter Berücksichtigung der Bruchfläche und Bruchenergie beurteilt.

3 Angewandte Untersuchungen und Methoden

3.1 Versuchsprogramm

Durch das Versuchsprogramm sollen verschiedene Betone und Einflüsse auf ihren Beschusswiderstand mit Hilfe von bruchmechanischen und ballistischen Untersuchungen geprüft werden. Die Literatur zur Bruchmechanik dokumentiert bereits viele Einflüsse auf die Bruchenergie (siehe Abschnitt 2.1.6), zeigt aber deutliche Defizite bei der Beschreibung der entstandenen Bruchflächen. Die eigenen bruchmechanischen Untersuchungen werden daher um eine Bruchflächenanalyse erweitert. Die ballistischen Untersuchungen dieser Arbeit beinhalten lokale, dynamische Untersuchungen (Beschuss).

In dieser Arbeit werden der w/z -Wert und der Größtkorndurchmesser des Betons variiert. Außerdem wird der Einfluss des Betonalters, der Lagerung sowie der Prüfgeschwindigkeit untersucht. Eine detailliertere Beschreibung der Einflüsse sowie die zugehörigen Versuchsergebnisse finden sich in Abschnitt 4. Die angewandten Untersuchungen und Methoden werden in den folgenden Abschnitten beschrieben.

3.2 Bruchmechanische Untersuchung

3.2.1 Einführung

Die spezifische Bruchenergie G_F kann mit bruchmechanischen Untersuchungen bestimmt werden. Dieser Materialkennwert gibt an, wie viel Energie beim Bruch eines Probekörpers freigesetzt wird (siehe Abschnitt 2.1.4). In dieser Arbeit wird zur Ermittlung der spezifischen Bruchenergie der 3-Punktbiegezugversuch nach einer Empfehlung von RILEM angewandt [102]. Aus der Literatur bekannte Einflussfaktoren auf die spezifische Bruchenergie werden verifiziert und ergänzt. Gleichzeitig wird diese Energiebetrachtung durch eine dreidimensionale Analyse der jeweils entstandenen Bruchflächen ergänzt.

3.2.2 Probekörper

Die Probekörper in Form von quaderförmigen Balken haben nach RILEM [102] die Abmessungen $100 \cdot 100 \cdot 840$ mm. Diese Abmessungen gelten für Betone mit einem maximalen Größtkorn von 16 mm. Die Probekörper werden nach dem Ausschalen bis zur Prüfung am 28. Tag bzw. 91. Tag nach DIN EN 12390 [41] unter Wasser ge-

lagert. Ausgenommen von dieser Lagerung sind die Probekörper für die Untersuchung des Einflussfaktors „Lagerung“, die nach 7 Tagen aus dem Wasserbad in ein Normklima (20 °C / 65 % rel. Luftfeuchtigkeit) umgelagert werden. Unmittelbar vor der Prüfung werden die Balken mittig 50 mm tief nass gesägt, so dass sich eine Querschnittsfläche im Bruchbereich von 50 · 100 mm ergibt. Die Kerbe ist 5 mm breit.

3.2.3 Aufbau und Durchführung

Die Untersuchungen finden an einer Prüfmaschine Inspect Table 50 kN der Firma Hegewald & Peschke statt. Eine ausreichend gute Auflösung der Belastung ist durch den geringen Lastbereich der Maschine während der Versuche sichergestellt. Die Prüfgeschwindigkeit beträgt 0,025 mm/s und wird nur in den Untersuchungen zum Einflussfaktor „Prüfgeschwindigkeit“ verändert. Damit ist die Vorgabe aus RILEM [102] erfüllt, dass die maximale Kraft nach 30 bis 60 s erreicht werden soll. Die Stützweite der Probekörper beträgt 800 mm und die Lagerung erfolgt auf gelenkig gelagerten Rollen. Zur Messung der Rissöffnung am Kerbgrund werden an den Probekörpern rechts- und linksseitig induktive Wegaufnehmer (Fa. RSS Elektronik) mit einer maximalen Messlänge von 12 mm angebracht (siehe Abbildung 3.2.1).

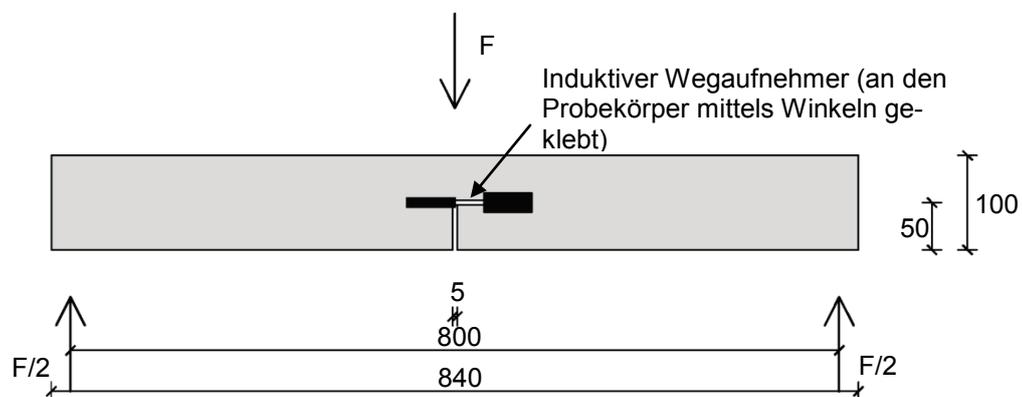


Abbildung 3.2.1: Versuchsaufbau; Probekörper und Messtechnik (Abmessungen in mm)

Die Bestimmung der spezifischen Bruchenergie erfolgt nach Gleichung 3.1 analog zu RILEM [102].

$$G_F = \frac{(W_0 + m \cdot g \cdot \delta_0)}{A_{lig}} \quad \text{Gl. 3.1}$$

Die Umsetzung der Gleichung und die Korrektur des Einflusses der Schwerkraft durch die nach unten gerichtete Einzellast werden direkt in der Software der Prüfmaschine umgesetzt.

3.3 Ballistische Untersuchung

3.3.1 Einführung

Ziel der Untersuchung ist die Ermittlung der vom Probekörper aufgenommenen Energie, die aus der Projektilgeschwindigkeit abgeleitet werden kann, und der entstandenen Schädigung (Bruchfläche) des Probekörpers. Die Ermittlung der Größe der entstandenen Bruchfläche wird in Abschnitt 3.4 ausführlich erläutert.

Die ballistischen Untersuchungen wurden an der wissenschaftlichen Einrichtung „Ballistik, Waffen und Munition“ der Universität der Bundeswehr München durchgeführt.

3.3.2 Probekörper und Munition

Die Anforderungen an die Geometrie der Probekörper bestehen darin, Effekte aus der Einspannung zu vermeiden. Des Weiteren müssen die Probekörper groß genug sein, um die Ergebnisse auch auf größere Bauteile anwenden zu können. Die in dieser Arbeit genutzte Probekörpergeometrie wird auf Grund der Ergebnisse aus Vorversuchen gewählt, die separat veröffentlicht sind [u.a. 81]. Die quadratische Grundfläche, auf die das Projektil trifft, ist 300 · 300 mm groß. Die Plattendicke wird mit 50 mm so gewählt, dass bei allen Versuchen eine Perforation erreicht werden konnte. Die Perforation ist notwendig, um den Energieverlust des Projektils zu bestimmen.

Die Probekörper werden im Labor des „Instituts für Werkstoffe des Bauwesens“ der Universität der Bundeswehr München hergestellt und bis zur Prüfung nach 28 Tagen unter Wasser gelagert [41]. Ausgenommen von dieser Lagerung sind auch hier die Probekörper für die Untersuchung des Einflussfaktors „Lagerung“ (siehe Abschnitt 3.2.2).

Als Munition werden Hartkerngeschosse mit einem Wolframkarbidkern (MEN 7,62 mm x 51, 9,5 Hartkern (DM151)) verwendet. Die Projektile haben eine Länge von 51 mm und einen Durchmesser von 7,62 mm bei einer Masse von 9,5 g. Die Munition wird als panzerbrechende Munition eingesetzt; sie gilt als Spezialmunition der Bundeswehr. Im Einsatz wird sie mit dem Gewehr HK G3 oder mit dem Maschi-

nengewehr MG 3 verschossen und kann nach PTI [91] bis zu 400 m Entfernung die Schutzwestenklasse IV durchschlagen.

3.3.3 Aufbau und Durchführung

Der Beschusskanal des Labors „Ballistik, Waffen und Munition“ der Universität der Bundeswehr ist so ausgerüstet, dass verschiedene Waffen und Munition geprüft werden können. 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. Die Variation der Mündungsgeschwindigkeit des Projektils ist durch das Verschieben des Messwaffensystems sowie durch unterschiedlich zu öffnende Messbohrungen möglich. Das modifizierte Verschlussystem besteht aus einem Verschluss Karabiner 98.

Zwischen dem Messlauf und dem Probekörper (Abstand zueinander 8,1 m) befinden sich Lichtschranken (LS), die die Mündungsgeschwindigkeit und die Geschwindigkeit des Projektils vor dem Auftreffen auf den Probekörper messen (siehe Abbildung 3.3.1). 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.

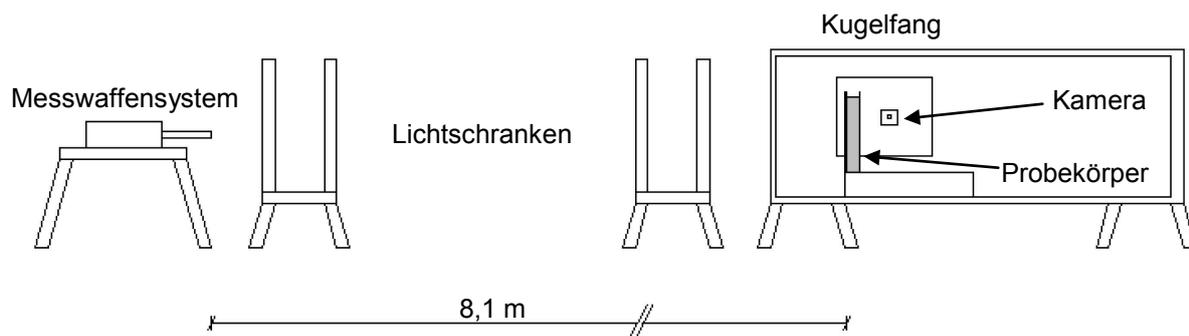


Abbildung 3.3.1: schematischer, nicht maßstäblicher Aufbau des Beschusskanals (Seitenansicht)

Die Probekörper sind in einem Stahlrahmen eingespannt (Abbildung 3.3.2), der an einem Kugelfang fest verspannt wird. Der Kugelfang ist ein Stahlkasten (Stahldicke: 8 mm) mit den Abmessungen 710 · 710 · 2000 mm, der auf der einen Seite als Schutz dient, da die Projektile in ihm gefangen werden; andererseits kann er genutzt werden, um den Großteil der beim Durchschuss entstehenden Partikel (mindestens

zwei Abmessungen ≤ 25 mm) und Bruchstücke (mindestens zwei Abmessungen > 25 mm) sicher zu stellen. An seiner Vorderseite befindet sich eine etwa kreisrunde, im Durchmesser 150 mm große Öffnung, durch die das Projektil eintritt. Seitlich am Kugelfang steht eine digitale Spiegelreflexkamera hinter einem $200 \cdot 200$ mm großen „Fenster“. Hierbei handelt es sich um eine Canon 450 D mit einer Brennweite von 24 - 70 mm und einer Blende F 5,6.

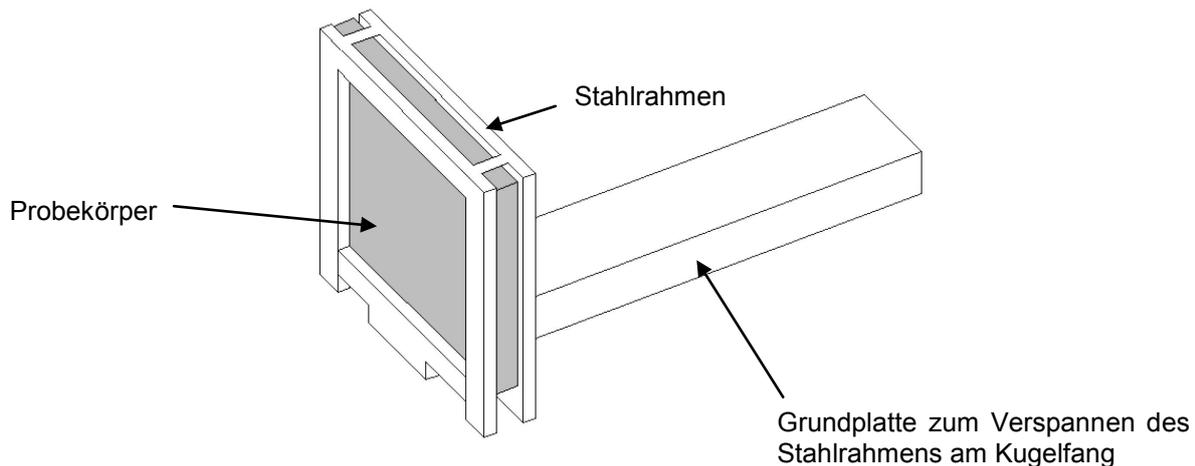


Abbildung 3.3.2: Probekörper eingespannt in dem Stahlrahmen

Abbildung 3.3.3 zeigt die Signalübertragung im Beschusskanal. Nach der Auslösung 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 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. Zu diesem Zeitpunkt hat das Projektil den Probekörper durchschlagen und ist auf dem Foto zweimal zu erkennen.

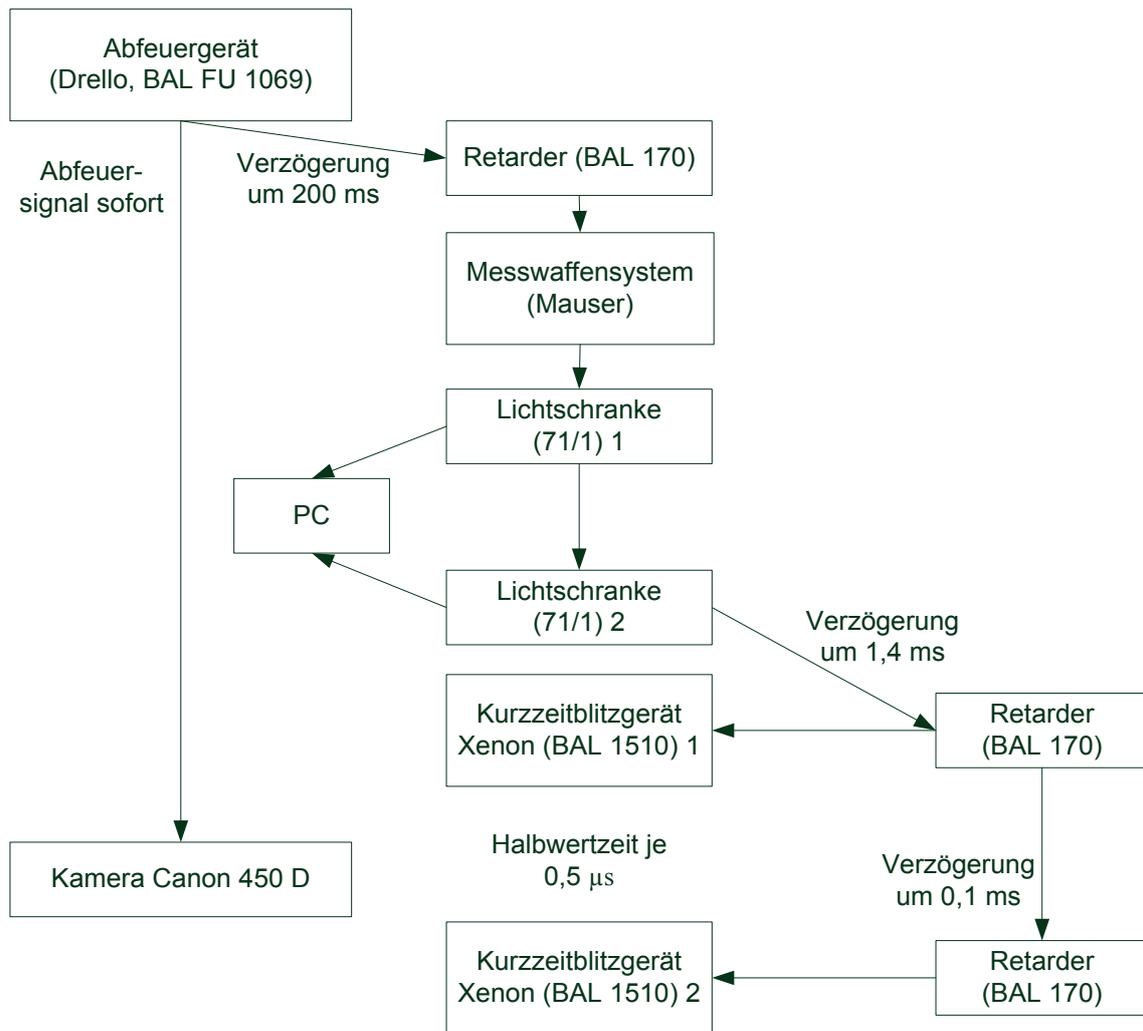


Abbildung 3.3.3: Signalplan im Beschusskanal

Nach dem Beschuss werden die Partikel und Bruchstücke im Kugelfang und in einem Umkreis von 3 m um den Kugelfang herum mit einem handelsüblichen Sauger eingesammelt. Dadurch sollen möglichst alle Partikel / Bruchstücke aufgenommen werden. Der Vergleich der Massen der aufgenommenen Partikel und Bruchstücke mit den ursprünglichen Massen der beschossenen Proben findet sich in Abschnitt 4.4. Die Ermittlung der Massen und Abmessungen sowie die bildliche Dokumentation erfolgt jeweils zeitnah vor Ort.

3.3.4 Ermittlung der Bruchenergie

Nach dem Energieerhaltungssatz geht Energie nicht verloren, sondern wird in andere Formen umgewandelt. Folglich muss die Differenz der kinetischen Energie des Projektils vor und nach der Perforation in eine andere Energieform übergehen. Thermische Energie (durch Aufheizen des Projektils und des Probekörpers) und Schall-

energie können als vernachlässigbar klein angenommen werden, so dass die Energiedifferenz für die Entstehung von Oberflächen (Platte und Projektil) und die Bewegung der Partikel und Bruchstücke verantwortlich ist. Die kinetische Energie des Projektils ergibt sich aus Gleichung 3.2. Es gilt demnach, die Geschwindigkeit des Projektils $v_{\text{Projektil}}$ vor und nach der Perforation zu bestimmen.

$$E_{\text{kin,Projektil}} = 0,5 \cdot m_{\text{Projektil}} \cdot v_{\text{Projektil}}^2 \quad \text{Gl. 3.2}$$

Die Geschwindigkeit vor dem Auftreffen auf die Platte wird durch die Lichtschranken bestimmt (vgl. Abschnitt 3.3.3). Die Geschwindigkeit nach dem Durchschlagen der Platte kann aus dem Foto mit der Doppelbelichtung bestimmt werden. Die Verzögerungszeit der Blitze ist bekannt (100 μs), der Abstand des Projektils zwischen Blitz 1 und Blitz 2 kann im Bild vermessen werden. Dazu wird ein im Kugelfang vorab fotografiertes Lineal genutzt. Abbildung 3.3.4 zeigt ein typisches doppelt-belichtetes Foto mit Lineal. Neben der Abbildung des Projektils im linken Bereich des Bildes ist die Ausbildung einer Partikelwolke zu erkennen. Die Partikel stammen aus dem Ausbruchkrater des Probekörpers, der rechts vom Bildrand steht. Durch die Doppelbelichtung wird auch die Partikelwolke zu zwei Zeitpunkten in einem Bild abgelichtet. Zu erkennen ist, dass sich die maximale Ausdehnungsfront der Partikel mit der gleichen Geschwindigkeit bewegt wie das Projektil.

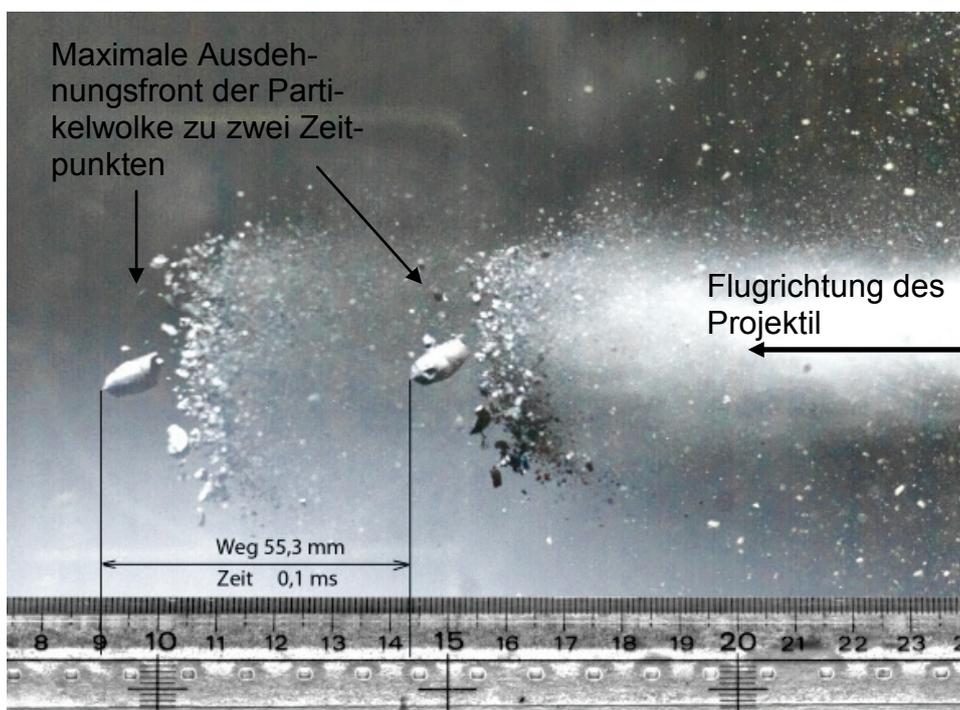


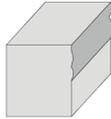
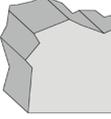
Abbildung 3.3.4: Doppelt belichtetes Foto mit Lineal zur Vermessung des zurückgelegten Weges des Projektils

3.4 Oberflächenuntersuchung

3.4.1 Einführung

Die entstehenden Oberflächen aus den bruchmechanischen und ballistischen Untersuchungen sind sehr verschieden, so dass unterschiedliche Verfahren und Methoden eingesetzt werden müssen. Dabei werden zwei Betrachtungsebenen an Hand der Größe der zu vermessenden Probekörperbereiche unterschieden – die Mikro-Meso-Ebene und die Meso-Makro-Ebene. Innerhalb der Mikro-Meso-Ebene werden alle Partikel (≤ 25 mm) untersucht; hierbei wird ein Camera Particle Analyzer (CPA) eingesetzt. Die Meso-Makro-Ebene umfasst alle Probekörperbereiche, die in ihrer kleinsten Abmessung größer als 25 mm sind. In dieser Ebene werden drei Verfahren bzw. Methoden angewandt: ein 3D-Laserscannerverfahren, ein fotografisches Verfahren und ein Scannerverfahren. Einen Überblick über die im Folgenden beschriebenen Verfahren und die untersuchten Oberflächen gibt Tabelle 3.4.1.

Tabelle 3.4.1: Übersicht der angewandten Oberflächenuntersuchungen

Probekörper aus der Untersuchung zur	Bruchmechanik: Balken	Ballistik: Beschussplatte		
		Masse > 350 g	Masse \leq 350 g	
Makro-Meso-Ebene (> 25 mm):				
- 3D Laserscanner	✓	✓	✓	
- Fotografisches Verfahren			✓	
- Scannerverfahren				✓
Meso-Mikro-Ebene (≤ 25 mm):				
- Camera Particle Analyzer		✓		

Im Anschluss an die Beschreibung der Verfahren wird die Berechnung der Oberflächen näher erläutert. Hierbei wird vor allem die Komplexität der Zusammensetzung der Gesamtbruchfläche innerhalb der ballistischen Untersuchung deutlich. Die Auswirkung der untersuchten Einflussparameter auf die Bruchfläche werden neben der Änderung der Bruchfläche selbst durch weitere Oberflächenkennwerte (Rauheit, fraktale Dimension) gezeigt.

3.4.2 Methoden der Meso-Mikro-Ebene

3.4.2.1 Einführung

Die Meso-Mikro-Ebene bezeichnet in dieser Arbeit den Größenbereich aller Partikel kleiner 25 mm. Die Partikel werden durch Siebung klassifiziert. Ziel dieser Untersuchung ist die Bestimmung der Korngrößenverteilung sowie der Kornformparameter (siehe Abschnitt 2.3.3) zur Entwicklung eines Partikelmodells. Aus diesem wird dann die Oberfläche der Partikel bestimmt. Dazu wird ein fotooptisches Verfahren zur Partikelanalyse angewandt, dessen Grundlage die digitale Bildverarbeitung ist. Im Folgenden wird der hier genutzte CPA vorgestellt.

3.4.2.2 Camera Particle Analyzer

Aufbau und Durchführung

Der Haver CPA 2-1 [59] besteht aus einem Trichter, in den die Probe eingefüllt wird, einer Vibrationsrinne, über die die Probe mit automatisch angepasster Geschwindigkeit läuft, einer CCD-Kamera (Charge-Coupled Device) zur Aufnahme der Schattenprojektion und einem Gegenlicht zur Schattenerzeugung. Die Partikel fallen durch Vibration von der Rinne zwischen Gegenlicht und Kamera hindurch. Sie werden von der hochauflösenden digitalen Zeilenkamera mit einer Aufnahmefrequenz von bis zu 28000 Zeilen-Scans pro Sekunde aufgenommen, vgl. Homepage Haver & Boker [58]. Hierbei wird die Geschwindigkeit der Vibrationsrinne und damit des zugeführten Materials durch die optische Dichte gesteuert. Die optische Dichte ist ein Maß für die mittlere Anzahl an registrierten Sehnen pro Zeile innerhalb eines Bildes. Als Grundeinstellung wird die vom Hersteller empfohlene Standardeinstellung mit einer minimalen und maximalen optischen Dichte zwischen 0,5 und 2,0 gewählt. Varianten mit anderen minimalen und maximalen optischen Dichten wurden in Vorversuchen überprüft, erbrachten aber weder eine Leistungsoptimierung (kürzere Durchlaufzeiten) noch Änderungen in den Ergebnissen. Aus den Zeilen-Scans werden von der Software der CPA Endlos-Datensätze zusammengesetzt. Gleichzeitig werden die Schattenprojektionen der Partikel während des Messvorgangs ausgewertet. Es wird jedes Partikel im Korngrößen-Messbereich erfasst und in die Größen- und Formanalyse einbezogen. Eine doppelte Erfassung durch überlappende Einzelbilder ist ebenso ausgeschlossen wie eine Teilbereichserfassung oder Fehlmessungen angeschnittener Partikel, vgl. Homepage Haver & Boker [58]. Die Einordnung eines Partikels in

eine Kornklasse erfolgt mit dem minimalen Feretdurchmesser (= „Breite“, siehe Abschnitt 2.3.3). Diese Einordnung hat sich nach Vorversuchen und Rücksprache mit dem Hersteller als günstig erwiesen. Die gewählte Siebreihe der Kornklassen entspricht der R20/3 nach DIN ISO 565 [33]. Der CPA liefert für jede Kornklasse Mittelwerte des minimalen Feretdurchmessers, des Kehrwerts der Zirkularität und des Längen zu „Breiten“-Verhältnisses. Außerdem werden Absolutwerte der Anzahl der Partikel und des Volumens jeder Kornklasse ausgewertet. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 3.4.1 dargestellt.

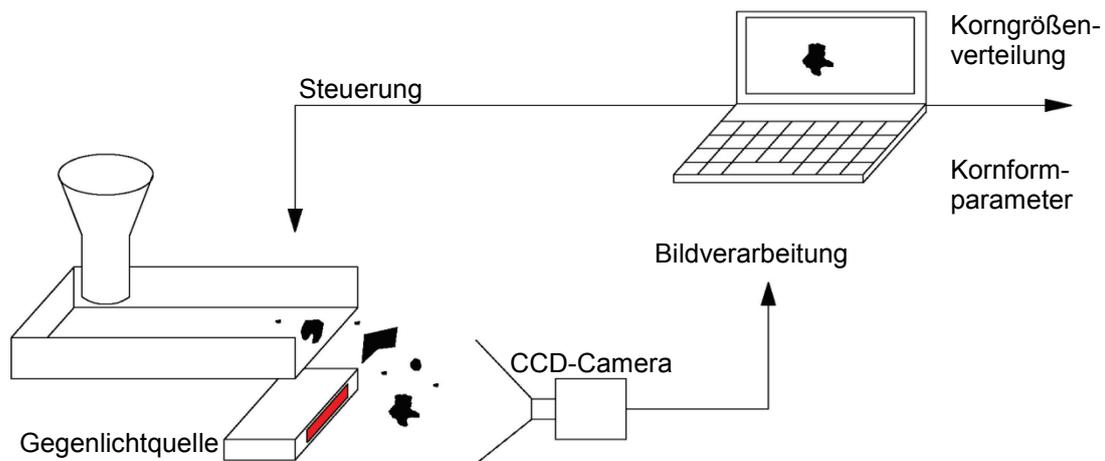


Abbildung 3.4.1: Schematischer Versuchsaufbau in Anlehnung an Breitenbücher [15]

Anwendbarkeit

Der CPA wird hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse und der Vergleichbarkeit mit einer herkömmlichen Siebanalyse untersucht. Die Ergebnisse hierzu finden sich im Anhang „erweiterte Untersuchungen“.

3.4.3 Methoden der Makro-Meso-Ebene

3.4.3.1 Einführung

In der Makro-Meso-Ebene werden in dieser Arbeit die Bruchflächen / Bruchstücke beschrieben, deren kleinste Abmessung größer als 25 mm ist. Darunter fallen:

- die entstandenen Bruchflächen aus den Versuchen der Bruchmechanik,
- die entstandenen Bruchflächen der Ausbruchkrater ganzer Platten,
- die Bruchstücke, die beim Auseinanderbrechen der Platten entstehen und
- die abgeplatzten Bruchstücke aus dem Krater (> 25 mm).

Gesucht wird eine möglichst genaue Beschreibung der Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene. Dieses Ziel soll mit Hilfe der in diesem Abschnitt geschilderten Methoden erreicht werden.

3.4.3.2 Laserscanner

Prinzip und Aufbau

Der Laserscanner DAVID 3D ist ein sogenanntes Low-Cost Laserscannersystem, das an der TU Braunschweig entwickelt wurde. Die Funktionsweise basiert auf der Lasertriangulation und ist in Winkelbach et al. [127] veröffentlicht worden. Der Aufbau des Laserscannersystems setzt sich wie folgt zusammen: zwei Ebenen in einem 90 °-Winkel, ein Kalibriermuster, eine Kamera (hier: Sony Digital Handycam DCR-TRV60E), ein Linienlaser (hier: 532 nm, 5 mW Laser Klasse 1, 2.7 - 3.3, 16 · 65 mm, 90 °) und die Software DAVID 3D (hier: Version 2.5.3). Abbildung 3.4.2 zeigt, wie die einzelnen Komponenten anzuordnen sind.

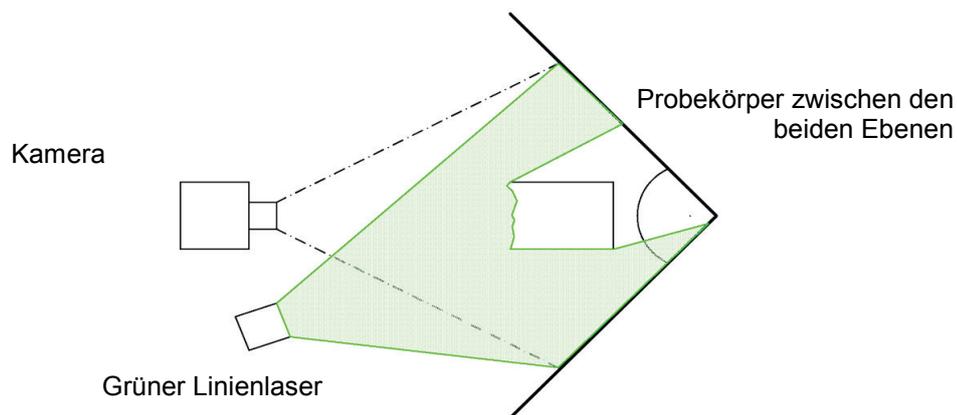


Abbildung 3.4.2: Versuchsaufbau Laserscannersystem DAVID 3D

Durchführung und Einstellungen

Vor dem Scannen wird die Software mit Hilfe des Kalibrierusters auf die Umgebung eingestellt. Dadurch werden die Lage und Ausrichtung der Kamera und ihre inneren Parameter (Brennweite, Linsenverzerrungen) bestimmt, vgl. Homepage David-Laserscanner [32]. Der Probekörper wird anschließend mittig zwischen den beiden Ebenen angeordnet. Es werden folgende Flächen gescannt:

- die Bruchflächen der Balken aus der Bruchmechanikuntersuchung und
- die Ausbruchkrater auf der Vorder- und Rückseite der Platten aus der Beschuss-Untersuchung.

Neben den Bruchflächen wird eine Ebene zur fraktalen Analyse gescannt (siehe Abschnitt 3.4.4.2), die lotrecht zur Belastungsrichtung steht.

Die Entfernung der Probekörper zur Kamera beträgt etwa 2,5 m. Der Linienlaser steht in einem Winkel von etwa 30° zur Kamera. Er tastet die Bruchfläche mit gleichmäßiger Geschwindigkeit ab. Dies kann durch den Einbau des Lasers in eine motorisierte, vertikale Zahnradlinearführung (Aufzug) erreicht werden, die den Laser mit konstanter Geschwindigkeit auf und ab bewegt.

Auf die gescannten Rohdaten wird innerhalb der Software ein Filter gelegt, der die erzielten Daten glättet und zwischen gemessenen Werten weitere Werte interpoliert. Diese Maßnahme ist notwendig, um das Punktrauschen zu minimieren. Unter dem Punktrauschen wird die Abweichung der einzelnen Punkte von einer aus allen Punkten berechneten idealen Fläche verstanden. In dieser Arbeit wurde ein mittleres Punktrauschen von ca. 0,03 mm festgestellt. Die Filtereigenschaften werden, wie vom Hersteller empfohlen, auf 4 (Interpolation), 2 (Average-Glättung) und 0 (Median-Glättung) gesetzt. Daraus ergibt sich ein Abstand benachbarter Punkte von ca. 0,45 mm. Die dreidimensionalen Koordinaten der gescannten Punkte werden im ASCII-Format .obj gespeichert und in ein in Matlab[®] geschriebenes Programm eingelesen, um die Koordinaten in ein Dreiecksnetz zu vermaschen. Aus diesem kann die Oberfläche bestimmt werden (siehe Abschnitt 3.4.4.3).

Anwendbarkeit

Dem großen Vorteil des Laserscannersystems (der Wirtschaftlichkeit) steht eine geringere Auflösung im Vergleich zu industriellen Lasertriangulationssystemen nachteilig gegenüber. Eine Voruntersuchung zur Anwendbarkeit in Laboren mit Vergleichsergebnissen zu einem industriellen Scannersystem wurde durchgeführt und wurde separat veröffentlicht [124]. Darin konnte eine Eignung zur Beschreibung von Oberflächen auf Mesoebenen nachgewiesen werden.

3.4.3.3 Fotografisches Verfahren

Prinzip und Durchführung

Nach den ersten Vorversuchen zum lokalen, dynamischen Betonverhalten zeigte sich, dass einige Platten in mehrere große Bruchstücke zerbrachen. Folglich konnten in diesen Fällen keine Krater gescannt werden und die Oberflächenermittlung musste

auf anderem Wege durchgeführt werden. Aus diesem Grund wurde ein Verfahren entwickelt, bei dem diese Bruchstücke von sechs Seiten mit einem Maßstab in derselben Ebene wie die betrachtete Seite fotografiert werden. Danach werden die Bilder in AutoCad[®] importiert. Mit Hilfe des fotografierten Maßstabs werden die Bilder an den Maßstab des Programms angepasst. Anschließend werden die Konturen des Bruchstücks auf dem Bild als Polygonzug nachgezeichnet (siehe Abbildung 3.4.3). Die Fläche des Polygonzugs wird automatisch in AutoCad[®] ausgegeben. Die Berücksichtigung dieser in der Gesamtbruchfläche der Platten wird in Abschnitt 3.4.4.3 gezeigt.

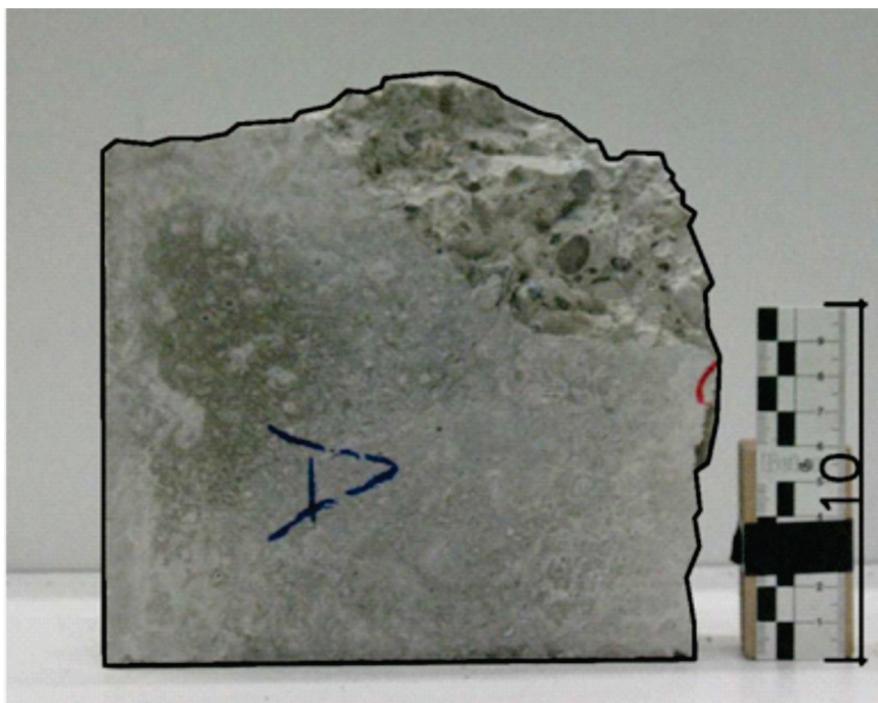


Abbildung 3.4.3: Bild einer Seite eines Bruchstücks mit Maßstab und Kontur

Anwendung

In umfangreichen Vorversuchen wurden insgesamt 85 Bruchstücke (Betonrezepturen mit unterschiedlichen w/z-Werten und unterschiedlichen Größtkorndurchmessern, vgl. Bucke [17]) mit dieser Methode untersucht und anschließend mit einem industriellen 3D-Laserscanner gescannt (Durchführung durch Fa. Descam). Der Vergleich beider Messmethoden zeigte im Mittel aller Oberflächen einen Unterschied von 3,9 % bezogen auf die lasergescannten Oberflächen. Dabei gab es sowohl größere Oberflächen aus der Laserscannermessung als auch aus dem fotografischen Verfahren. Die maximale Abweichung zwischen zwei gemessenen Oberflächen betrug 12,2 %.

In Abbildung 3.4.4 sind die dreidimensionalen Oberflächen den Oberflächen des fotografischen Verfahrens gegenübergestellt.

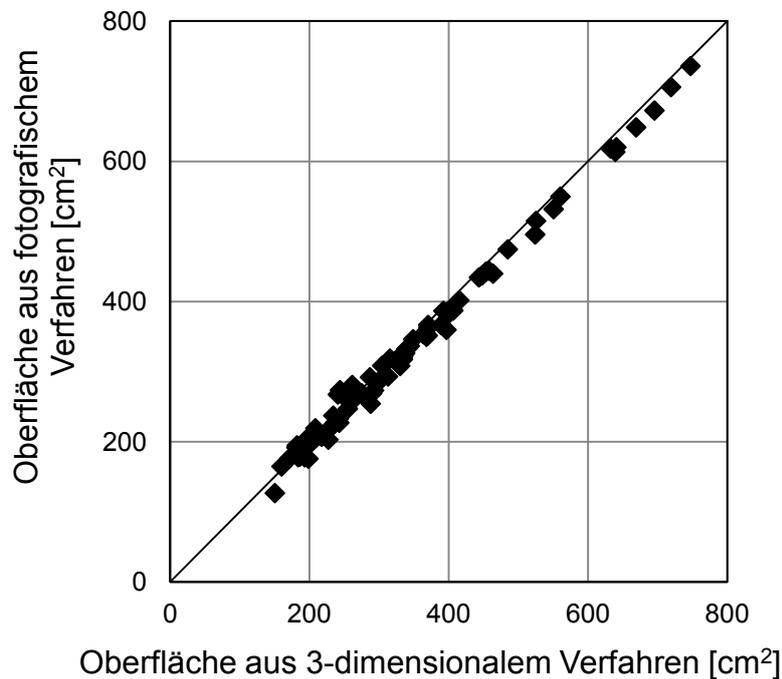


Abbildung 3.4.4: Gegenüberstellung der 3-dimensionalen Oberflächen zu den CAD-Oberfläche aus [17]

3.4.3.4 Scannerverfahren

Prinzip und Durchführung

Mit dieser Methode werden Bruchstücke mit einer Masse unter 350 g und mit mindestens zwei Abmessungen, die größer sind als 25 mm, untersucht. Die Bruchstücke sind zu klein und zerklüftet, um ihre Oberfläche aus sechs Seiten im fotografischen Verfahren ermitteln zu können, aber zu groß, um mit der CPA untersucht zu werden. Daher wird für diese Bruchstücke eine alternative Messmethode mit einem vereinfachten Modell entwickelt. Die mittlere Höhe eines jeden Bruchstücks wird mit einem Messschieber ermittelt. Die Bruchstücke werden mit ihrer Grundseite auf ein weißes Blatt Papier gelegt und ihre Kontur mit einem schwarzen Stift umfahren. Die Konturen werden mit einem handelsüblichen Scanner in ein .tif-Datenformat digitalisiert. Über ein Zusatzprogramm für das Zeichenprogramm AutoCAD[®] (VPstudio V10[®]) können diese .tif-Dateien vektorisiert werden, vgl. Softelec [114]. Aus den daraus entstehenden Polygonzügen wird die Oberfläche mit Hilfe eines Modells nach Abschnitt 3.4.4.3 berechnet.

3.4.4 Berechnung der Bruchflächen und Oberflächenkennwerte

3.4.4.1 Einführung

Um die Auswirkung der untersuchten Einflüsse auf die entstandenen Oberflächen zu beurteilen, müssen unterschiedliche Oberflächenkennwerte genutzt werden. Bei den bruchmechanischen Untersuchungen versagt die gesamte Querschnittsfläche der Probekörper im Kerbbereich, während in den ballistischen Untersuchungen die Schädigung nur lokal begrenzt an der Grundfläche der Probekörper sichtbar wird.

Die Abmessungen der Probekörper der bruchmechanischen Untersuchungen variierten in Folge der Herstellung (insbesondere durch die wiederverwendete MDF-Schalung) um bis zu 10 %. Daher muss ein Oberflächenkennwert herangezogen werden, mit dem eine Vergleichbarkeit unterschiedlich großer Probekörper möglich ist. Ein dafür geeigneter Oberflächenkennwert ist die Rauheit als Quotient von dreidimensional gemessener Fläche zur zweidimensionalen Querschnittsfläche. Die Rauheit gilt als abhängig von der Betrachtungsebene (siehe Abschnitt 2.3.2), so dass nur relative Vergleiche der Oberfläche verschiedener Testreihen durchgeführt werden können. Vergleiche mit bekannten Ergebnissen aus der Literatur erfordern in Folge der unterschiedlich genutzten Messsysteme – und in Folge dessen der oft unterschiedlichen Betrachtungsebenen – einen unabhängigen Kennwert. In dieser Arbeit wurde dazu zusätzlich die fraktale Dimension mit einer modifizierten Grid Scaling Method bestimmt.

Bei den ballistischen Untersuchungen können Vergleiche unterschiedlicher Einflüsse auf die Bruchfläche mit absoluten Kennwerten der Bruchfläche erfolgen. Durch die lokale Schädigung in Folge der Perforation versagt nicht der gesamte Probekörper, sondern nur ein Teilbereich der Grundfläche. Dadurch sind Unterschiede aus der Herstellung der Probekörper vernachlässigbar. Die Rauheit und die fraktale Dimension können durch die komplexe Bruchfläche nicht ermittelt werden. Im Folgenden werden die Berechnung der Bruchflächen und die Bestimmung der Oberflächenkennwerte getrennt nach Untersuchungsart gezeigt.

3.4.4.2 Berechnung der Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung

Oberflächenparameter sind zum großen Teil davon abhängig, in welcher Betrachtungsebene sie aufgenommen werden. Daher wird zusätzlich zur Bestimmung der Oberfläche eine fraktale Analyse der Bruchflächen der RILEM-Balken durchgeführt.

In Anlehnung an aus der Literatur bekannte Verfahren zur Bestimmung der fraktalen Dimension (vgl. Abschnitt 2.3.2) wurden Vorversuche zum Vergleich der Box Counting Method und der Grid Scaling Method durchgeführt. Beide Methoden lieferten ähnliche Ergebnisse für die fraktale Dimension. Der Arbeitsaufwand war bei beiden Methoden in etwa gleich. In dieser Arbeit wurde die Grid Scaling Method angewandt, da dem Autor mehr Literatur zum Vergleichen der Ergebnisse zu dieser zur Verfügung stand.

Die Grid Scaling Method basiert darauf, dass auf unterschiedlichen Betrachtungsebenen verschiedene Rauheiten einer Oberfläche gemessen werden können. Die herkömmliche Vorgehensweise [z. B.: 84, 89] tastet das Höhenprofil von Oberflächen mit variabler Auflösung ab. Die gemessenen Profilpunkte liegen in einem quadratischen Netz und werden durch gleichmäßige Dreiecke miteinander verbunden, so dass eine Oberfläche entsteht. Die feinste Rasterweite ist nach unten auf l_{\min} begrenzt und hängt vom genutzten Messsystem ab. Die fraktale Dimension ergibt sich nach [84] und in Anlehnung an [77] aus Gleichung 3.3.

$$D_{GS} = 2 - \lim_{l \rightarrow 0} \frac{\ln(A_{3D})}{\ln(l)} = 2 + d_{GS} \quad \text{Gl. 3.3}$$

In dieser Arbeit wird ein modifiziertes Verfahren aufbauend auf dieser bekannten Methode entwickelt. Dieses erlaubt es, unabhängig von einem quadratischen Netz Rauheiten auf verschiedenen Betrachtungsebenen zu bestimmen. Hierzu wird wie folgt vorgegangen:

Nach Ermittlung der Koordinaten der Bruchfläche und der Referenzebene (lotrecht zur Belastungsrichtung) werden zwei Flächen durch Dreiecksvermaschung erstellt – die Bruchfläche (blau/weiß in Abbildung 3.4.5) und die Grundfläche (rot in Abbildung 3.4.5).

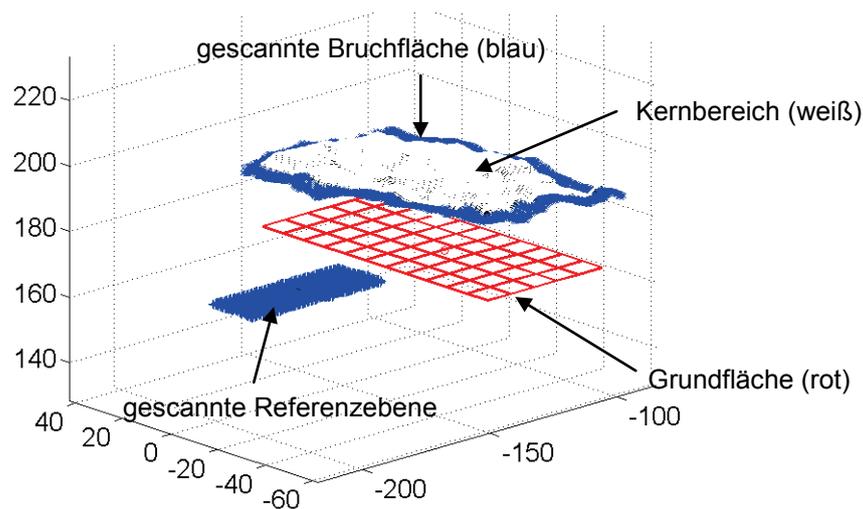


Abbildung 3.4.5: Bruchfläche und Dreiecksnetz aus gescannten 3D-Koordinaten

Um Ungenauigkeiten (z. B.: Ausreißerpunkte) im Randbereich der Bruchfläche beim Scanvorgang auszuschließen, wird die Grundfläche auf einen Kernbereich (Maße: 45 · 95 mm) reduziert. Des Weiteren können dadurch gleichgroße Untersuchungsgebiete sichergestellt werden, die Ungenauigkeiten bei der Herstellung der Probekörper unbedeutend machen. Zusätzlich werden die Untersuchungsgebiete in kleinere Flächen geteilt, um die Rechenzeit zu verkürzen. Die Grundfläche wird anschließend so auf die Bruchfläche projiziert, dass nur Profilverpunkte der Bruchfläche innerhalb dieser Grundfläche für die weitere Berechnung berücksichtigt werden (weiß in Abbildung 3.4.5). Für diesen Kernbereich der Bruchfläche wird die betrachtete Punktzahl variiert, um für unterschiedliche Punktmengen unterschiedliche Bruchflächen zu bestimmen. Dazu wird die gemessene Punktzahl mit einem Faktor $1/N$ multipliziert (mit $N = 4, 6, 8, 12$ und 16). Die betrachteten Punkte müssen zufällig verteilt sein. Bei einer systematischen Verteilung der Punkte ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich der mittlere Punktabstand ändert sehr gering. Eine zufällige Punktverteilung nach dem Scannen mit dem David 3D Laserscanner liegt erst ab einer Betrachtung jedes vierten Punktes vor, vgl. [124]. Es ergeben sich damit fünf Bruchflächen. Des Weiteren wird der mittlere Abstand zwischen zwei benachbarten Punkten jeder ermittelten Bruchfläche berechnet. Durch Auftragen der Daten (Bruchfläche und Punktabstand) in ein bi-logarithmisches Diagramm kann aus der Steigung der sich ergebenden Geraden das fraktale Inkrement d_{GS} in Anlehnung an Mechtcherine [84] bestimmt werden (siehe Abbildung 3.4.6). Alternativ kann im bi-logarithmischen Diagramm statt der Bruchfläche auch die Rauheit eingesetzt werden. Aus dem fraktalen Inkrement ergibt sich nach Gleichung 3.3 die fraktale Dimension.

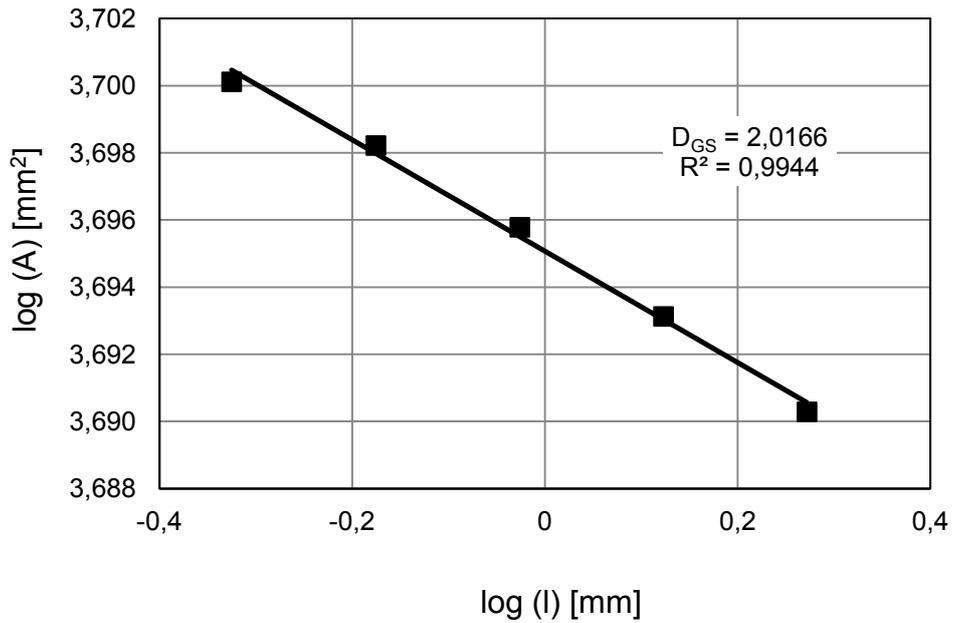


Abbildung 3.4.6: Typisches bi-logarithmisches Diagramm zur Bestimmung der fraktalen Dimension

Zusammenfassend sind die Abläufe in Abbildung 3.4.7 dargestellt.

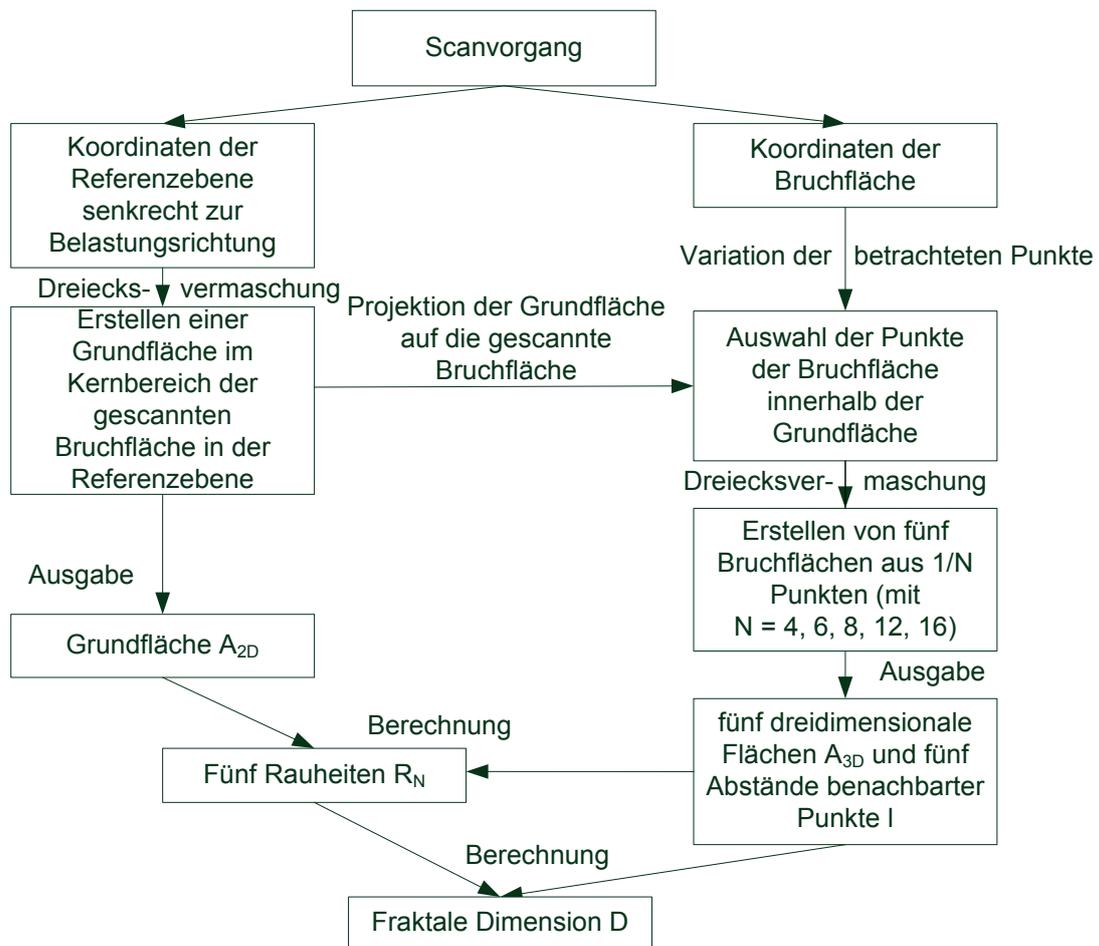


Abbildung 3.4.7: Ablaufschema zur Bestimmung der fraktalen Dimension

3.4.4.3 Berechnung der Bruchfläche aus den ballistischen Untersuchungen

Die Gesamtbruchfläche A_{GB} , die aus der ballistischen Untersuchung entsteht, setzt sich aus verschiedenen Teilflächen zusammen. Dabei werden zwei Fälle der Berechnung der Gesamtbruchfläche unterschieden. Im ersten Fall bleibt die Platte bestehen. Die Gesamtbruchfläche ergibt sich dann aus der Summe der Oberflächen der Makro-Meso-Ebene und der Meso-Mikro-Ebene abzüglich der ursprünglichen Oberfläche im Bereich der Ausbruchkrater. Abbildung 3.4.8 gibt einen Überblick über die Teilflächen. Im zweiten seltenen Fall zerfällt die perforierte Platte in mehrere größere Bruchstücke, deren Oberfläche mit dem fotografischen Verfahren ermittelt werden kann. Die Gesamtbruchfläche ergibt sich dann aus den Oberflächen der Makro-Meso-Ebene und der Meso-Mikro-Ebene abzüglich der gesamten Oberfläche des Probekörpers vor dem Beschuss.

- A_{CPA} : Oberfläche der Partikel aus der CPA Untersuchung
- A_{SV} : Oberfläche der Bruchstücke > 25 mm und $m < 350$ g
- $A_{VS,3D}$: Oberfläche des Kraters auf der Vorderseite
- $A_{RS,3D}$: Oberfläche des Kraters auf der Rückseite
- $A_{VS(RS),Ori}$: ursprüngliche Oberfläche des Kraterstands

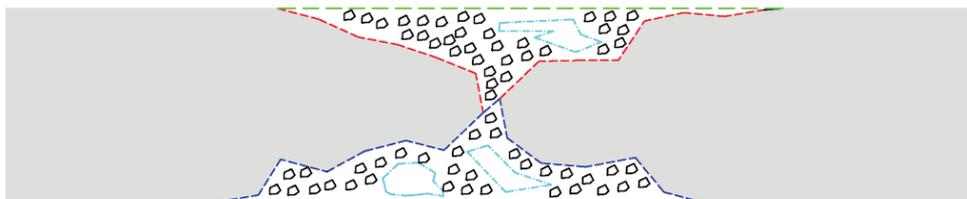


Abbildung 3.4.8: Schnitt durch einen Probekörper; Aufteilung der Teilflächen

Im Folgenden wird beschrieben, wie die einzelnen Teilflächen berechnet werden und welche Modelle dabei für die einzelnen Bruchstücke angenommen wurden.

Modellbildung zur Oberflächenbestimmung auf der Meso-Mikro-Ebene

Aus den ermittelten Werten der Korngröße, der Kornform und des Volumens werden verschiedene Modelle für einen Partikel untersucht, die zur Bestimmung der Oberfläche benötigt werden. Diese Vereinfachung und Idealisierung ist notwendig, da eine exakte Bestimmung der Oberfläche technisch nicht realisierbar ist.

Das einfachste vorstellbare Modell eines Partikels ist die Kugel, die mit dem minimalen Feretdurchmesser (als Korngrößenparameter) gebildet werden kann. In dieser Arbeit zeigt sich jedoch, dass die Kugel einen Partikel nur ungenügend genau darstellt, da das aus der Kugel berechnete Volumen deutlich größer war als das gemessene. Dieses Ergebnis entspricht auch Erfahrungswerten, wonach sich die Partikel auf der Vibrationsrinne so ausrichten, dass beim Fallen ihre dritte Dimension gegenüber den anderen beiden Dimensionsabmessungen kleiner ist.

Eine weitaus bessere Annäherung an die gemessenen Werte stellt der triaxiale Ellipsoid dar. Dieser Körper mit einer elliptischen Grundfläche verlangt die Bekanntheit dreier Halbachsen im Raum (e_1, e_2, e_3). Sind zwei Halbachsen (e_1, e_2) und das Volumen V_{EI} bekannt, kann die dritte Halbachse e_3 nach Gleichung 3.4 bestimmt werden.

$$e_3 = \frac{3 \cdot V_{EI}}{4 \cdot \pi \cdot e_1 \cdot e_2} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Die beiden Halbachsen werden hier aus dem minimalen Feretdurchmesser ($= 2 \cdot e_1$) und der senkrecht dazu stehenden Länge ($= 2 \cdot e_2$) abgeleitet. Die Oberfläche A_{EI} des Ellipsoiden kann nach der Formel von Thomsen [86] näherungsweise berechnet werden (Gleichung 3.5).

$$A_{EI} \approx 4 \cdot \pi \cdot \left(\frac{((e_1 \cdot e_2)^{1,6} + (e_3 \cdot e_2)^{1,6} + (e_1 \cdot e_3)^{1,6})}{3} \right)^{0,625} \quad \text{Gl. 3.5}$$

Eine andere Annäherung kann durch ein quaderförmiges Modell erfolgen. Hierbei kann wie beim Ellipsoid vorgegangen werden. Eine rechteckige Grundfläche (aus minimalem Feretdurchmesser und Länge) und das bekannte Partikelvolumen werden genutzt, um die dritte Raumkomponente zu bestimmen. Nachteil dieses Modells ist die augenscheinliche Unähnlichkeit mit einem Quader („Eckigkeit“) bei der Betrachtung der Partikel (siehe Abbildung 3.4.9).

Die beste Annäherung bei der Auswahl der Grundfläche ist ein unregelmäßiges Polygon. Aus der bekannten Grundfläche und der gemessenen Zirkularität kann der Umfang des Polygons abgeleitet werden. Die Problematik dieses Modells liegt in der dritten Dimension. Die Ableitung dieser Dimension aus dem Volumen setzt einen Grundkörper voraus. Da das Polygon die maximale Grundfläche darstellt (Schatten-

projektion), ist es eher unwahrscheinlich, dass diese Grundfläche über einer aus dem Volumen abgeleiteten Höhe konstant ist. Damit entfällt der Grundkörper des Prismas, der aus dem Polygon gebildet werden könnte. Wird stattdessen ein Polygonstumpf gebildet, ergibt sich das Problem der unbekanntenen Größen der zweiten Grundfläche und der Mantelfläche.

Abbildung 3.4.9 zeigt eine Mikroskopaufnahme verschiedener Partikel, die auf einem Sieb mit der Maschenweite 0,125 mm liegen geblieben sind. Daneben sind in deren Schattenprojektion Ellipsen und Rechtecke zur Verdeutlichung der Modellbildung gelegt. Bei einer zufälligen Auswahl weiterer Partikel in anderer Größe konnten ähnliche Bilder (siehe Anhang „erweiterte Untersuchungen“) erstellt werden. Die Form der Partikel im gesichteten Bereich erscheint größenunabhängig zu sein.

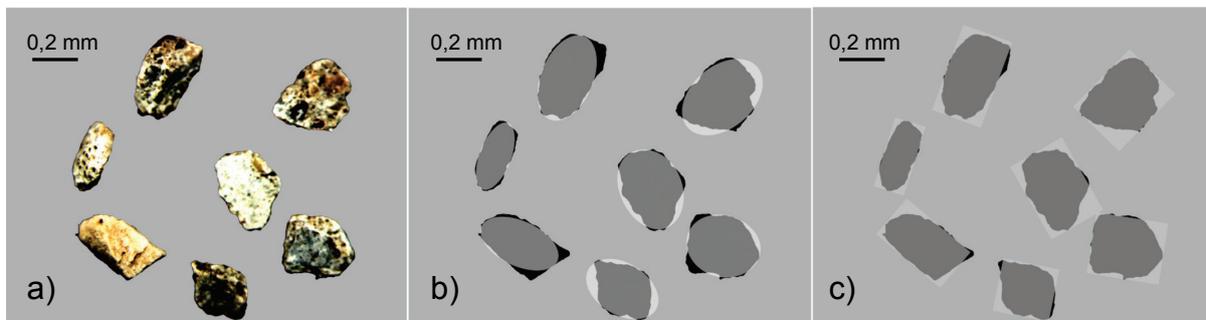


Abbildung 3.4.9: a) Mikroskopaufnahme von Partikeln $> 0,125$ mm, b) Ellipsen über der Schattenprojektion der Partikel, c) Rechtecke über der Schattenprojektion der Partikel

Auf Grund dieser Überlegungen wird für die weitere Berechnung der triaxiale Ellipsoid als Grundkörper ausgewählt.

Somit sind die bekannten Korngrößenparameter berücksichtigt. Nicht berücksichtigt ist beim Grundkörper Ellipsoid bisher ein Wert der Kornform. Der hier gemessene Wert der Sphärizität entspricht dem Kehrwert der Zirkularität $1/\psi_c$. Er beschreibt das Verhältnis des realen Umfangs zum Umfang des flächengleichen Kreises und ist damit nach E DIN ISO 9276-6 ein „Grad der Ähnlichkeit des Partikels (oder seiner Projektionsfläche) zu einem Kreis, unter Berücksichtigung der Glätte seines Umfangs“ [35, Seite 17]. Aus dem Quotienten der gemessenen Sphärizität $1/\psi_c$ und der Sphärizität der Ellipse aus Feretdurchmesser und senkrecht dazu stehender Länge $1/\psi_{Ei}$ (Halbachsenverhältnis) wird ein Formfaktor der Ähnlichkeit des Partikels bezogen auf diese Ellipse gebildet. Dieser Ellipsenformfaktor ψ_{Ei}/ψ_c wird dann mit der Oberfläche

des Ellipsoiden multipliziert, um ein weiter angenähertes Abbild der Wirklichkeit zu bekommen. Ergebnis ist die Bruchfläche A_{CPA} .

Zusammenfassend ist die Vorgehensweise zur Bestimmung der Bruchfläche innerhalb einer Kornklasse in Abbildung 3.4.10 dargestellt.

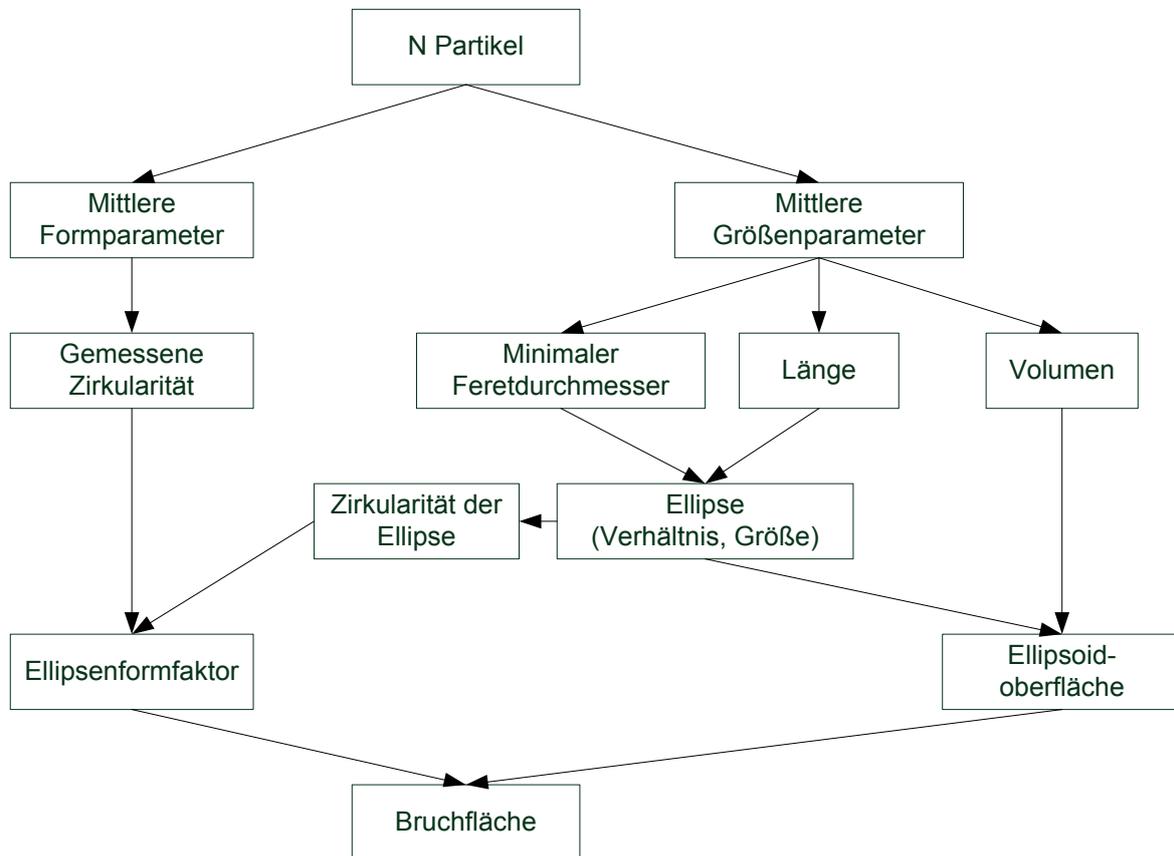


Abbildung 3.4.10: Arbeitsablauf zur Bestimmung der Oberfläche

Bestimmung der Oberfläche auf der Makro-Meso-Ebene:

Bei der Bestimmung der Oberfläche der Ausbruchkrater der Probekörper $A_{VS(RS),3D}$ kann auf einen inneren Kernbereich verzichtet werden, da der Scenvorgang großzügig um den Krater herum durchgeführt wird. Randeefekte, wie beispielsweise aus unterschiedlich großen Schalungen (vgl. 3.4.4.1), entstehen daher nicht am Kraterrand (siehe Abbildung 3.4.11).

Die Berechnung der Oberfläche erfolgt direkt aus dem Dreiecksnetz, das in Matlab[®] erstellt wird. Dabei wird die Fläche jedes Dreiecks berechnet und anschließend aufsummiert. Berücksichtigt wurden nur Dreiecke innerhalb eines markierten Bereichs (schwarze Linie in Abbildung 3.4.11).

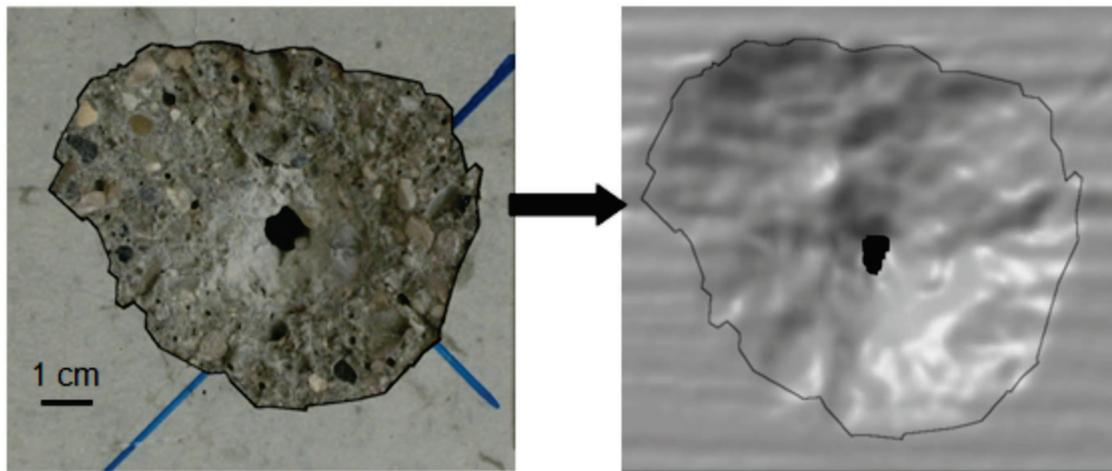


Abbildung 3.4.11: Foto und Scan-Ergebnis (aus DAVID 3D) eines Ausbruchkraters

Für die Berechnung der Oberfläche aus dem Scannerverfahren A_{SV} werden die Bruchstücke > 25 mm und $m < 350$ g zu Prismen idealisiert. Ihre Grundflächen sind über eine mittlere Höhe als konstant angenommen. Durch die in AutoCAD[®] bestimmte Grundfläche und Länge des Polygonzugs und die gemessene mittlere Höhe kann die gesamte Oberfläche des Prismas berechnet werden. Die Idealisierung zum Prisma erfolgt nach einer eingehenden Begutachtung der Bruchstücke. Diese sind in der Regel als flache Körper erkennbar, d. h. das Verhältnis von Länge bzw. Breite zu Höhe ist sehr groß. Der Einfluss der Mantelfläche ist gegenüber der Grundfläche als gering anzusehen. Abbildung 3.4.12 zeigt ein typisches Bruchstück und dessen Kontur.

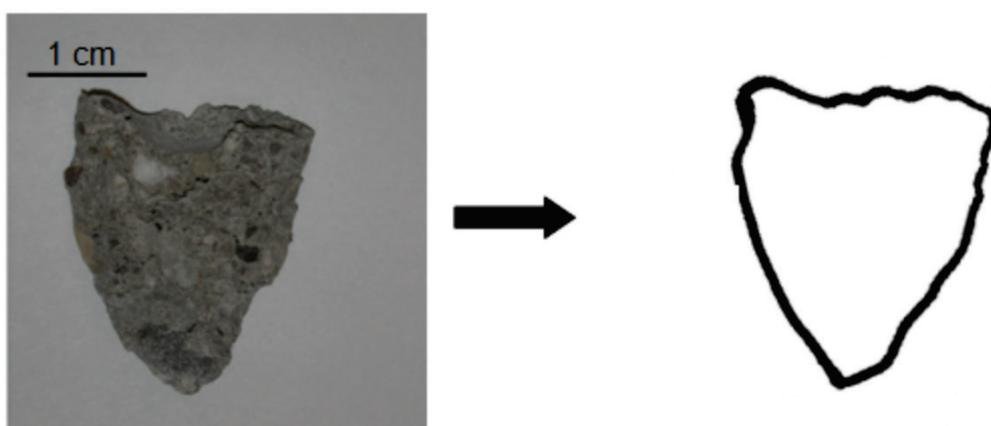


Abbildung 3.4.12: Bruchstück > 25 mm und < 350 g und nachgezeichnete Kontur

Die Originalfläche der Krater $A_{VS(RS),ori}$ wird mit dem fotografischen Verfahren bestimmt, so dass die Oberfläche als Polygonzug in AutoCad[®] vorliegt und direkt berechnet werden kann.

Die Gesamtbruchfläche A_{GB} berechnet sich für vollständige Platten nach Gleichung 3.6.

$$A_{GB} = A_{CPA} + A_{VS,3D} + A_{RS,3D} + A_{SV} - A_{VS,Ori} - A_{RS,Ori} \quad \text{Gl. 3.6}$$

Das fotografische Verfahren kann bei den Bruchstücken der zerbrochenen Platten ($m \geq 350$ g) ähnlich der Vorgehensweise der Bestimmung der Originalflächen angewandt werden. Die Fläche des Polygonzugs kann direkt in AutoCad[®] abgelesen werden. Die Summe der Polygone aller sechs Bilder ergibt die Oberfläche des Bruchstücks A_{FV} . Die Gesamtbruchfläche A_{GB} der zerbrochenen Platten ergibt sich nach Gleichung 3.7 aus der Summe aller Oberflächen A_{FV} addiert mit den Oberflächen A_{CPA} und A_{SV} abzüglich der gesamten ursprünglichen Oberfläche der Platte A_{Ori} .

$$A_{GB} = A_{CPA} + A_{SV} - A_{Ori} + \sum A_{FV} \quad \text{Gl. 3.7}$$

4 Untersuchungsprogramm und Ergebnisse

4.1 Einführung

Dieser Abschnitt zeigt die verschiedenen Einflussgrößen und präsentiert die Ergebnisse aus den Versuchen. Der Abschnitt ist dabei in zwei Hauptteile und mehrere Nebenteile gegliedert. Im ersten Hauptteil des Abschnitts (4.3) werden die bruchmechanischen Untersuchungsergebnisse dargestellt und im zweiten (4.4) werden die ballistischen Untersuchungsergebnisse präsentiert. Die Ergebnisse werden in der Regel als Mittelwerte einer Testreihe aufgeführt; die Einzelwerte finden sich im jeweiligen Anhang. Der zugehörige Variationskoeffizient eines Mittelwerts steht in Klammern hinter diesem.

4.2 Untersuchungsprogramm

4.2.1 Untersuchte Einflussgrößen

Einflussgrößen auf Beton und seine Kennwerte sind allein durch die Variation der Zusammensetzung fast unbegrenzt vorhanden. Zusätzlich entstehen weitere Einflussgrößen beispielsweise aus örtlichen oder zeitlichen Bedingungen. In dieser Arbeit werden sowohl Einflussgrößen untersucht, die die Zusammensetzung des Betons betreffen, als auch Einflussgrößen, die den Versuchsablauf sowie das Probestückalter und die Lagerung der Probestücke betreffen.

Bedeutende Einflussgrößen der Zusammensetzung sind neben den Ausgangsstoffen selbst vor allem das Verhältnis der Massen des Wassers zum Zement (w/z -Wert) sowie die Sieblinie der Gesteinskörnung und ihr Größtkorn. In dieser Arbeit wird eine Variation des w/z -Wertes und des Größtkorndurchmessers untersucht.

Um die Anzahl der Untersuchungen trotz der verschiedenen Einflüsse möglichst gering zu halten, wird ein Referenzbeton hergestellt. Der w/z -Wert des Referenzbetons beträgt 0,60 und das Größtkorn hat einen maximalen Durchmesser von 16 mm. Der Referenzbeton wird im Wasserbad bis zur Prüfung im Alter von 28 d gelagert. Die Prüfgeschwindigkeit wird in den bruchmechanischen Untersuchungen zu 0,025 mm/s und in den ballistischen Untersuchungen zu 870 m/s gewählt .

Die einzelnen untersuchten Parameter der Einflüsse sind in Abbildung 4.2.1 dargestellt. Kursiv gedruckte Parameter entsprechen dem Referenzbeton.

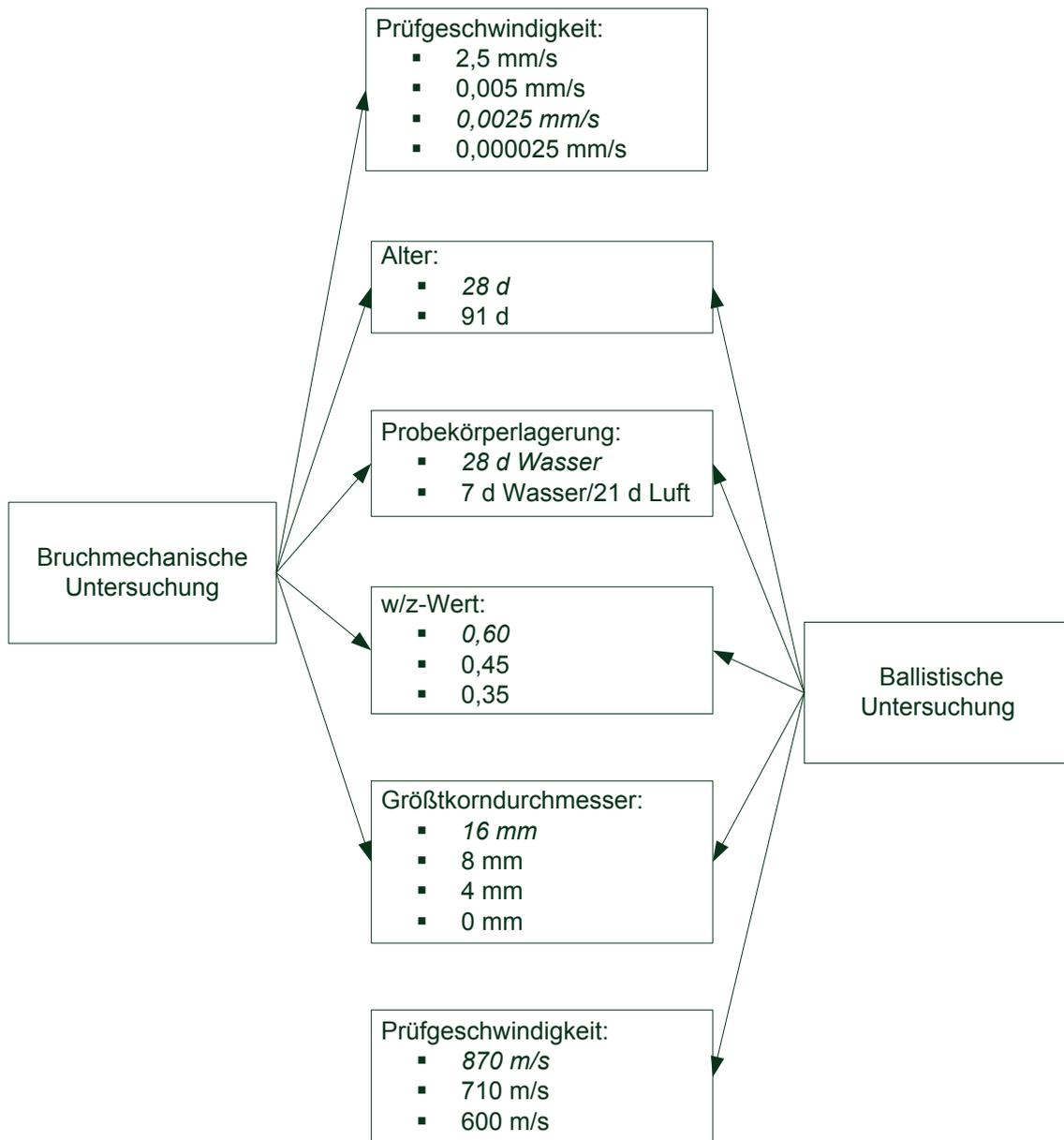


Abbildung 4.2.1: Übersicht der einzelnen untersuchten Einflussparameter

Auf Grund der großen zu erwartenden Streuung der Ergebnisse wurden mindestens 10 Probekörper je Einfluss geprüft. Da vorsorglich mehr Probekörper hergestellt wurden, konnten teilweise bis zu 12 Versuche je Einfluss und Untersuchungsart durchgeführt werden. Insgesamt wurden in der Bruchmechanik 127 Versuche und in der Ballistik 107 Versuche durchgeführt. Tabelle 4.2.1 zeigt neben der Bezeichnung der Testreihe auch die jeweilige Anzahl an Probekörpern.

Tabelle 4.2.1: Bezeichnung und Probekörperanzahl der untersuchten Einflüsse

Einfluss		Bruchmechanik		Ballistik	
		Bez.	Anzahl	Bez.	Anzahl
Referenzbeton (Alter; Lagerung; w/z-Wert; Größtkorn; Prüfge- schwindigkeit)	28 d; Wasser; 0,60; 16 mm; $2,5 \cdot 10^{-2}$ mm/s bzw. 870 m/s	1.1.a	12	3.1.a	11
Betonalter	91 d	1.2.a	12	3.2.a	11
Probekörperlagerung	7d Wasser/21 d Luft	1.3.a	12	3.3.a	11
w/z-Wert	0,45	1.5.a	12	3.5.a	10
	0,35	1.5.b	12	3.5.b	11
Größtkorndurchmes- ser	8 mm	1.6.a	12	3.6.a	11
	4 mm	1.6.b	12	3.6.b	10
	ohne	1.6.c	11	3.6.c	10
Prüfgeschwindigkeit	$5 \cdot 10^{-2}$ mm/s	1.7.a	11		
	$2,5 \cdot 10^{-4}$ mm/s	1.7.b	10		
	2,5 mm/s	1.7.c	11		
	710 m/s			3.7.a	11
	600 m/s			3.7.b	11

4.2.2 Betonzusammensetzungen und Ausgangsstoffe

Ziel der Betonzusammensetzung war ein Normalbeton mit guten Verarbeitungseigenschaften. Als Zement wurde ein CEM I 42,5 R der Fa. Schwenk mit einer Dichte von $3,124 \text{ g/cm}^3$ verwendet. Die benutzte Gesteinskörnung war Münchner Moränenkalk mit einer mittleren Rohdichte von $2,702 \text{ g/cm}^3$. Die Sieblinien folgten den Regelsieblinien A/B nach DIN 1045 [40].

Tabelle 4.2.2 zeigt die unterschiedlichen Mischungszusammensetzungen. Wenn eine gute Verarbeitbarkeit nicht mehr gewährleistet werden konnte, kam zusätzlich Fließmittel (Woerment FM 26) zum Einsatz. Die Herstellung der Probekörper erfolgte im Zwangsmischer UEZ ZM300. Es wurden je Testreihe für die bruchmechanischen Untersuchungen $0,12 \text{ m}^3$ Beton und für die ballistischen Untersuchungen $0,15 \text{ m}^3$ Beton hergestellt.

Bei der Untersuchung der Einflüsse, die die Zusammensetzung betreffen, wurde das Verhältnis der Volumina des Zementleims und der Gesteinskörnung konstant gehalten. Bei allen anderen untersuchten Einflüssen wurde die Referenzbetonmischung verwendet.

Tabelle 4.2.2: Zusammensetzung der untersuchten Betone

Bezeichnung	w/z-Wert	Wasser	Zement	Gesteinskörnung			Fließmittel
				0/4	4/8	8/16	
[kg/m ³]							
1.5.a / 3.5.a	0,45	166	370	847	364	680	0
1.5.b / 3.5.b	0,35	148	425	847	364	680	13,3
1.6.a / 3.6.a	0,60	185	310	1268	619	0	2,4 / 0
1.6.b / 3.6.b	0,60	185	310	1879	0	0	2,8
1.6.c / 3.6.c	0,60	645	1075	0	0	0	0
Alle anderen: Referenzbetonmischung	0,60	185	310	847	364	680	0

4.2.3 Betoneigenschaften

4.2.3.1 Frischbeton

Das Ausbreitmaß d_A lag in der Regel im Bereich der Konsistenzklassen F2 oder F3 nach DIN EN 12350 [37]. Der Luftporengehalt A_c wurde mit dem Druckausgleichverfahren nach [37] bestimmt. Die Referenzbetonmischung wies dabei im Mittel einen Luftporengehalt von 0,6 Vol.-% auf. Der höchste Luftporengehalt wurde an den Testreihen 1.6.b und 3.6.b (Mischung mit 4 mm Größtkorndurchmesser) mit 7 Vol.-% bzw. 9 Vol.-% gemessen.

Die Zusammenstellung der gemessenen Werte kann dem Anhang „Frisch- und Festbetoneigenschaften“ entnommen werden.

4.2.3.2 Festbeton

Neben den Probekörpern für die bruchmechanischen und ballistischen Versuche wurden zu jeder Testreihe Begleitkörper (Zylinder 150 / 300 mm und Balken 100 / 100 / 500 mm) zur Ermittlung der Festbetonkennwerte hergestellt. Die Kenn-

werte wurden nach Norm [36, 38 und 41] bestimmt. Die Ermittlung der Kennwerte erfolgte in der Regel nach 28 d, wobei die Testreihen 1.2.a und 3.2.a zur Untersuchung des Alterseinflusses erst nach 91 d geprüft wurden. Die Nachbehandlung der Begleitkörper entsprach der Nachbehandlung der bruchmechanischen bzw. ballistischen Probekörper – in der Regel Lagerung bis zur Prüfung unter Wasser.

Die ermittelten Festbetonkennwerte bestätigen, dass der Referenzbeton noch als Normalbeton nach DIN EN 206 bzw. DIN 1045 [34 bzw. 40] zu bezeichnen ist; die Ergebnisse finden sich in Tabelle 4.2.3. Die mittlere Zylinderdruckfestigkeit des Referenzbetons (aus 1.1.a und 3.1.a) beträgt **45 N/mm²**.

Tabelle 4.2.3: Festbetonkennwerte des Referenzbetons (1.1.a und 3.1.a)

Bezeichnung	f_c	$f_{ct,fl}$	$f_{ct,sp}$	E_{sta}	E_{dyn}	ρ
	[MPa]			[GPa]	[GPa]	[g/cm ³]
1.1.a	43,4	4,9	5,1	31,9	59,9	2,484
3.1.a	46,7	6,1	4,4	32,6	57,9	2,489
Mittelwert	45,0	5,5	4,8	32,3	58,9	2,487

Eine Aufstellung aller gemessenen Festbetonkennwerte findet sich im Anhang „Frisch- und Festbetoneigenschaften“ wieder. Einzelne Werte, die im Zusammenhang mit bruchmechanischen oder ballistischen Ergebnissen stehen, werden im Abschnitt der jeweiligen Untersuchung diskutiert.

4.3 Ergebnisse der bruchmechanischen Untersuchung

4.3.1 Referenzbeton

4.3.1.1 Einführung

Als Referenzbeton wurde ein Normalbeton mit guten Verarbeitungseigenschaften gewählt. Ergebnisse bruchmechanischer Untersuchungen ähnlicher Betone können in der Literatur zum Vergleich gefunden werden (beispielsweise in Mechtcherine [84], siehe Abschnitt 2.1). Mit dem Referenzbeton sollen die angewendeten Untersuchungen und Methoden als durchführbar etabliert werden. Dabei wird ein besonderes Augenmerk auf die Analyse der Bruchfläche gelegt.

Die Untersuchung des Referenzbetons umfasste zwölf Probekörper. Alle Einzelwerte können dem Anhang „Referenzbeton“ entnommen werden. In der Regel sind die Mittelwerte und in Klammern der Variationskoeffizient angegeben. An Hand des Referenzbetons werden auch Einzelwerte gezeigt, um die Streuung der Ergebnisse zu verdeutlichen.

4.3.1.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die mittlere Querschnittsfläche der Balken A_Q im Kerbbereich wurde mit einer Schieblehre vor Versuchsbeginn zu $A_Q = 5055 \text{ mm}^2$ bestimmt. Abbildung 4.3.1 zeigt beispielhaft die entstandenen Bruchflächen eines Probekörpers des Referenzbetons.

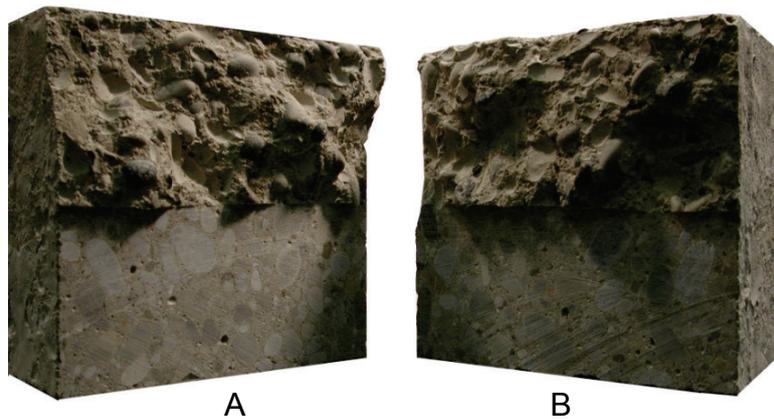


Abbildung 4.3.1: Bruchflächen des Probekörpers 1.1.a-3

Die mit dem Laserscanner gemessene, minimale Rauheit R_{\min} ergibt im Mittel aus 24 Werten (Bruchseite A und B je Probekörper): $R_{\min} = 1,131$ ($V = 0,020$). Folglich wird die Querschnittsfläche um 13,1 % vergrößert, so dass die dreidimensionale Bruchfläche $A_{3D} = 5719 \text{ mm}^2$ groß ist.

Die fraktale Analyse ergibt einen Mittelwert der fraktalen Dimension D_{GS} aller Bruchflächen von $D_{GS} = 2,031$ ($V = 0,002$). Abbildung 4.3.2 zeigt dazu den Verlauf der Mittelwerte der Rauheiten bei unterschiedlichen Punktabständen des Referenzbetons in einem bi-logarithmischen Maßstab. Zusätzlich ist in der Abbildung die untere und obere Grenze der ermittelten Werte angegeben. Aus den Wertepaaren $(\log(l), \log(R))$ ergibt sich eine Gerade. Die Steigung dieser Geraden stellt das fraktale Inkrement dar und ergibt addiert mit zwei (Dimension einer Fläche) die fraktale Dimension. Das

Bestimmtheitsmaß der linearen Regression ist in diesem Fall 0,966. Es liegt bei allen eigenen Testreihen in dieser Größenordnung (siehe Anhang).

Die Anzahl gescannter Punkte beträgt bei allen Testreihen etwa 20500 Punkte (bei dieser im Mittel: 20470). Der minimale Abstand benachbarter Punkte unter Berücksichtigung aller gescannten Punkte liegt in dieser Testreihe zwischen 0,43 und 0,47 mm und variiert mit der aufgenommenen Punktzahl; im Mittel ergibt sich ein Abstand von $l_{\min} = 0,457 \text{ mm}$ ($V = 0,028$).

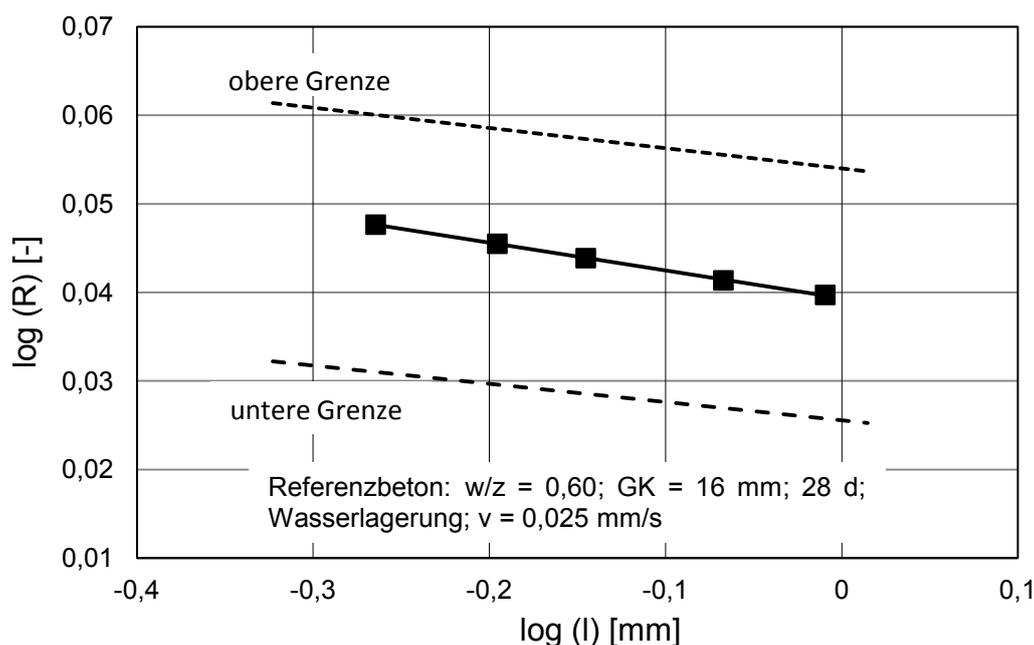


Abbildung 4.3.2: Bi-logarithmisches Diagramm zur Bestimmung von D_{GS} ; Mittelwertverlauf sowie Angabe des Bereichs der aufgetretenen Rauheiten (untere und obere Grenze)

Energiebetrachtung

Die Bruchenergie wurde aus der Kraft-Verformungskurve berechnet. Die mittlere Kraft-Verformungskurve wird aus den Wertepaaren (δ, F) der einzelnen Versuche einer Testreihe berechnet. Während der einzelnen Versuche traten die Maximalkräfte bei unterschiedlich großen Durchbiegungen auf; der Bezugspunkt der Kurve wird in allen Darstellungen in den Schnittpunkt $(0,0)$ gelegt. Dadurch kommt es zu Abweichungen zwischen den gerechneten Mittelwerten von δ_0 und F_{\max} aus den Einzelwerten gegenüber den ablesbaren Werten aus den dargestellten Mittelwertkurven.

Die mittlere Kraft-Verformungskurve und die minimale bzw. maximale Hüllkurve dieser Testreihe sind in Abbildung 4.3.3 gegeben. Für den Referenzbeton ergibt sich im Mittel aus 12 Versuchen für die Bruchenergie ein Wert von $W = 0,493 \text{ Nm}$

($V = 0,160$). Dieser Wert wurde bezüglich des Eigengewichts der Probekörper korrigiert. Die daraus berechnete spezifische Bruchenergie wird nach RILEM [102] auf die Querschnittsfläche bezogen und beträgt $G_{F,RILEM} = 97,4 \text{ N/m}$ ($V = 0,143$). Die spezifische Bruchenergie ändert sich zu $G_{F,3D} = 86,1 \text{ N/m}$ ($V = 0,134$) unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Bruchfläche. Die einzelnen Ergebnisse zur spezifischen Bruchenergie des Referenzbetons bezogen auf die dreidimensionale Bruchfläche können Abbildung 4.3.4 und dem Anhang „Referenzbeton“ entnommen werden.

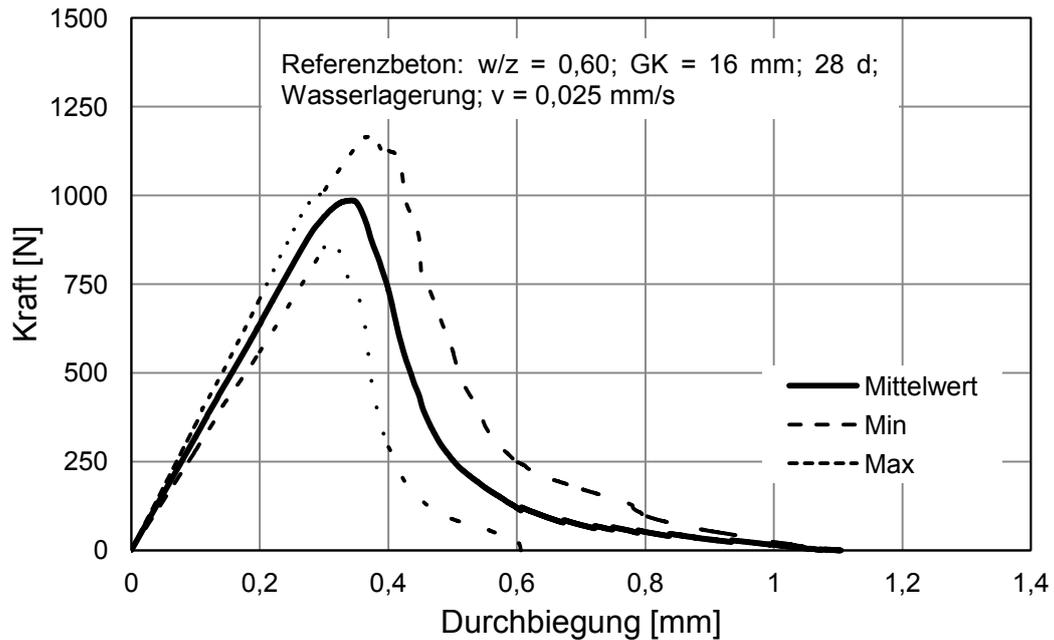


Abbildung 4.3.3: Mittlere, minimale und maximale Kraft-Verformungskurven aus 12 Versuchen

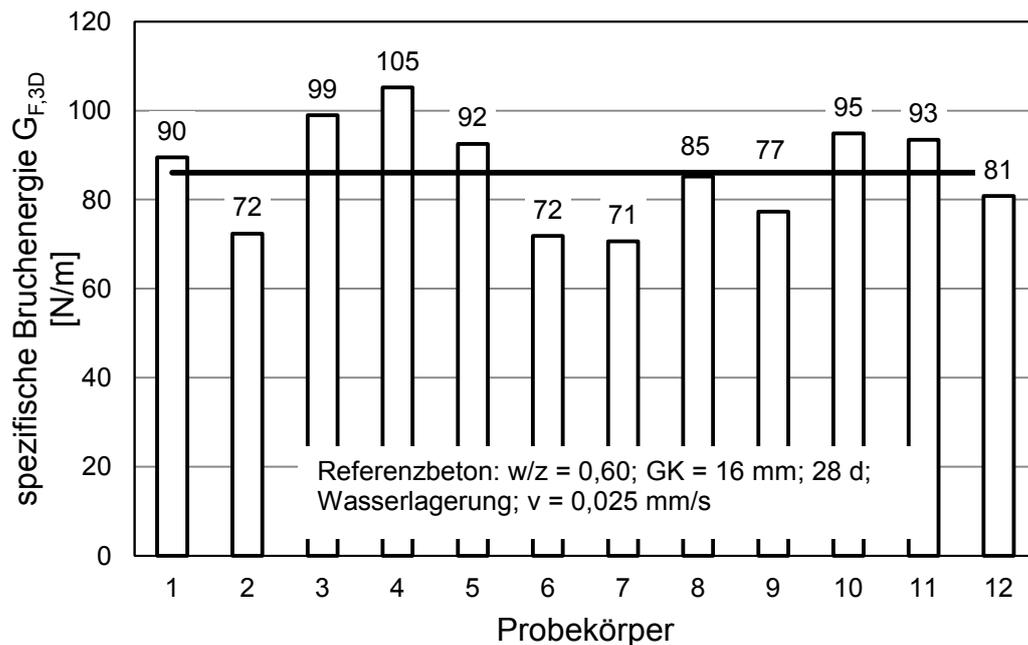


Abbildung 4.3.4: Einzelwerte der spezifischen Bruchenergie $G_{F,3D}$ dieser Testreihe

Zur Bestimmung der Bruchenergie und der Rissöffnung wurden folgende Werte gemessen, die in Tabelle 4.3.1 als arithmetisches Mittel wiedergegeben sind:

- Durchbiegung δ_0 direkt vor dem Versagen des Balkens,
- Maximalkraft F_{\max} ,
- Rissöffnung am Kerbgrund $w_{\delta,0}$ an der Stelle δ_0 und
- Rissöffnung am Kerbgrund $w_{F,\max}$ an der Stelle F_{\max} .

Tabelle 4.3.1: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung; hier: Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	δ_0 [mm]	F_{\max} [N]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,\max}$ [mm]
Mittelwert 1.1.a	0,887 (0,201)	1050 (0,071)	0,222 (0,347)	0,011 (0,091)

4.3.1.3 Diskussion

Die minimale Rauheit aus dieser Untersuchung ist kleiner als bekannte Ergebnisse vergleichbarer Betonzusammensetzungen aus der Literatur, vgl. Mechtcherine [84]. Diese Unterschiede können durch die Auflösung des Messsystems entstanden sein, von welcher die minimale Rauheit abhängt (vgl. Abschnitt 2.3.2). Die Werte der fraktalen Dimension als größenunabhängigen Parameter wurden in einer ähnlichen Größenordnung ermittelt wie in Mechtcherine [84].

Die Größe und Streuung der spezifischen Bruchenergie stimmen gut mit bekannten Ergebnissen überein (vgl. Abschnitt 2.1.6). Die spezifische Bruchenergie kann bei bekannter Größe der dreidimensionalen Bruchfläche auf diese bezogen werden anstatt wie üblich auf die Querschnittsfläche (vgl. RILEM [102]). Dadurch entspricht dieser Kennwert besser der Definition der spezifischen Bruchenergie als „notwendige Energie zur Erzeugung einer Einheitsfläche“.

4.3.2 Einfluss des Betonalters

4.3.2.1 Einführung

Mit zunehmendem Alter steigen die Festigkeit und die spezifische Bruchenergie des Betons an (vgl. Abschnitt 2.1.6). Gleichzeitig geht die Verformbarkeit zurück, wodurch sich der Beton steifer und gegebenenfalls spröder verhält. Um den Einfluss der Nacherhärtung und der Versprödung zu bestimmen, wurden Probekörper im Alter von 28 Tagen (Referenzbeton) und 91 Tagen geprüft.

Es wurden zwölf bruchmechanische Versuche durchgeführt, deren Einzelwerte im Anhang „Alter“ zu finden sind.

4.3.2.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die mittlere, minimale Rauheit R_{\min} nach 91 Tagen wurde zu $R_{\min,91d} = 1,092$ ($V = 0,011$) bestimmt und liegt rund 4 % unter R_{\min} nach 28 Tagen. Die dreidimensionale gemessene Bruchfläche beträgt damit $A_{3D,91d} = 5626 \text{ mm}^2$. Der Mittelwert der fraktalen Dimension sinkt von $D_{GS} = 2,031$ auf $D_{GS,91d} = 2,023$ ($V = 0,002$). Abbildung 4.3.5 zeigt die Oberflächenkennwerte mit Angabe ihrer Fehlerbalken.

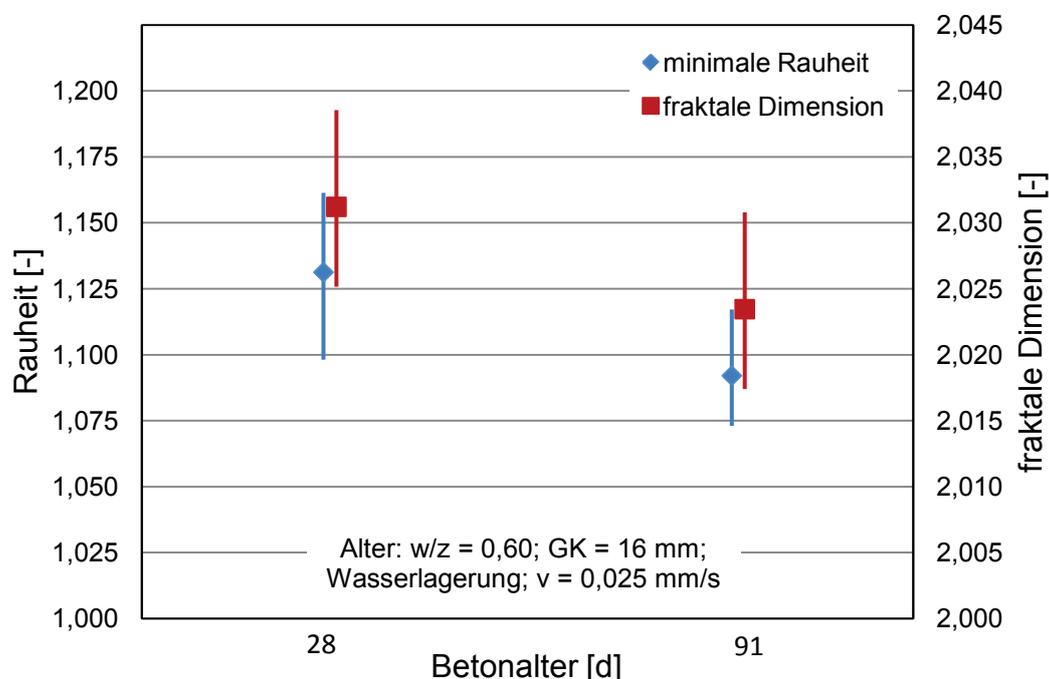


Abbildung 4.3.5: Minimale Rauheit und fraktale Dimension bei unterschiedlichem Betonalter

Energiebetrachtung

Bei der Betrachtung der Kraft-Verformungskurve (Abbildung 4.3.6) zeigt sich, dass die Maximalkraft im höheren Alter deutlich zunimmt (um ca. 20 %). Der Mittelwert aller Versuche beträgt 1262 N ($V = 0,063$). Der Unterschied zwischen der Maximalkraft aus der Kraft-Verformungskurve und der aus den Einzelwerten berechneten Maximalkraft hängt mit der Festlegung des Bezugspunkts der Kraft-Verformungskurven zusammen. Näheres findet sich in Abschnitt 4.3.1.

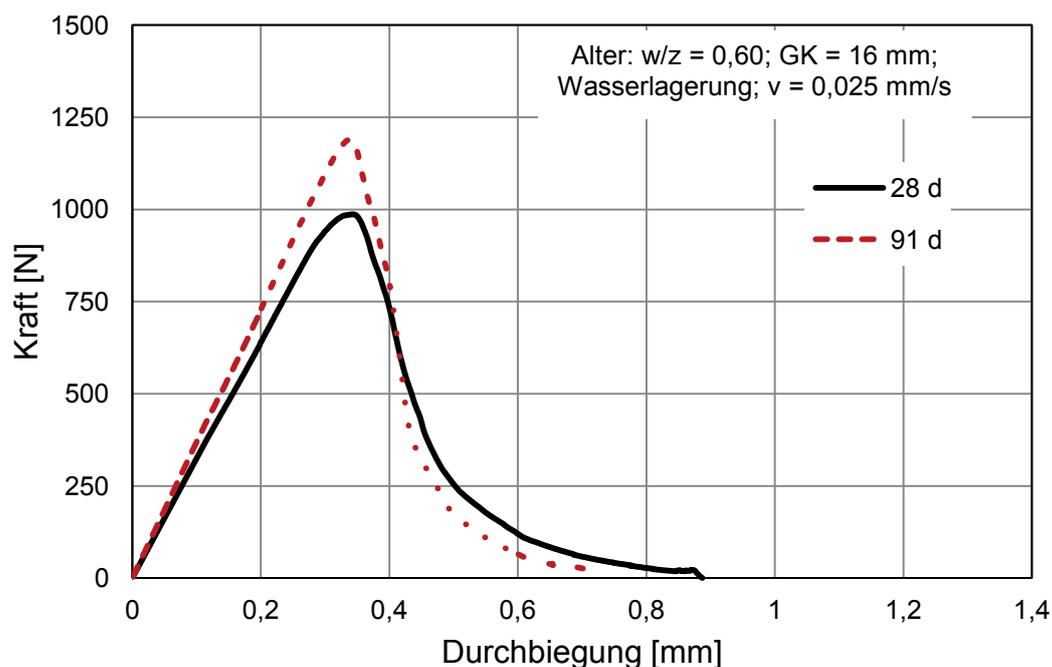


Abbildung 4.3.6: Mittlere Kraft-Verformungskurven bei unterschiedlichem Betonalter

Die gemessene Rissöffnung unmittelbar vor dem Versagen sinkt ebenso wie die Durchbiegung mit zunehmendem Alter ab (Tabelle 4.3.2). Die Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft $w_{F,max}$ änderte sich nicht.

Tabelle 4.3.2: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung; hier: Durchbiegung, Maximalkraft und Rissöffnung vor dem Versagen (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	δ_0 [mm]	F_{max} [N]	$w_{\delta,0}$ [mm]
28 d (1.1.a)	0,887 (0,201)	1050 (0,071)	0,222 (0,347)
91 d (1.2.a)	0,720 (0,136)	1262 (0,063)	0,163 (0,160)

Die Bruchenergie wurde nach 91 Tagen zu $W_{91d} = 0,468$ Nm ($V = 0,118$) bestimmt. Daraus wurde die spezifische Bruchenergie nach RILEM [102] zu $G_{F,RILEM,91d} = 90,8$ N/m ($V = 0,110$) berechnet. Die spezifische Bruchenergie sinkt mit zunehmendem Betonalter entgegen bekannten Ergebnissen (siehe Abschnitt 2.1.6) um durchschnittlich etwa 7 % ab.

Im Gegensatz dazu ist die Änderung der spezifischen Bruchenergie bezogen auf die dreidimensionale Bruchfläche zwischen den 28 d alten und den 91 d alten Probekörpern gering; $G_{F,3D,28d}$ beträgt **86,1 N/m ($V = 0,134$)** und $G_{F,3D,91d}$ beträgt **83,1 N/m ($V = 0,110$)**.

4.3.2.3 Diskussion

Der Vergleich des jüngeren mit dem älteren Beton zeigt den erwarteten Anstieg der Festigkeitswerte. Die Nacherhärtung und die damit verbundene geringere Verformbarkeit führen zu einem spröderen Verhalten des Betons. Die geringere Verformbarkeit zeigt sich in einer kleineren maximalen Durchbiegung.

Die ermittelten dreidimensionalen Bruchflächen sind für ältere Probekörper kleiner. Der Unterschied kommt durch die größere Anzahl an gebrochenen Gesteinskörnern zustande. Mit zunehmendem Alter umläuft der Trennriss weniger Gesteinskörner; stattdessen durchtrennt er sie. Dieses Verhalten deutet darauf hin, dass sich die Festigkeit der Zementsteinmatrix der der Gesteinskörnung annähert.

Im Gegensatz zu bekannten Literaturergebnissen [8 und 90] sinkt bei den eigenen Untersuchungen nach 91 Tagen die spezifische Bruchenergie nach RILEM [102] trotz deutlich höherer Maximalkraft. Auch im Vergleich mit der ansteigenden Druckfestigkeit sollte die spezifische Bruchenergie zunehmen (vgl. CEB-FIP Model Code 1990 [25]). Unter Berücksichtigung der dreidimensionalen Bruchfläche ändert sich die spezifische Bruchenergie nur geringfügig innerhalb des Streubereichs. Folglich sind keine Auswirkungen durch das Probenalter auf die spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ erkennbar. Die nahezu gleiche Größe der spezifischen Bruchenergie kommt durch unterschiedliche Effekte zustande; so sinkt einerseits die Durchbiegung mit dem Alter, während andererseits die Maximalkraft bzw. die Festigkeit zunimmt. Der ansteigende und der abfallende Ast der Kraft-Verformungskurve ist bei Probekörpern im Alter von 91 d deutlich steiler als bei jüngeren Probekörpern. Zusätzlich wirkt sich die kleinere dreidimensionale Bruchfläche im höheren Probenalter auf die Angleichung der spezifischen Bruchenergien $G_{F,3D}$ aus.

4.3.3 Einfluss der Lagerung

4.3.3.1 Einführung

Zwölf Probekörper wurden bis zur Prüfung im Wasserbad gelagert (im Folgenden Wasserlagerung genannt). Weitere zwölf Probekörper wurden nach 7 Tagen im Wasserbad bis zur Prüfung im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit gelagert (im Folgenden Trockenlagerung genannt). Beide Lagerungsarten sind in DIN EN 12390 [41] geregelt, wobei die Trockenlagerung in Deutschland die Regel ist.

Eine vergleichende Untersuchung beider Lagerungsarten zur Bruchenergie und zur Bruchfläche ist nicht bekannt. Allerdings zeigen Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten einen Anstieg der spezifischen Bruchenergie mit zunehmender Austrocknungsdauer der Probekörper (vgl. Blaschke [8]).

Alle Einzelwerte finden sich im Anhang „Lagerung“. In diesem Abschnitt sind die Mittelwerte der Ergebnisse sowie deren Variationskoeffizient dargestellt.

4.3.3.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Abbildung 4.3.7 zeigt die wichtigen Oberflächenparameter – minimale Rauheit und fraktale Dimension – für beide Lagerungsarten.

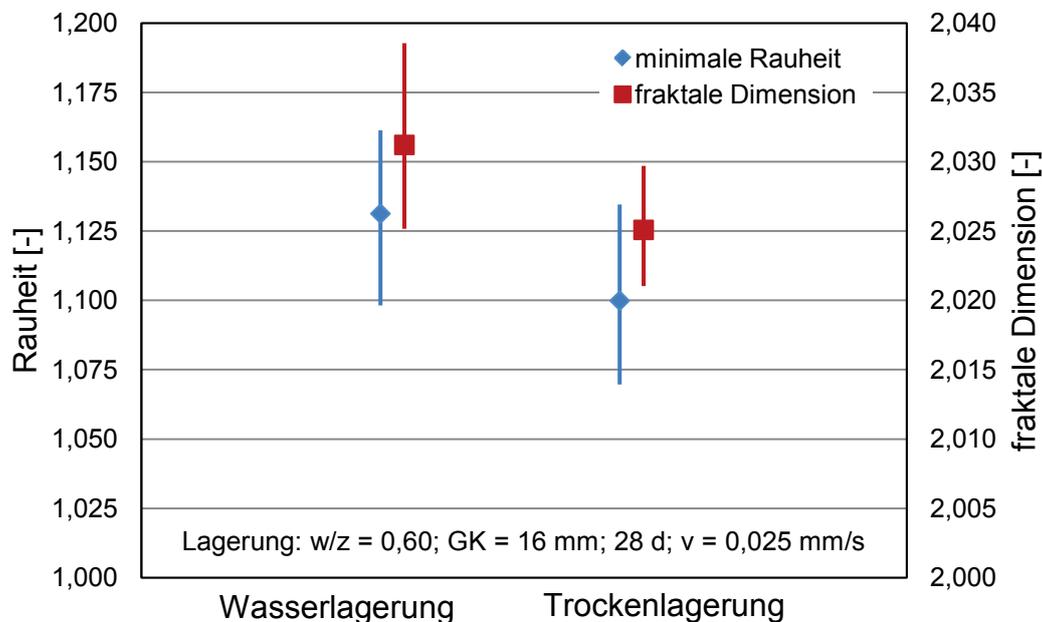


Abbildung 4.3.7: Minimale Rauheit und fraktale Dimension bei unterschiedlicher Lagerung

Bei der Messung mit dem Laserscanner konnte eine mittlere minimale Rauheit von $R_{\min,TL} = 1,100$ ($V = 0,016$) festgestellt werden. Daraus wurde die dreidimensionale Bruchfläche zu $A_{3D,TL} = 5852 \text{ mm}^2$ berechnet. Für die fraktale Dimension ergibt sich ein Wert von $D_{GS,TL} = 2,025$ ($V = 0,001$).

Beide Oberflächenparameter sind folglich bei trocken gelagerten Probekörpern kleiner als bei Wasser gelagerten Probekörpern. In Abbildung 4.3.8 sind zwei typische Bruchbilder dieser Testreihen zu sehen (links: eines wassergelagerten Probekörpers, rechts: eines trockengelagerten Probekörpers).

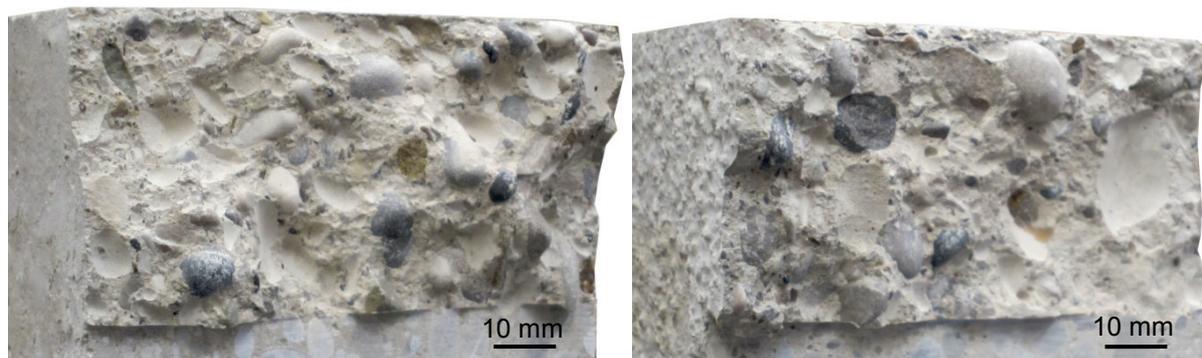


Abbildung 4.3.8: Typische Bruchflächen nach Wasser- (li.) und nach Trockenlagerung (re.)

Energiebetrachtung

Tabelle 4.3.3 zeigt die gemessenen Werte der bruchmechanischen Untersuchung. Die Durchbiegung der trockengelagerten Probekörper vor dem Versagen ist geringfügig größer als die der wassergelagerten Proben. Die Maximalkraft steigt deutlich auf 1388 N ($V = 0,072$) an. Die Werte der Rissöffnungen $w_{\delta,0}$ und $w_{F,max}$ unterscheiden sich hinsichtlich der Lagerungsart nicht bzw. nur gering.

Tabelle 4.3.3: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung; hier: Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	δ_0 [mm]	F_{max} [N]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,max}$ [mm]
WL (1.1.a)	0,887 (0,201)	1050 (0,071)	0,222 (0,347)	0,011 (0,091)
TL (1.3.a)	0,944 (0,182)	1388 (0,072)	0,202 (0,174)	0,010 (0,259)

In Abbildung 4.3.9 sind die mittleren Kraft-Verformungskurven beider Lagerungsarten gezeigt. Die daraus bestimmte Bruchenergie steigt bei Trockenlagerung gegenüber der der wassergelagerten Proben von $W = 0,493$ Nm ($V = 0,160$) auf $W_{TL} = 0,603$ Nm ($V = 0,147$).

Aus der Bruchenergie und der Querschnittsfläche wurde die spezifische Bruchenergie nach RILEM [102] zu $G_{F,RILEM,TL} = 113,3$ N/m ($V = 0,149$) berechnet. Dieser Wert entspricht einer Vergrößerung von 16 % gegenüber dem Wert der Wasserlagerung (97,4 N/m).

Die Berücksichtigung der dreidimensionalen Bruchfläche A_{3D} führt zu $G_{F,3D,TL} = 102,9$ N/m ($V = 0,138$). Die Untersuchung der wassergelagerten Probekörper ergibt eine spezifische Bruchenergie von $G_{F,3D} = 86,1$ N/m ($V = 0,134$).

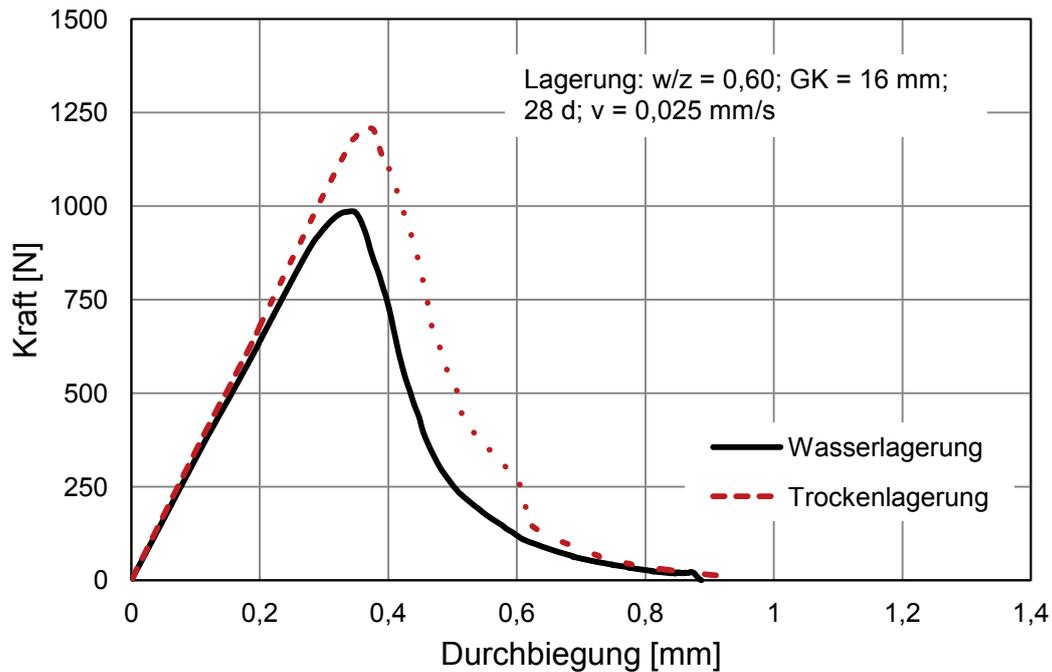


Abbildung 4.3.9: Mittlere Kraft-Verformungskurven bei unterschiedlicher Lagerung

4.3.3.3 Diskussion

Mit der Änderung von der Wasserlagerung zur Trockenlagerung konnten – wie erwartet – höhere Werte der Festigkeit gemessen werden. Die Druckfestigkeitswerte der Proben nach Trockenlagerung waren um 11 % höher als diejenigen der Referenzbetonlagerung.

Die geringere Bruchenergie der Probekörper infolge der Wasserlagerung kann mit der erhöhten Wassermenge in den Poren erklärt werden. Bei höherem Wassergehalt werden die aneinander haftenden Oberflächen durch den Spaltdruck des Wassers und die geschwächten van-der-Waals Bindungen leichter getrennt. Diese Erklärung formulierte Wittmann [128] im Zusammenhang mit der Beschreibung von hygri-schen Verformungen. Die geringere Bruchenergie ist rechnerisch ein Folge der geringeren Durchbiegung und der geringeren Maximalkraft. Die geringere Maximalkraft führt auch dazu, dass weniger Gesteinskörner gebrochen werden, sondern statt dessen vom Trennriss umlaufen werden. Das führt zu größeren Werten der minimalen Rauheit und der fraktalen Dimension, so dass die Bruchfläche gröber aussieht (siehe Abbildung 4.3.8).

4.3.4 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

4.3.4.1 Einführung

Aus unterschiedlichen Studien (vgl. Abschnitt 2.1) ist der Einfluss der Prüfgeschwindigkeit auf Kennwerte wie Festigkeit oder spezifische Bruchenergie bekannt. Der Anstieg dieser Kennwerte mit steigender Prüfgeschwindigkeit wurde bereits in Abschnitt 2.1.5 genannt.

In diesem Abschnitt wurden Probekörper mit vier unterschiedlichen Geschwindigkeiten geprüft. Gewählt wurden die mit der zur Verfügung stehenden Prüfmaschine mögliche langsamste und schnellste Geschwindigkeit, die Prüfgeschwindigkeit nach der RILEM-Empfehlung [102] als Referenzgeschwindigkeit und einer – im Vergleich dazu – doppelt so schnellen Prüfgeschwindigkeit. Die Anzahl der untersuchten Probekörper variierte zwischen zehn und zwölf Probekörpern. Die Einzelwerte finden sich im Abschnitt „Prüfgeschwindigkeit“. Im folgenden Abschnitt werden Mittelwerte der einzelnen Prüfgeschwindigkeiten und deren Variationskoeffizienten gezeigt.

4.3.4.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Mittelwerte der Querschnittsfläche, der minimalen Rauheit, der dreidimensionalen Fläche und der fraktalen Dimension sind in Tabelle 4.3.4 wiedergegeben. Die Werte der Tabelle sind absteigend nach ihrer Geschwindigkeit geordnet.

Tabelle 4.3.4: Gemessene und berechnete Werte der Oberfläche; hier: Querschnittsfläche, minimale Rauheit, dreidimensionale Bruchfläche und fraktale Dimension (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	A_Q [mm ²]	R_{min} [-]	A_{3D} [mm ²]	D_{GS} [-]
2,5 mm/s (1.7.c)	5499 (0,013)	1,115 (0,024)	6133 (0,027)	2,028 (0,003)
0,05 mm/s (1.7.a)	5200 (0,031)	1,112 (0,017)	5783 (0,035)	2,029 (0,002)
0,025 mm/s (1.1.a)	5055 (0,026)	1,131 (0,020)	5719 (0,037)	2,031(0,002)
0,00025 mm/s (1.7.b)	5348 (0,019)	1,124 (0,019)	6013 (0,026)	2,027 (0,001)

Die kleinste Rauheit wurde bei einer Prüfgeschwindigkeit von 0,05 mm/s bestimmt; die kleinste fraktale Dimension wurde für die langsamste Prüfgeschwindigkeit be-

rechnet. Die größten Werte der Rauheit und der fraktalen Dimension wurden für die Referenzgeschwindigkeit ermittelt. Die Abbildungen 4.3.10 und 4.3.11 zeigen die mittleren Werte der Rauheit und der fraktalen Dimension in Abhängigkeit von der logarithmisch aufgetragenen Prüfgeschwindigkeit. Die Werte der Rauheit und der fraktalen Dimension weisen keinen Zusammenhang zur Prüfgeschwindigkeit auf. Ihre Streubereiche überlappen sich.

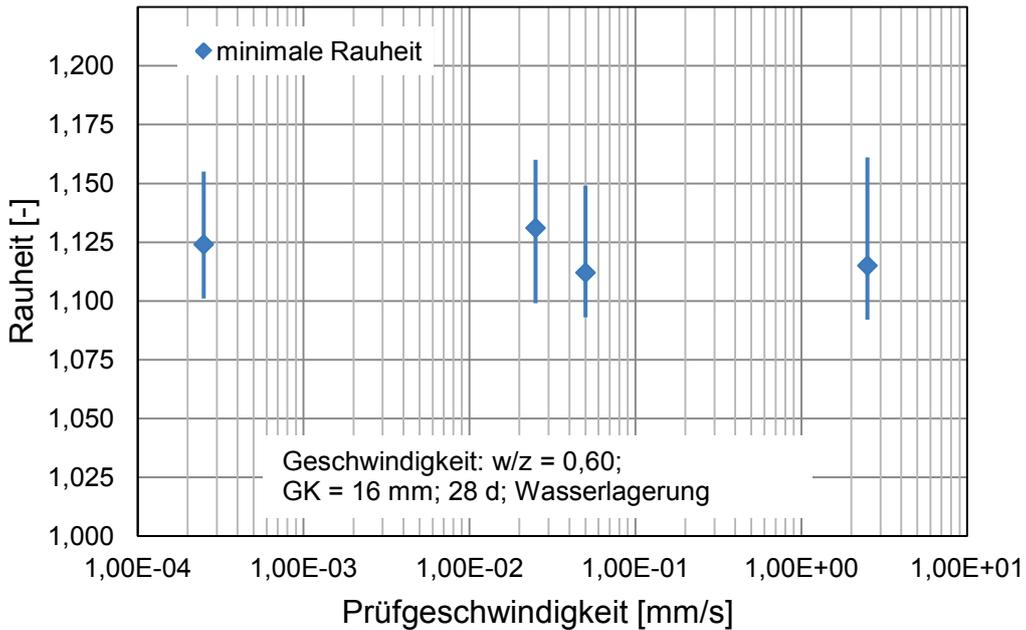


Abbildung 4.3.10: Minimale Rauheit bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

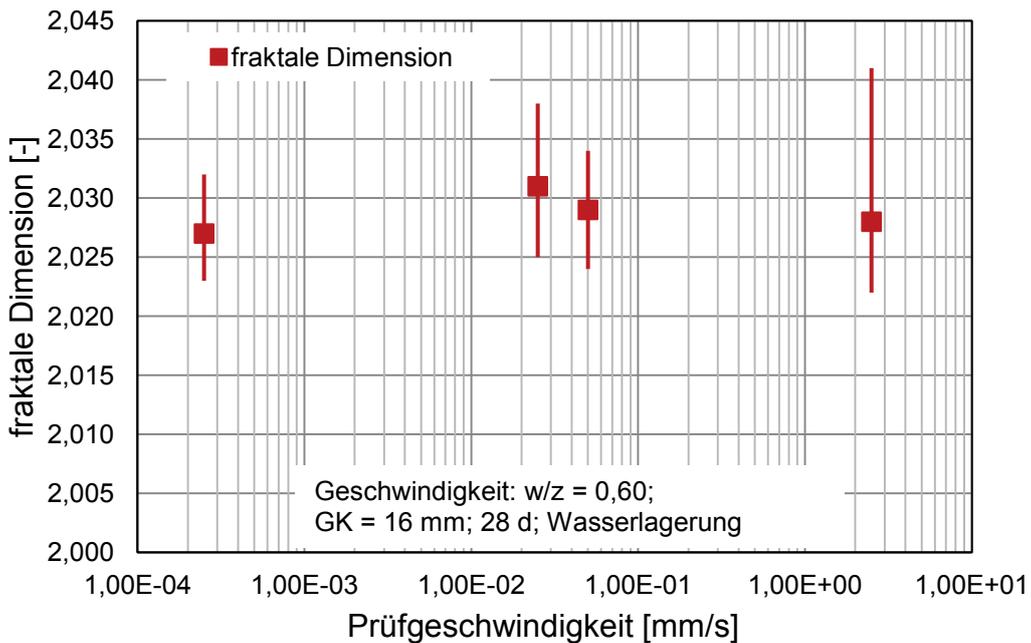


Abbildung 4.3.11: Fraktale Dimension bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Energiebetrachtung

Die gemessenen Kennwerte dieser Untersuchung gibt Tabelle 4.3.5 zusammenfassend wieder. Da die Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft nicht variiert, ist sie in dieser Tabelle nicht wiedergegeben. Sie liegt bei 0,011 mm.

Tabelle 4.3.5: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung; hier: Durchbiegung, Maximalkraft und Rissöffnung vor dem Versagen (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	δ_0 [mm]	F_{\max} [N]	$w_{\delta,0}$ [mm]
2,5 mm/s (1.7.c)	1,271 (0,338)	1516 (0,073)	0,365 (0,526)
0,05 mm/s (1.7.a)	0,950 (0,229)	1213 (0,065)	0,210 (0,257)
0,025 mm/s (1.1.a)	0,887 (0,201)	1050 (0,071)	0,222 (0,347)
0,00025 mm/s (1.7.b)	1,006 (0,368)	931 (0,073)	0,229 (0,454)

In Abbildung 4.3.12 sind die mittleren Kraft-Verformungskurven zur Bestimmung der Bruchenergie der unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten dargestellt. Die Maximalkraft steigt kontinuierlich mit steigender Prüfgeschwindigkeit an – von der geringsten Geschwindigkeit bis zur größten auf 163 % des Referenzwerts. Die Durchbiegung sinkt mit abnehmender Geschwindigkeit (Ausnahme: 1.7.b).

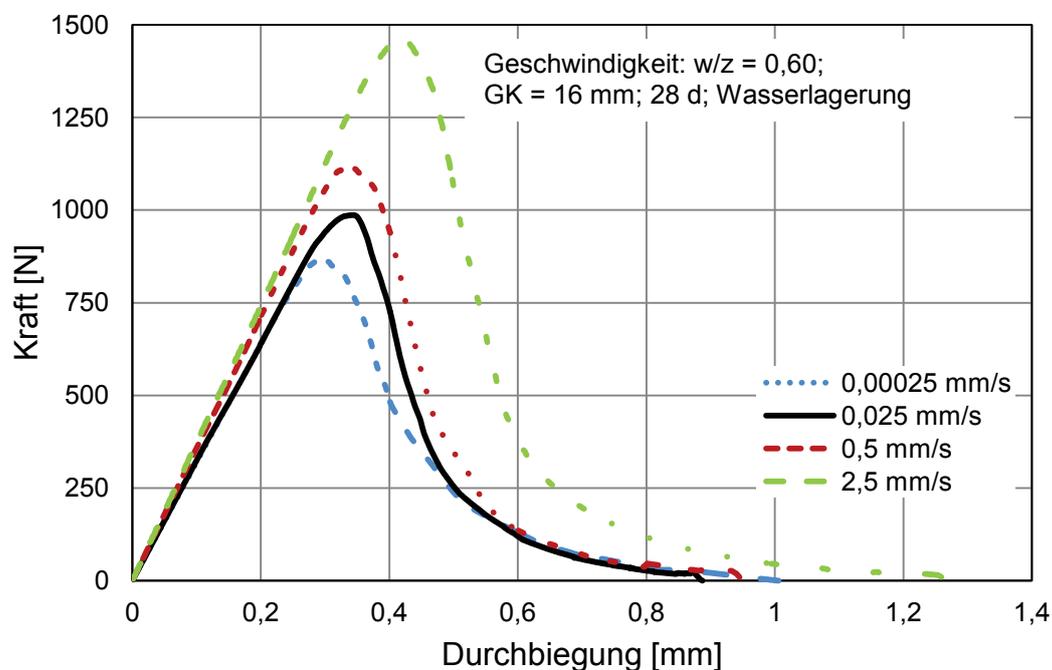


Abbildung 4.3.12: Mittlere Kraft-Verformungskurven der unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Die Untersuchung zur spezifischen Bruchenergie zeigen, dass mit ansteigender Prüfgeschwindigkeit die spezifische Bruchenergie zunimmt. Das gilt unabhängig da-

von, ob die Bruchenergie auf die Querschnittsfläche oder auf die dreidimensionale Bruchfläche bezogen wird. Tabelle 4.3.6 gibt die Werte zur Bruchenergie wieder.

Tabelle 4.3.6: Berechnete Werte der Bruchenergie W und der spezifischen Bruchenergien $G_{F,RILEM}$ und $G_{F,3D}$ (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	W [Nm]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
2,5 mm/s (1.7.c)	0,851 (0,233)	154,7 (0,226)	138,2 (0,208)
0,05 mm/s (1.7.a)	0,564 (0,157)	108,5 (0,147)	97,4 (0,144)
0,025 mm/s (1.1.a)	0,493 (0,160)	97,4 (0,142)	86,1 (0,134)
0,00025 mm/s (1.7.b)	0,500 (0,268)	93,2 (0,247)	82,8 (0,246)

In Abbildung 4.3.13 ist die Entwicklung von $G_{F,3D}$ über die unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten und deren Minimal- und Maximalbereiche gezeigt.

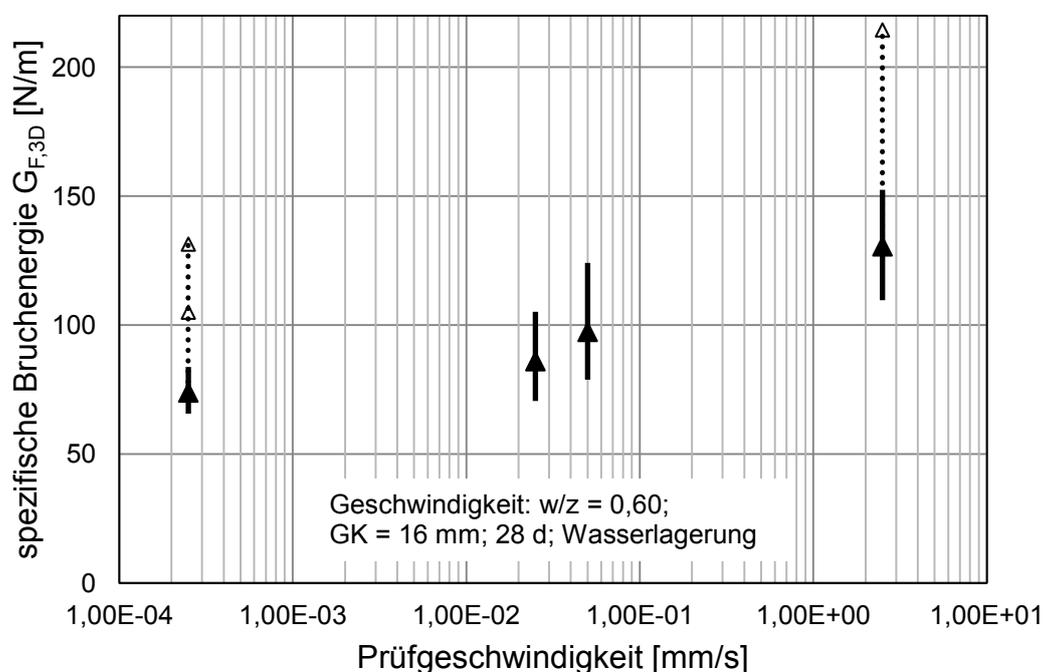


Abbildung 4.3.13: Spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ über die Prüfgeschwindigkeiten (Mittelwerte ohne Ausreißer)

Eine nähere Betrachtung der einzelnen Testreihen 1.7.b und 1.7.c (langsamste und schnellste Prüfgeschwindigkeit) zeigt Ausreißer gegenüber der Mehrheit der anderen Einzelwerte, die sich auch in den höheren Variationskoeffizienten niederschlagen.

Der Einfluss der Ausreißer innerhalb der Testreihen 1.7.b und 1.7.c auf die Mittelwerte der Bruchenergie ist groß. In der Testreihe 1.7.b wäre der Mittelwert der spezifischen Bruchenergie $G_{F,3D}$ ohne die beiden Ausreißer $G_{F,3D,0,00025} = 73,9$ N/m ($V = 0,079$). Die Nichtberücksichtigung des Ausreißers ($G_F = 214,5$ N/m) in Testreihe

1.7.c hätte eine Änderung auf $G_{F,3D,2,5} = 130,6 \text{ N/m}$ ($V = 0,110$) zur Folge. Die Variationskoeffizienten dieser Testreihen würden sich deutlich denen der anderen Testreihen anpassen. Ähnliche Aussagen können für die Bruchenergie bzw. die spezifische Bruchenergie nach RILEM [102] getätigt werden. Grund für die Ausreißer ist eine deutlich erhöhte Durchbiegung des jeweiligen Probekörpers gegenüber dem Mittelwert aller anderen Proben (zum Teil mehr als doppelt so groß). Im Fall ihrer Nichtberücksichtigung in der Mittelwertbildung sinkt die Durchbiegung in der Testreihe 1.7.b auf $0,842 \text{ mm}$ ($V = 0,134$); in 1.7.c wäre die Durchbiegung auf $1,158 \text{ mm}$ ($V = 0,190$) gefallen. Dadurch geht die Durchbiegung mit abnehmender Geschwindigkeit ausnahmslos zurück, während die Auswirkungen auf die Maximalkraft und auf die Oberflächenparameter nur gering sind.

4.3.4.3 Diskussion

Die eigenen Untersuchungen bestätigen, dass die Prüfgeschwindigkeit Einfluss auf nahezu alle gemessenen Werte ausübt. Mit steigender Prüfgeschwindigkeit nimmt sowohl die Maximalkraft bzw. Biegezugfestigkeit als auch die Durchbiegung zu.

Nach Reinhardt et al. [98] steigt die Festigkeit mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit (bis 10 GPa/s) auf Grund eines größeren Energiebedarfs durch eine erhöhte Anzahl an durchtrennten Gesteinskörnern und einer Mehrfachrissbildung. Wenn mehr Gesteinskörner durchtrennt werden, ergibt sich eine glattere Bruchfläche und damit eine geringere Rauheit.

Die größere Durchbiegung kann als Hinweis gesehen werden, dass es bei diesen Probekörpern zu einer ausgeprägteren Rissverzahnung gekommen ist. In diesen Fällen umläuft der Trennriss mehr Gesteinskörner, was zu einer größeren Rauheit führt, vgl. Abschnitt 2.1.

Abbildung 4.3.14 zeigt, wie sich eine geänderte Maximalkraft oder Durchbiegung auf den Rissverlauf (rot) auswirkt. Daraus wird deutlich, dass in dieser Untersuchung kein Zusammenhang zwischen Prüfgeschwindigkeit und Rauheit gefunden werden konnte, weil sowohl die Maximalkraft als auch die Durchbiegung, und damit die Rissverzahnung, zunehmen.

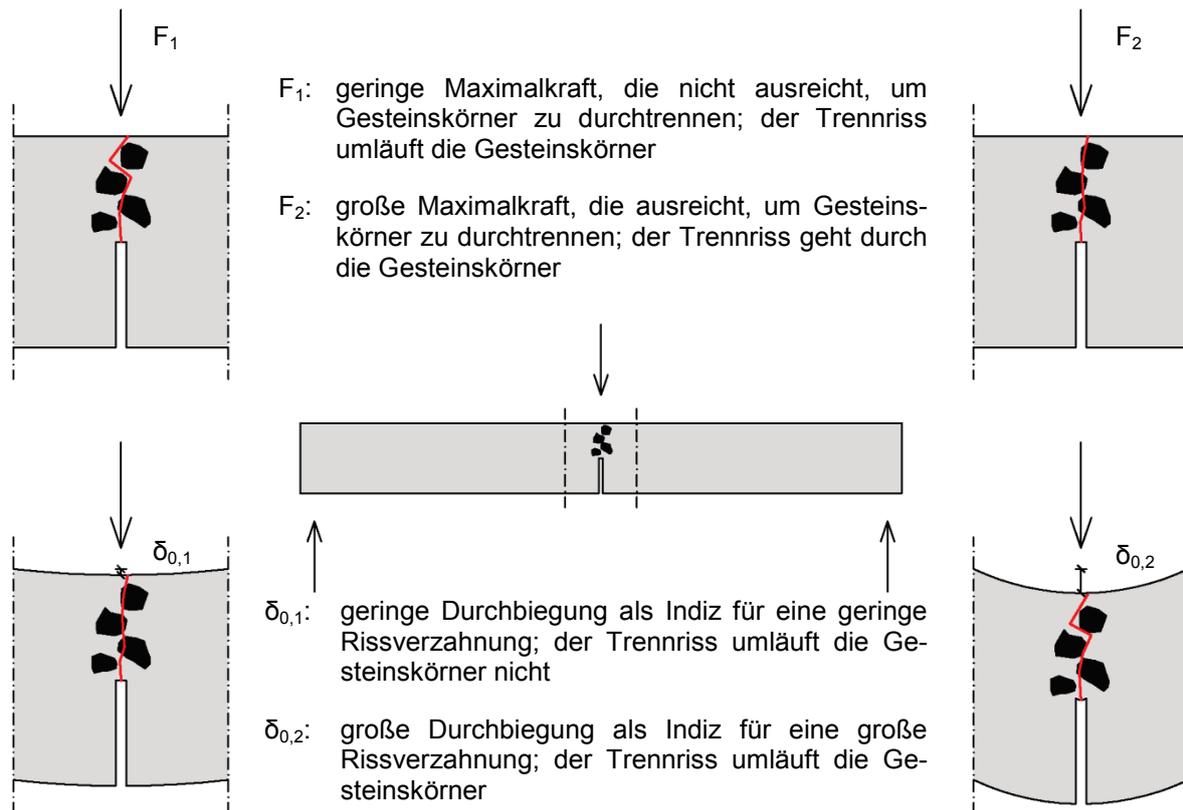


Abbildung 4.3.14: Darstellung des Rissverlaufs durch geänderte Maximalkraft (o.) oder geänderter Durchbiegung (u.) als Indiz der Rissverzahnung

Durch die Zunahme der beiden Kennwerte Maximalkraft und Durchbiegung mit größerer Prüfgeschwindigkeit werden aus den Kraft-Verformungskurven auch größere Bruchenergien bestimmt. Die erhöhte Energie führt dabei zum Durchtrennen der Gesteinskörner und / oder verlängert den Rissverlauf.

Die Ausreißer innerhalb der Messung der bruchmechanischen Kennwerte können nicht erklärt werden. Sie sind Folge sehr großer Durchbiegungen. An den zugehörigen Bruchflächen sind keine Besonderheiten bemerkbar.

4.3.5 Einfluss des w/z-Werts

4.3.5.1 Einführung

Der w/z-Wert ist einer der wichtigsten Parameter bei der Erstellung einer Betonzusammensetzung. Mit ihm können verschiedene Frisch- und Festbetoneigenschaften eingestellt werden.

In dieser Arbeit wurde ein w/z-Wert von 0,60 für den Referenzbeton gewählt, um ihn als Normalbeton ausführen zu können. Des Weiteren kamen eine Zusammensetzung mit einem w/z-Wert von 0,45 und eine mit 0,35 zum Einsatz.

Zu erwarten sind neben einem Anstieg der Festigkeit auch eine Zunahme der spezifischen Bruchenergie mit sinkendem w/z-Wert (siehe Abschnitt 2.1.6). Mit dem Anstieg der Druckfestigkeit nähern sich diese Betonzusammensetzungen dem Bereich des hochfesten Betons – die Druckfestigkeit der Zementsteinmatrix nähert sich der der Gesteinskörnung. Für die Bruchfläche kann in Folge der vermehrten Anzahl gebrochener Gesteinskörner ein glatteres Erscheinungsbild erwartet werden.

Die präsentierten Ergebnisse sind Mittelwerte aus jeweils zwölf Versuchen je w/z-Wert; in Klammern ist der Variationskoeffizient des Mittelwerts gegeben. Die Einzelwerte finden sich im Anhang „w/z-Wert“.

4.3.5.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Mittelwerte der Querschnittsfläche, der minimalen Rauheit, der dreidimensionalen Fläche und der fraktalen Dimension sind in Tabelle 4.3.7 wiedergegeben.

Tabelle 4.3.7: Gemessene und berechnete Werte der Oberfläche; hier: Querschnittsfläche, minimale Rauheit, dreidimensionale Bruchfläche und fraktale Dimension (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	A_Q [mm ²]	R_{min} [-]	A_{3D} [mm ²]	D_{GS} [-]
0,60 (1.1.a)	5055 (0,026)	1,131 (0,020)	5719 (0,041)	2,031 (0,002)
0,45 (1.5.a)	5160 (0,016)	1,098 (0,011)	5666 (0,022)	2,028 (0,002)
0,35 (1.5.b)	5253 (0,041)	1,097 (0,014)	5762 (0,038)	2,027 (0,001)

In Abbildung 4.3.15 sind die minimalen Rauheiten und deren Fehlerbalken zu sehen. Die minimalen Rauheiten von Betonen mit w/z-Werten von 0,35 und 0,45 sind fast identisch. Bei einem w/z-Wert von 0,60 wurde die größte minimale Rauheit gemessen.

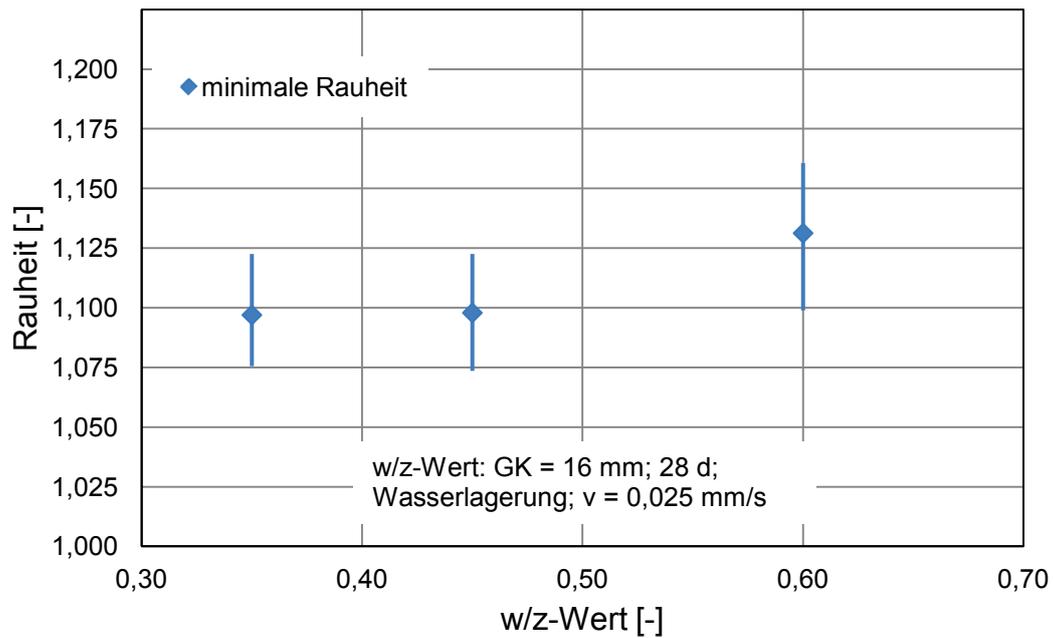


Abbildung 4.3.15: Minimale Rauheit der Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert

Abbildung 4.3.16 zeigt die berechneten Werte der fraktalen Dimension. Die Mittelwerte der fraktalen Dimension steigen tendenziell mit größerem w/z-Wert innerhalb eines sehr engen Bereichs.

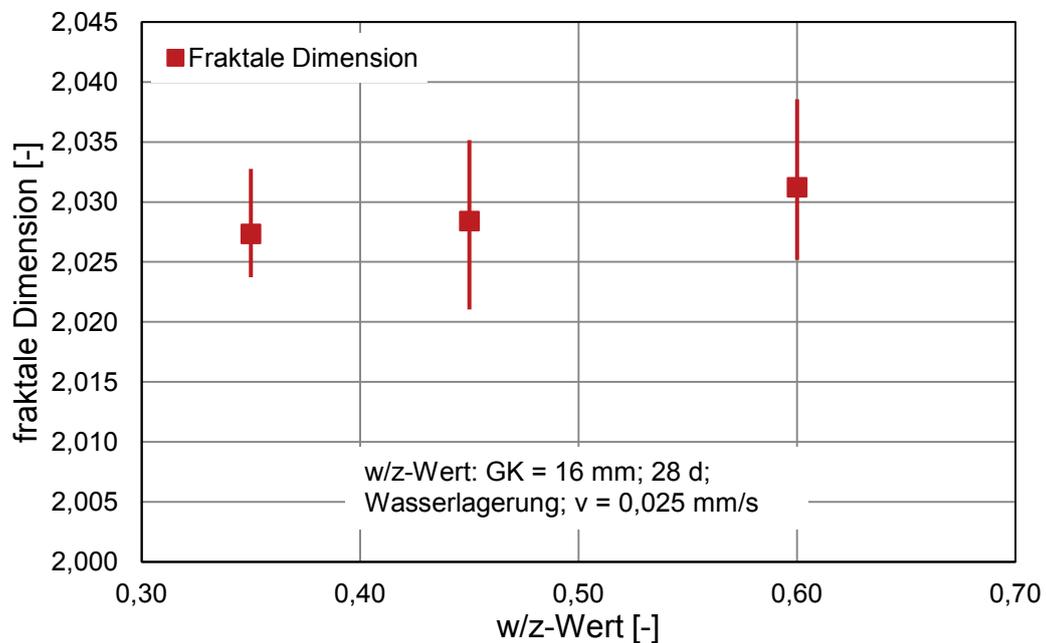


Abbildung 4.3.16: Fraktale Dimension der Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert

Energiebetrachtung

Abbildung 4.3.17 zeigt die mittleren Kraft-Verformungskurven der unterschiedlichen w/z-Werte.

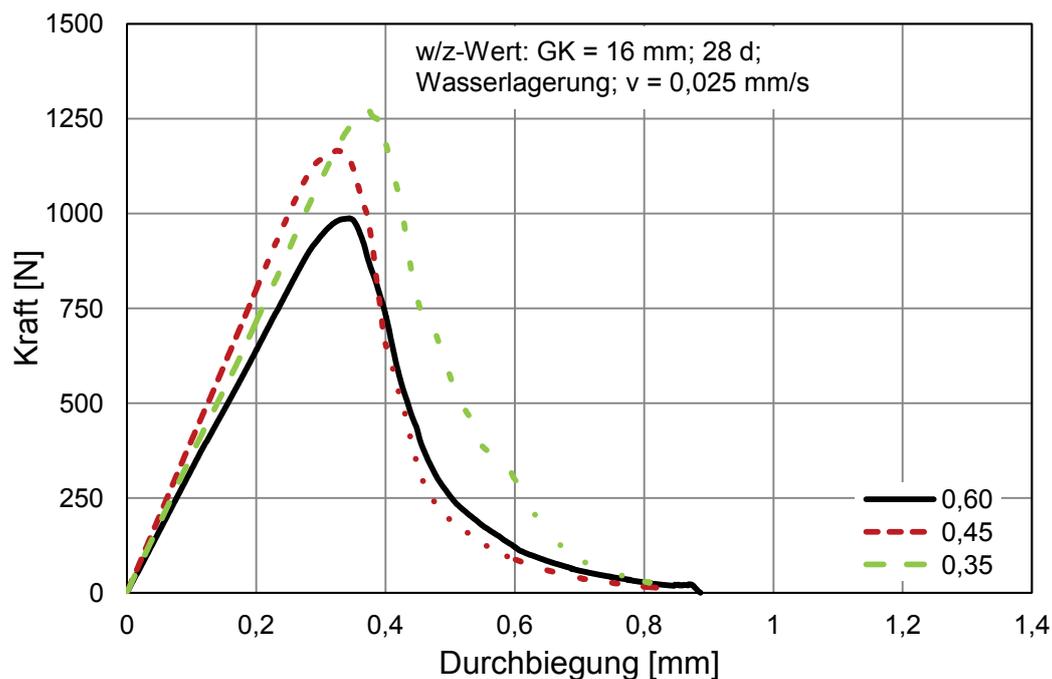


Abbildung 4.3.17: Mittlere Kraft-Verformungskurven der Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert

Die gemessenen Werte der bruchmechanischen Untersuchung unterscheiden sich nur in Bezug auf die Maximalkraft deutlich voneinander. Der größte Wert konnte bei einem w/z-Wert von 0,35 mit 1407 N ($V = 0,087$) ermittelt werden. Bei einem w/z-Wert von 0,45 ergibt sich eine maximale Kraft von 1250 N ($V = 0,060$). Der Referenzbeton mit $w/z = 0,60$ erreichte im Mittel eine Maximalkraft von 1050 N ($V = 0,072$). Die Durchbiegung änderte sich nur geringfügig (bei 0,60: 0,887 mm, bei 0,45: 0,828 mm und bei 0,35: 0,844 mm). Die Rissöffnung bei δ_0 fiel mit abnehmendem w/z-Wert von 0,222 mm über 0,203 mm zu 0,180 mm.

Die Bruchenergien W steigen mit sinkendem w/z-Wert; Tabelle 4.3.8 zeigt die berechneten Mittelwerte. Des Weiteren steigen auch die spezifischen Bruchenergien $G_{F,RILEM}$ und $G_{F,3D}$ mit kleinerem w/z-Wert an.

 Tabelle 4.3.8: Berechnete Werte der Bruchenergie W und der spezifischen Bruchenergien $G_{F,RILEM}$ und $G_{F,3D}$ (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	W [Nm]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
0,60 (1.1.a)	0,493 (0,160)	97,4 (0,142)	86,1 (0,134)
0,45 (1.5.a)	0,516 (0,114)	100,0 (0,119)	91,1 (0,118)
0,35 (1.5.b)	0,609 (0,199)	115,9 (0,198)	105,6 (0,191)

In Abbildung 4.3.18 sind die ermittelten spezifischen Bruchenergien $G_{F,3D}$ über den w/z-Wert dargestellt. Die Abbildung enthält auch die Fehlerbalken der Mittelwerte.

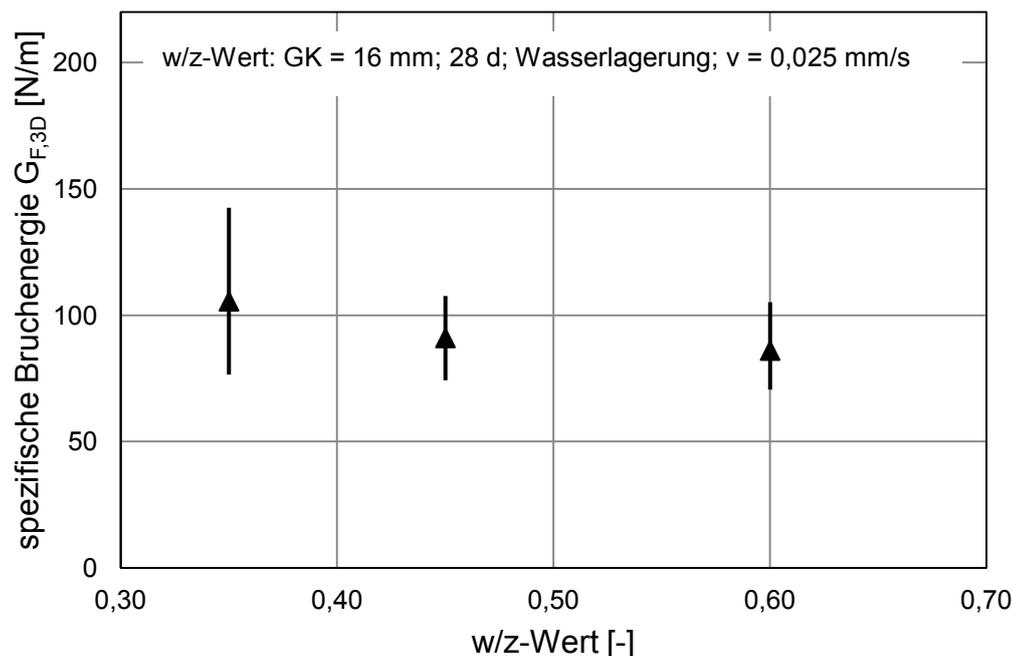


Abbildung 4.3.18: Spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ über den w/z-Wert

4.3.5.3 Diskussion

Wie zu erwarten war, steigen mit sinkendem w/z-Wert die Festigkeit und die spezifische Bruchenergie an. Remmel [99] gibt einschränkend eine Obergrenze der Bruchenergie für hochfeste Betone an. Der Anstieg von G_F ist in dieser Arbeit allein auf den Anstieg der Maximalkraft zurückzuführen, da sich die Durchbiegungen der drei w/z-Werte nicht wesentlich unterscheiden.

Betone mit einem w/z-Wert von 0,35 haben eine dichtere Matrix als Betonen mit Kapillarporen ($w/z > 0,40$). Beim Versagen dieser dichten Matrix muss mehr Energie aufgewendet werden als bei einer weniger dichten. Die Kapillarporen wirken als Sollbruchstellen bei der Trennung der Probekörper.

Abbildung 4.3.19 zeigt zwei typische Bruchflächen von Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 und 0,35. Bei Betonen mit niedrigerem w/z-Wert wird mehr Gesteinskörnung durchtrennt. Ihre Bruchflächen wirken weniger zerklüftet, stattdessen erscheinen sie insgesamt glatter. Ein Indiz für die Zerklüftung kann in der unterschiedlich großen Rissöffnung vor dem Versagen gesehen werden. Dass mehr Gesteinskörnung bricht, kann an einer Angleichung der Festigkeit der Zementsteinmatrix und der Gesteinskörnung liegen.

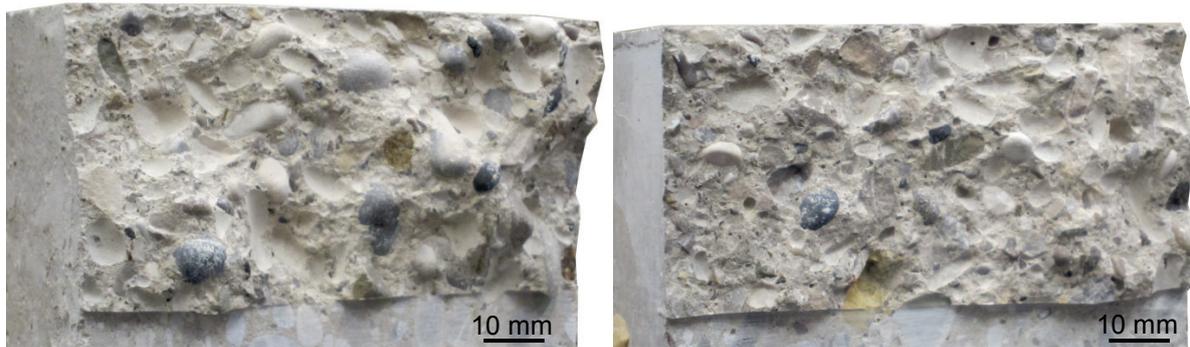


Abbildung 4.3.19: Typische Bruchflächen von Betonen mit $w/z = 0,60$ (li.) und mit $w/z = 0,35$ (re.)

4.3.6 Einfluss des Größtkorndurchmessers

4.3.6.1 Einführung

Mit zunehmendem Größtkorndurchmesser ist bezüglich der spezifischen Bruchenergie mit einem Anstieg zu rechnen. Der Größtkorndurchmesser ist neben der Druckfestigkeit einer der entscheidenden Einflussgrößen zur Bestimmung der Bruchenergie nach dem CEB-FIP Model Code 1990 [25]. Des Weiteren hängt die Duktilität bzw. Sprödigkeit von zementgebundenen Materialien vom Größtkorndurchmesser ab, vgl. Trunk und Blaschke [8 und 117].

Eine Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Testreihen wurde durch ein konstantes Verhältnis der Volumina des Zementleims zur Gesteinskörnung ermöglicht. In der Testreihe 1.6.c kam keine Gesteinskörnung zum Einsatz. Zu den Testreihen 1.6.a und 1.6.b konnten jeweils 12 Versuche und zur Testreihe 1.6.c 11 Versuche durchgeführt werden. Deren Mittelwerte werden im Folgenden mit den jeweiligen Variationskoeffizienten in Klammern gezeigt. Alle Einzelwerte können dem Anhang „Größtkorndurchmesser“ entnommen werden.

4.3.6.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die minimale Rauheit und die fraktale Dimension werden mit abnehmendem Größtkorndurchmesser kleiner. Für den Zementstein werden die kleinsten Werte aller Testreihen gemessen. In Abbildung 4.3.20 sind die Werte der Rauheit und in Abbildung 4.3.21 die Werte der fraktalen Dimension in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser gezeigt.

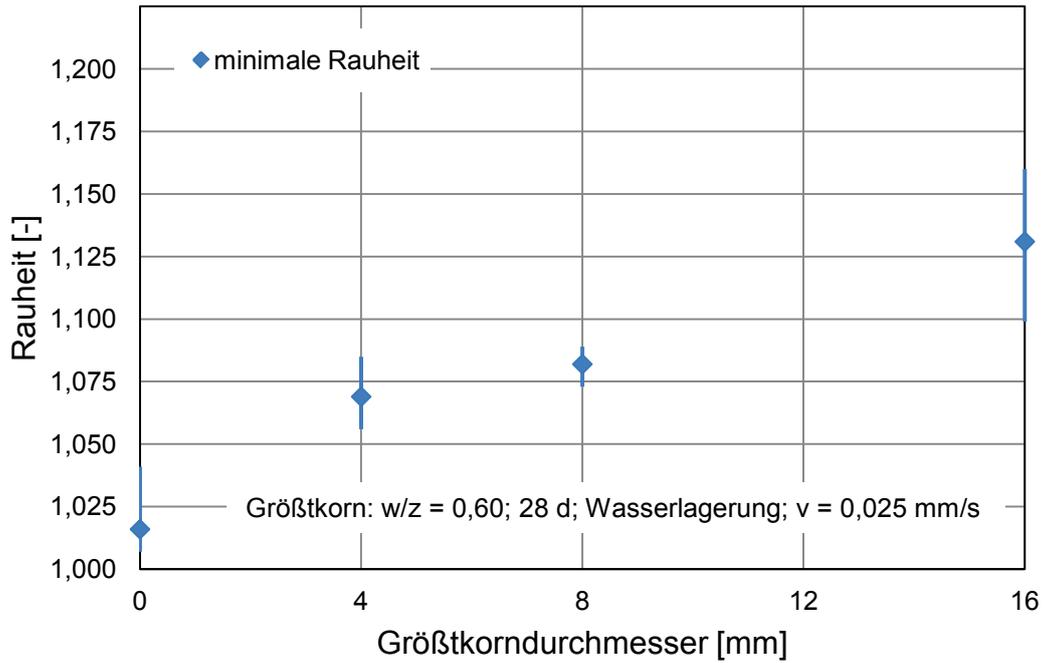


Abbildung 4.3.20: Minimale Rauheit der Betone mit unterschiedlichem Größtkorn

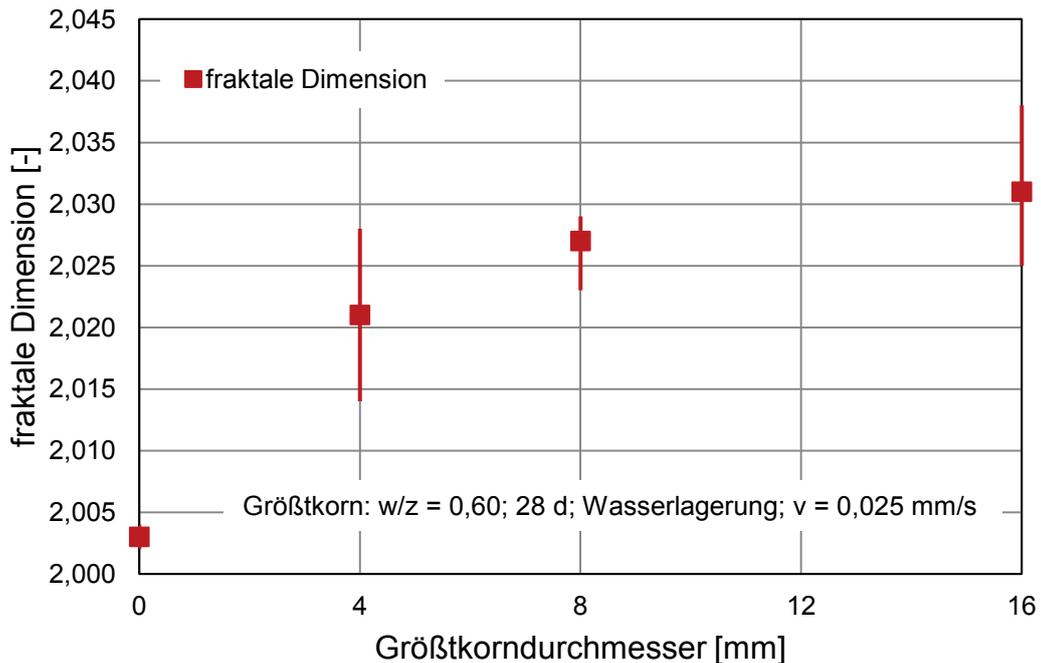


Abbildung 4.3.21: Fraktale Dimension der Betone mit unterschiedlichem Größtkorn

Repräsentative Bruchflächen der Betone mit unterschiedlichem Größtkorn sind in Abbildung 4.3.22 gezeigt. Es ist eine stärkere Zerklüftung der Bruchfläche bei größerem Größtkorn zu sehen. Der Anteil gebrochener zu ungebrochener Körnung gleicht beim Größtkorn 16 mm dem beim Größtkorn 8 mm. Die Bruchfläche der Probekörper mit 8 mm Größtkorn wirkt durch den kleineren Korndurchmesser deutlich glatter und

weniger zerklüftet. Die Probekörper der Mörtelmischung wiesen einen erhöhten Anteil an Luftporen auf (7 Vol.-%). Die größeren Poren sind deutlich sichtbar und haben Einfluss auf das Aussehen der Bruchflächen. Die Bruchflächen des Zementsteins sind sehr glatt und eben. Hier zeigen sich geringe Wölbungen.

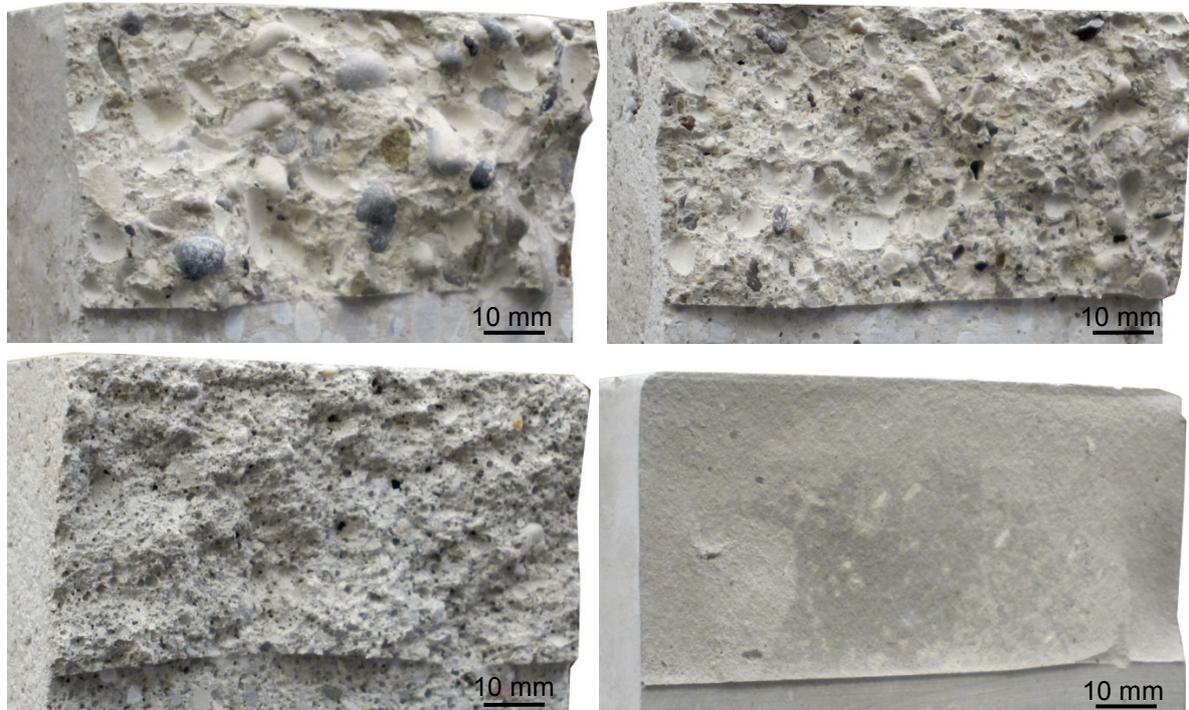


Abbildung 4.3.22: Repräsentative Bruchflächen der Betone mit unterschiedlichem Größtkorn; oben links: 16 mm, oben rechts: 8 mm, unten links: 4 mm und unten rechts: Zementstein

Die gemessenen Oberflächenparameter sind in Tabelle 4.3.9 wiedergegeben.

Tabelle 4.3.9: Gemessene und berechnete Werte der Oberfläche; hier: Querschnittsfläche, minimale Rauheit, dreidimensionale Bruchfläche und fraktale Dimension (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	A_Q [mm ²]	R_{min} [-]	A_{3D} [mm ²]	D_{GS} [-]
16 mm (1.1.a)	5055 (0,026)	1,131 (0,020)	5719 (0,037)	2,031 (0,002)
8 mm (1.6.a)	5603 (0,013)	1,082 (0,005)	6064 (0,013)	2,027 (0,001)
4 mm (1.6.b)	5114 (0,035)	1,069 (0,007)	5466 (0,034)	2,022 (0,002)
0 mm (1.6.c)	5065 (0,030)	1,016 (0,010)	5146 (0,030)	2,003 (0,0004)

Energiebetrachtung

Die gemessenen Werte der bruchmechanischen Untersuchung sind in Tabelle 4.3.10 zusammengefasst.

Tabelle 4.3.10: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung; hier: Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	δ_0 [mm]	F_{max} [N]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,max}$ [mm]
16 mm (1.1.a)	0,887 (0,201)	1050 (0,071)	0,222 (0,347)	0,011 (0,091)
8 mm (1.6.a)	0,767 (0,104)	1235 (0,054)	0,224 (0,496)	0,010 (0,100)
4 mm (1.6.b)	0,728 (0,120)	1000 (0,063)	0,207 (0,169)	0,013 (0,192)
0 mm (1.6.c)	0,277 (0,137)	574 (0,172)	-*	0,008 (0,125)

*: Wert konnte nicht sinnvoll bestimmt werden

Die mittleren Kraft-Verformungskurven zeigen eine Zunahme der Maximalkraft für Betone mit 8 mm Größtkorndurchmesser und anschließend eine Abnahme mit kleiner werdendem Größtkorn (Abbildung 4.3.23). Die Durchbiegung nimmt mit kleiner werdendem Größtkorndurchmesser ab. Die mittleren Kurven wurden, wie in Abschnitt 4.3.1.2 beschrieben, berechnet. Unterschiede in den Kurven zu Werten in den Tabellen 4.3.10 und 4.3.11 hängen mit dem Bezugspunkt der Kurve (0/0) zusammen. Das Verhalten der Probekörper des Zementsteins (1.6.c) ist als sehr spröde einzustufen; ein abfallender Ast der Kraft-Verformungskurve stellt sich nur in wenigen Tests ein. Daher wird hier auf die Darstellung einer gemittelten Kraft-Verformungskurve verzichtet. Auch die Rissöffnung vor dem Versagen konnte zwar in einigen Fällen bestimmt werden, wurde aber in den meisten Versuchen von der Messtechnik nicht mehr erfasst. Die gemessene Durchbiegung des Zementsteins ist gering.

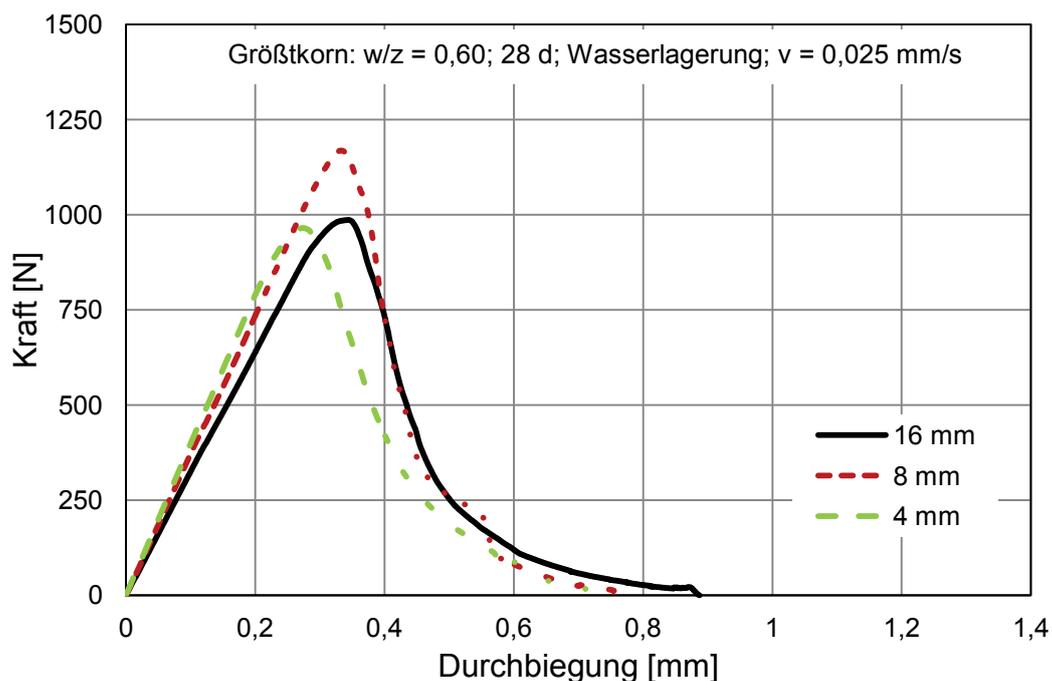


Abbildung 4.3.23: Mittlere Kraft-Verformungskurven der Betone mit unterschiedlichem Größtkorn

Die Bruchenergie W unterscheidet sich nicht für die Größtkörner 16 mm und 8 mm, nimmt aber mit kleinerem Größtkorn ab. Der größte Unterschied in der Bruchenergie findet sich im Vergleich mit dem Zementstein. Die spezifische Bruchenergie sinkt sowohl bezogen auf die dreidimensionale Bruchfläche als auch auf die Querschnittsfläche mit kleinerem Größtkorn ab. Tabelle 4.3.11 enthält die Mittelwerte der unterschiedlichen Bruchenergien.

Tabelle 4.3.11: Berechnete Werte der Bruchenergie W und der spezifischen Bruchenergien $G_{F,RILEM}$ und $G_{F,3D}$ (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	W [Nm]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
16 mm (1.1.a)	0,493 (0,160)	97,4 (0,142)	86,1 (0,134)
8 mm (1.6.a)	0,493 (0,127)	88,0 (0,126)	81,3 (0,124)
4 mm (1.6.b)	0,426 (0,100)	80,9 (0,101)	75,7 (0,101)
0 mm (1.6.c)	0,123 (0,218)	24,2 (0,201)	23,9 (0,205)

Abbildung 4.3.24 zeigt die spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ zusammen mit den Ergebnissen der Biegezugfestigkeit. Beide Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf.

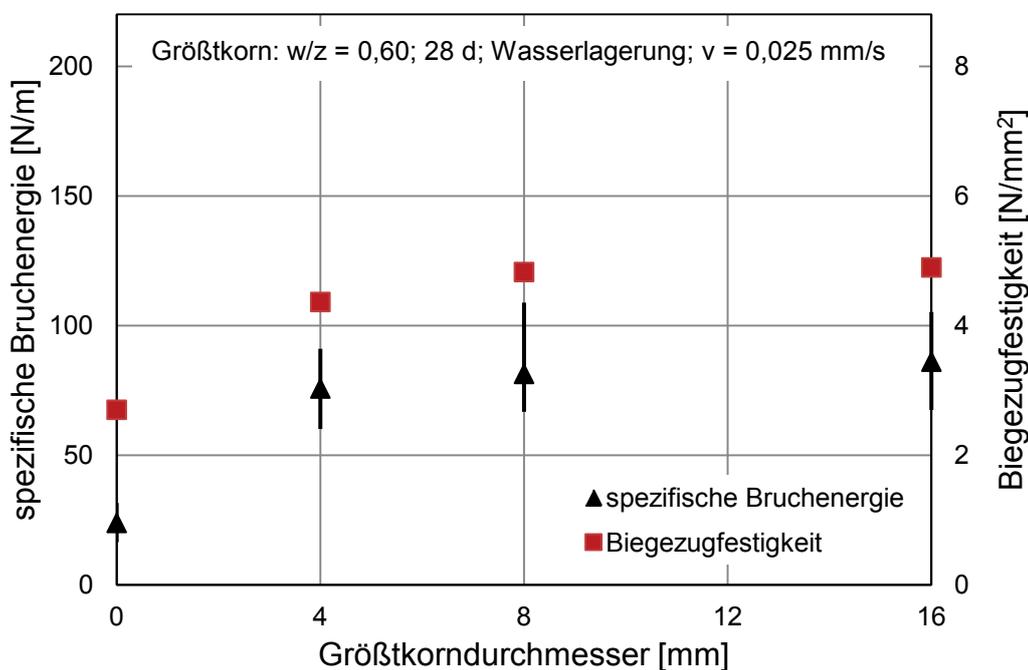


Abbildung 4.3.24: Spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ und Biegezugfestigkeit über den Größtkorndurchmesser

4.3.6.3 Diskussion

Die untersuchten Betone mit den Größtkorndurchmessern 8 mm und 16 mm können als Normalbeton klassifiziert werden. Beim Normalbeton umläuft der sich bildende

Trennriss in der Regel die Gesteinskörnung und trennt die Zementsteinmatrix bzw. die Kontaktzone Zementsteinmatrix / Gesteinskörnung. Diese Überlegung gilt auch für die untersuchte Mörtelmischung. Ein kleineres Größtkorn kann durch einen Trennriss einerseits leichter umlaufen werden, da der Umlaufweg kürzer ist als bei einem großen Größtkorn; andererseits sind im gleichen Volumen mehr Gesteinskörner untergebracht, so dass mehr Körner umlaufen werden müssen. Die entstandenen Bruchflächen in dieser Arbeit bestätigen diese Überlegungen. Bei Betonen mit kleinerem Größtkorn wirken die Bruchflächen weniger zerklüftet und die Werte der minimalen Rauheit sowie der fraktalen Dimension sinken. Des Weiteren sinkt die Bruchenergie erwartungsgemäß mit kleinerem Größtkorn, da weniger Energie dissipiert wird (vgl. Mechtcherine [84] und Abschnitt 2.1.6).

An den Bruchflächen der Mörtelmischungen zeigt sich außerdem ein großer Anteil an Luftporen. Auf Grund ihrer Größe werden sie bei der Bestimmung der Rauheit berücksichtigt. Durch diese Poren werden die Probekörper deutlich poröser, so dass weniger Energie zu Erzeugung der Bruchfläche notwendig ist. Andererseits wird der Trennriss an jeder Luftpore gestoppt; das führt zu einem längeren Rissweg und dadurch zu einem Anstieg der Bruchenergie, vgl. Abschnitt 2.1.5.

Der reine Zementstein reagiert sehr spröde. Auf Grund der fehlenden Gesteinskörnung kann es zu keiner Rissverzahnung kommen; die Bruchfläche ist sehr glatt. Der Wert der fraktalen Dimension wurde nahe bei 2 (ideale 2-dimensionale Fläche) bestimmt. Dass der Wert nicht exakt bei 2 lag, liegt an den leichten Wölbungen der Bruchfläche.

4.3.7 Diskussion der bruchmechanischen Ergebnisse

Die eigenen bruchmechanischen Untersuchungen sind auf die erzeugten Bruchflächen fokussiert. Deshalb sollen diese im Folgenden detailliert im Gesamtzusammenhang diskutiert werden.

Bei der Betrachtung zweier Bruchflächen A und B des gleichen Probekörpers kann erwartet werden, dass eine Bruchfläche der Negativabdruck der anderen ist. Abbildung 4.3.25 zeigt die Gegenüberstellung der minimalen Rauheiten aller Bruchflächen A und B der gescannten Probekörper sowie die Mittelwerte der einzelnen Testreihen. Bei einer genauen Übereinstimmung beider Bruchseiten A und B würden alle Punkte auf der eingezeichneten Diagonalen liegen.

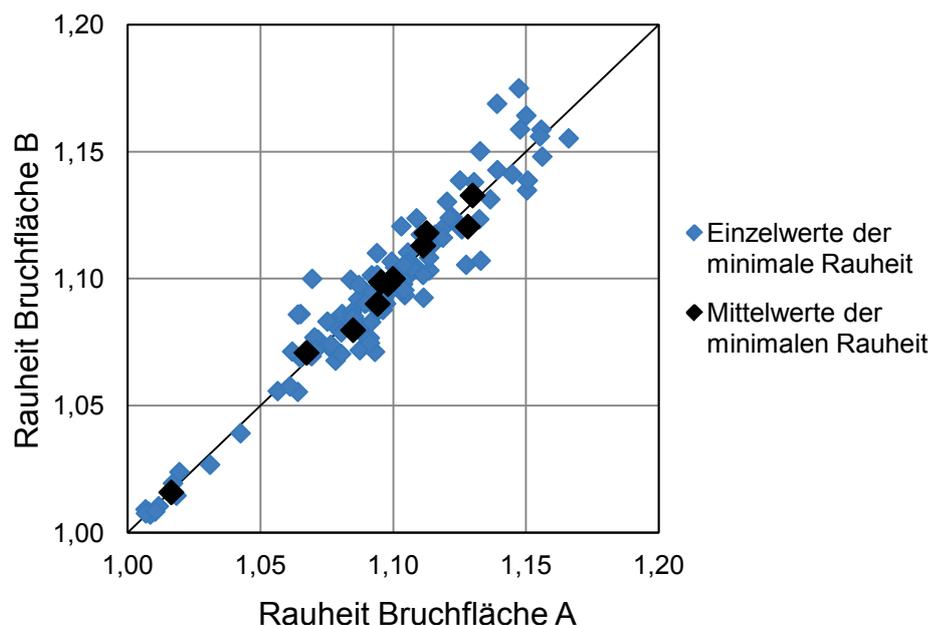


Abbildung 4.3.25: Gegenüberstellung der Rauheiten der Bruchflächen A und B

Diese Übereinstimmung kann vor allem für die Mittelwerte der Testreihen als zutreffend bewertet werden. Geringe Unterschiede können mit kleineren Abplatzungen beim Ausbau der Probekörper aus der Prüfmaschine und dem Transport der Probekörper erklärt werden. Ähnliche Ergebnisse können für die Werte der fraktalen Dimension ermittelt werden.

Die Rauheit wird durch ihre Skalenabhängigkeit vom genutzten Messsystem beeinflusst. Zur Einordnung der eigenen Ergebnisse in bekannte Studien muss ein Vergleich mit einem möglichst unabhängigen Kennwert durchgeführt werden. Die fraktale Dimension gilt als unabhängiger Kennwert und beträgt für den Referenzbeton dieser Arbeit 2,031. Sie ist damit annähernd so groß, wie die fraktale Dimension ($D_{GS} = 2,039$), die Mechtcherine in seiner Arbeit für eine ähnliche Betonzusammensetzung angibt [84, Seite 102]. Zu berücksichtigen ist hierbei allerdings, dass die Bruchflächen aus zentrischen Zugversuchen stammen.

In dieser Arbeit wird ein tendenzieller Anstieg der fraktalen Dimension mit einer zunehmenden minimalen Rauheit festgestellt. Dieser Zusammenhang ist nicht überraschend, da die fraktale Dimension u. a. aus der Rauheit gebildet wird, und führt zu folgendem Zwischenfazit: **Mit zunehmender fraktaler Dimension ist die Bruchfläche größer.** Damit ist gezeigt, dass ein skalenunabhängiger Oberflächenkennwert eine Änderung der Bruchfläche beschreibt. Die Änderung findet aber innerhalb eines

sehr engen Bereichs statt. Daher wird in den Diskussionspunkten dieser Arbeit zu meist auf die Rauheit zurückgegriffen, welche die Unterschiede deutlicher und anschaulicher aufzeigt.

In den einzelnen Abschnitten konnte gezeigt werden, dass die Rauheit bzw. fraktale Dimension von unterschiedlichen Einflussgrößen (Alter, Lagerung, Prüfgeschwindigkeit, w/z-Wert und Größtkorn) abhängt. Es zeigte sich, dass die Änderung der Oberflächenkennwerte auf ein geändertes Materialverhalten zurückzuführen ist. Dabei konnte Folgendes festgestellt werden:

- Infolge höherer Werte der Biegezugfestigkeit werden mehr Gesteinskörner durchtrennt, so dass die Rauheit der Bruchfläche kleiner wird.
- Wenn eine höhere Durchbiegung gemessen wurde, sind auch weniger gebrochene Gesteinskörner festgestellt worden. Die höhere Durchbiegung kann als Indiz einer größeren Rissverzahnungen angesehen werden, die einhergeht mit einer größeren Rauheit. Diese Folgerung wird unterstützt durch die Beobachtung einer größeren Rissöffnung $w_{\delta 0}$ bei größerer Durchbiegung.

Aus der minimalen Rauheit und der Querschnittsfläche wird die dreidimensionale Bruchfläche bestimmt. Unter der Annahme, dass diese Bruchfläche durch die gemessene Bruchenergie entstanden ist, wird im Folgenden versucht, einen Zusammenhang herzustellen. Abbildung 4.3.28 zeigt alle gemessenen Einzelwerte der Bruchenergie über die dreidimensionale Bruchfläche. Zusätzlich sind die Mittelwerte der jeweiligen Testreihen eingetragen. Eine lineare Regression aller Einzelwerte führt zu einem Bestimmtheitsmaß von $R_{EW}^2 = 0,5273$ (mittlere Korrelation). Die Regressionsgerade ist durch Gleichung 4.2 bestimmt.

$$A_{3D} = 2000 \cdot W + 4200$$

Gl.4.2

Der lineare Zusammenhang zwischen Bruchfläche und Bruchenergie ist nur tendenziell zu erkennen, die Streuung der Einzelwerte ist groß. Ein Grund dafür kann darin gesehen werden, dass eine erhöhte Anzahl gebrochener Gesteinskörner zu einer kleineren Bruchfläche führt, gleichzeitig wird mehr Bruchenergie bei der Trennung von Gesteinskörnern verbraucht als bei der Trennung der Zementsteinmatrix. Trotz dieser Widersprüche kann festgehalten werden, dass in dieser Untersuchung tendenziell **eine größere Bruchenergie mit einer größeren Bruchfläche einhergeht.**

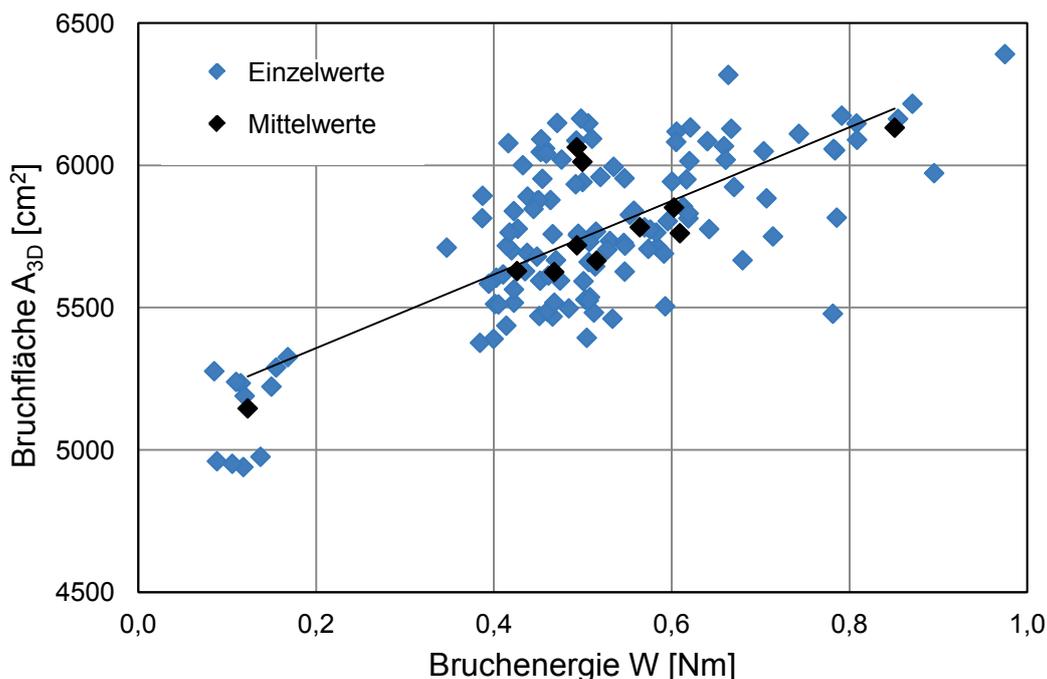


Abbildung 4.3.26: Zusammenhang zwischen spezifischer Bruchenergie und dreidimensionaler Bruchfläche

Aus der Bruchenergie W und der dreidimensionalen Bruchfläche A_{3D} kann die spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ berechnet werden. Dieser Kennwert gibt an, wie viel Energie zur Erzeugung einer Einheitsfläche notwendig ist. Die gemessenen spezifischen Bruchenergien decken sich zum Großteil mit bekannten Ergebnissen (vgl. Abschnitt 2.1.6) und werden daher nicht mehr ausführlich diskutiert. Einzig der Einfluss der Alterung konnte nicht bestätigt werden. Erklärungen dazu sind bereits in Abschnitt 4.3.2 aufgeführt.

Die bekanntermaßen, großen Streuungen bei der Bestimmung der spezifischen Bruchenergie mussten auch in dieser Arbeit festgestellt werden (vgl. berechnete Variationskoeffizienten). Die gewählte Probenanzahl muss als ausreichend groß akzeptiert werden.

4.3.8 Zusammenfassung der bruchmechanischen Untersuchung

Innerhalb der bruchmechanischen Untersuchungen konnten die entstehenden Bruchflächen und die dazu notwendige Energie für verschiedene Einflüsse analysiert werden. Dabei wurde festgestellt, dass die spezifische Bruchenergie und die Bruchfläche zum Teil unterschiedlich beeinflusst werden. Entscheidend zur Bestimmung dieser Werte sind insbesondere die Rissverzahnung und die Biegezugfestigkeit. Die Größe dieser Kennwerte hängt wiederum von den Einflussgrößen dieser Untersuchung ab.

Die Auswertung der Oberflächenkennwerte zeigte, dass die Rissverzahnung und die Biegezugfestigkeit für die Bestimmung der minimalen Rauheit entscheidend sind. Eine größere Rissverzahnung wird begleitet durch eine größere minimale Rauheit und zeigt sich in einer größeren Durchbiegung. Ein Anstieg der Biegezugfestigkeit führt zu einer größeren Anzahl gebrochener Gesteinskörner. Dadurch sinkt die minimale Rauheit; die Bruchflächen wirken weniger stark zerklüftet. Des Weiteren wurde mit Hilfe der fraktalen Dimension gezeigt, dass die Änderung der Bruchfläche bzw. der minimalen Rauheit unabhängig vom Messsystem bzw. Messraster ist.

In Abschnitt 4.3.7 wurde ein Zusammenhang zwischen der Bruchenergie W und der dreidimensionalen Bruchfläche A_{3D} gezeigt. Tendenziell steigt die Bruchfläche mit zunehmender Bruchenergie an. Einschränkend muss aber erwähnt werden, dass kleinere Bruchflächen auch dann entstehen können, wenn eine größere Anzahl Gesteinskörner durch eine höhere Biegezugfestigkeit durchtrennt wird. Diese Trennung von Gesteinskörnern kann dabei mitunter mehr Bruchenergie verbrauchen (vgl. Abschnitt 2.1.5). Die aus der Bruchenergie und der Bruchfläche berechnete spezifische Bruchenergie verhält sich erwartungsgemäß innerhalb der einzelnen Einflüsse und kann gut in Einklang mit bekannten Ergebnissen gebracht werden.

4.4 Ergebnisse der ballistischen Untersuchungen

4.4.1 Massenermittlung

Zu Beginn der Ergebnispräsentation der ballistischen Untersuchung werden die ermittelten Massen der einzelnen Testreihen gezeigt. Die Massenermittlung ist wichtig, um beurteilen zu können, ob die Erfassung aller Partikel und Bruchstücke ausreichend genau ist. Nur dann kann davon ausgegangen werden, dass die berechneten Bruchoberflächen den tatsächlichen entsprechen können.

Die Massen der Probekörper wurden direkt vor und nach dem Versuch zu m_v bzw. m_n bestimmt. Sie setzen sich nach der Perforation aus der Masse der Platte m_{PI} und der Masse der einzelnen Fragmente (Partikel und Bruchstücke) m_{Fr} zusammen. In den zeitlich später durchgeführten Untersuchungen mit der CPA und im Scannerverfahren wurde die Probenmasse m_{Fr} geteilt und lag in getrockneter Form als m_{CPA} bzw. m_{SV} vor. Die nachfolgende Tabelle 4.4.1 zeigt zusammenfassend die Mittelwerte der verschiedenen Massen aller untersuchten Testreihen vor und nach der Perfo-

ration sowie deren mittleren Massenverlust. Alle Einzelwerte können dem jeweiligen Anhang einer Testreihe entnommen werden.

Die Verluste beim Sammeln der Partikel sind bezogen auf die Gesamtmasse des Probekörpers gering und liegen in allen Testreihen unter 0,25 %. Es kann davon ausgegangen werden, dass alle groben Partikel bzw. Bruchstücke gefunden und somit in der Oberflächenberechnung berücksichtigt wurden. Der Massenverlust wird feinste Partikel betreffen.

Tabelle 4.4.1: Mittelwerte der Massen der untersuchten Testreihen

Testreihe	m_v [g]	m_{PI} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.1.b	11183,0	10830,0	326,6	11156,6	26,5
3.2.a	11093,5	10670,0	400,0	11096,1	4,6
3.3.a	11000,5	10669,0	309,3	10978,3	22,2
3.5.a	11316,5	10876,0	426,9	11302,9	13,6
3.5.b	11375,0	10940,0	423,5	11363,5	11,5
3.6.a	10802,0	10582,5	219,2	10801,7	0,4
3.6.b	10291,9	10153,0	138,0	10291,0	0,9
3.6.c	7884,4	7150,0*	719,5	7869,5	14,9
3.7.a	11121,0	10863,5	236,8	11100,3	20,7
3.7.b	11198,6	10955,0	228,3	11183,3	15,4

*: keine vollständig erhaltenen Platten; mittlere Summe der Masse von Bruchstücken > 350 g

4.4.2 Referenzbeton

4.4.2.1 Einführung

Neben den Ergebnissen der ballistischen Versuche und den zugehörigen Oberflächenuntersuchungen werden für den Referenzbeton auch Vergleichs- und Reproduktionsergebnisse mit anderen Methoden und Modellen durchgeführt. Diese Ergebnisse finden sich im Anhang „erweiterte Untersuchungen“. Die Ergebnisse des Referenzbetons werden wie bereits bei den bruchmechanischen Untersuchungen zu jedem Einfluss herangezogen.

Bei der Durchführung der Untersuchung wurden elf Probekörper beschossen, von denen aber nur zehn Probekörper in die folgende Mittelwertbetrachtung (in Klammern: Variationskoeffizient) eingehen. Der Probekörper 3.1.a-8 wurde zwar perforiert,

aber die Kamera löste nicht rechtzeitig aus. Da die Energiebetrachtung folglich nur an 10 Probekörpern stattfinden kann, werden auch die weiteren Ergebnisse des Probekörpers 3.1.a-8 nicht bei der Betrachtung der Oberfläche berücksichtigt. Dieses Problem ist der Sensibilität des Untersuchungsaufbaus geschuldet und musste auch bei anderen Testreihen beachtet werden. Alle Einzelwerte inklusive die gemessenen Werte der Probe 3.1.a-8 finden sich im Anhang „Referenzbeton“.

4.4.2.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Meso-Mikro-Ebene

Die Einteilung der Partikel in Klassen nach der Siebreihe R 20 / 3 erfolgte mit dem minimalen Feretdurchmesser, vgl. Abschnitt 3. Obwohl eine vorherige Siebung des Materials mit dem Sieb der Maschenweite 25 mm durchgeführt wurde, wurden einige wenige Partikel mit diesem Verfahren einer Klasse größer 25 mm zugeordnet (in vier Einzelproben). Abbildung 4.4.1 zeigt die Verteilung der Partikelanzahl in den einzelnen Klassen.

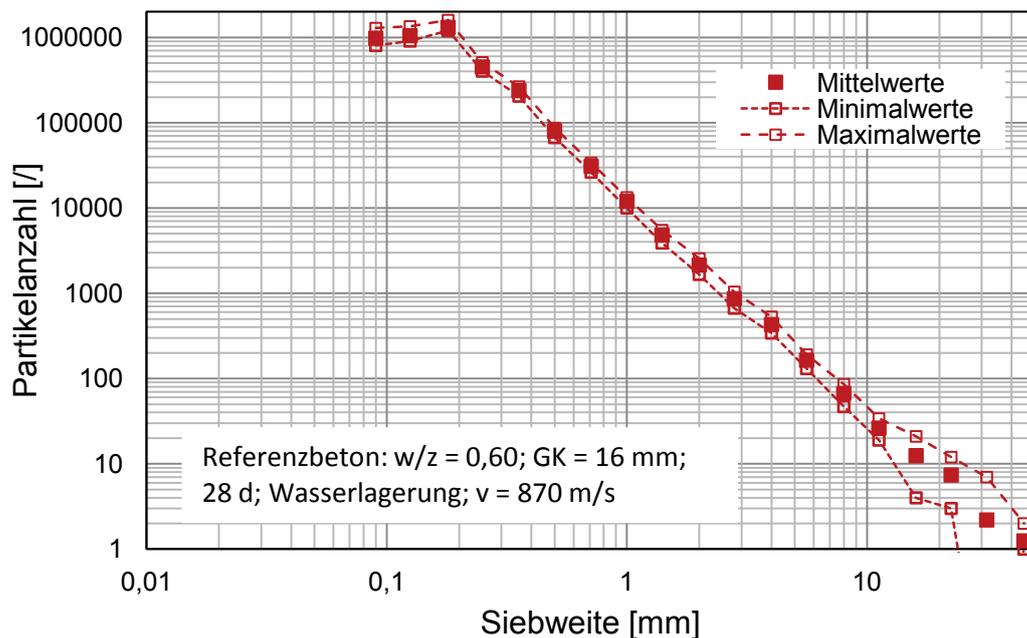


Abbildung 4.4.1: Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Siebweite

Die Untersuchung mit dem CPA ergibt im Mittel der zehn Probekörper 4,173 Millionen Partikel ($V = 0,110$) zwischen 0,063 mm und 45 mm Partikelgröße bei einer durchschnittlichen Masse von $m_{CPA} = 250,0$ g ($V = 0,160$). Diese Masse entspricht 2,3 % der mittleren Gesamtmasse der Probekörper. Die größte Anzahl an Partikel innerhalb einer Klasse wurde in der Klasse 0,125 / 0,18 mm mit 1,317 Millionen Par-

tikel festgestellt. Während bis zu dieser Klasse mit abnehmender Größe ein stetiger Partikelanstieg verzeichnet wird, sinkt die Partikelanzahl mit kleinerer Klasse wieder.

Neben der Anzahl der Partikel wurde für jede Klasse auch die mittlere Sphärizität $1/\psi_c$ als Maß der Rundheit der Partikel bestimmt. Diese liegt für den Referenzbeton zwischen 1,12 und 1,50. Die aus dem minimalen Feretdurchmesser und der zugehörigen senkrechten Länge gebildete Ellipse besitzt die Sphärizität $1/\psi_{Eli}$. Für die einzelnen Klassen variiert dieser Wert zwischen 1,03 und 1,22. Der Wert steigt mit zunehmendem Verhältnis von Länge zu Feretdurchmesser an. Im Bereich der kleinsten gemessenen Siebweite haben die Partikel eine längliche Form mit einem Verhältnis von Länge zu Feretdurchmesser von bis zu 2,9. Abbildung 4.4.2 zeigt die beiden Sphärizitäten der einzelnen Klassen.

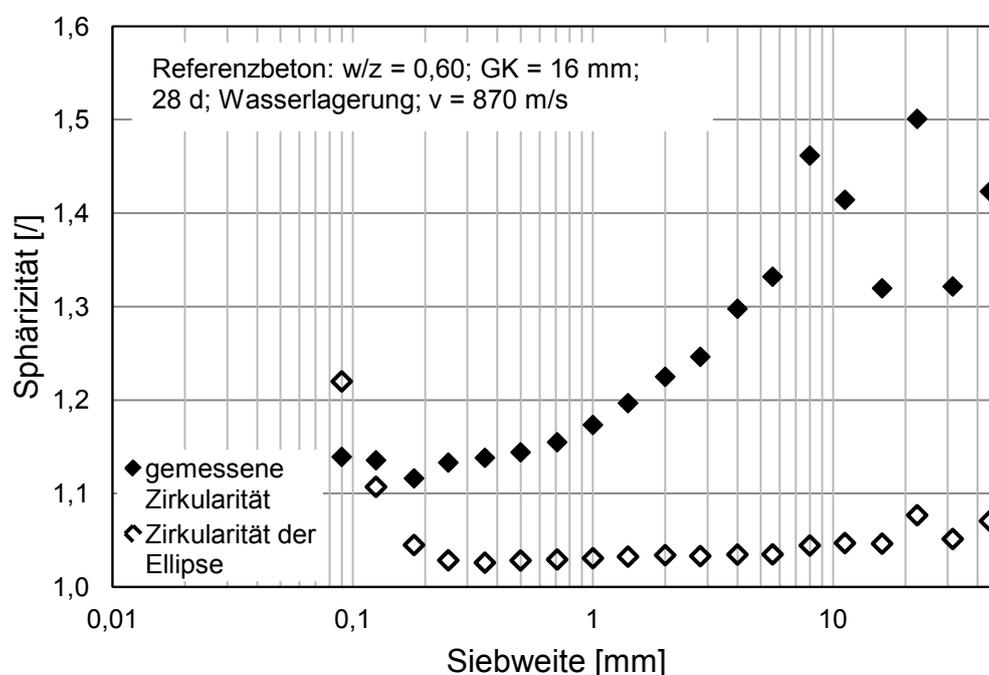


Abbildung 4.4.2: Sphärizitäten $1/\psi_c$ und $1/\psi_{Eli}$ des Referenzbetons in Abhängigkeit von der Siebweite

Während die gemessene Sphärizität mit zunehmender Siebweite ansteigt, wurden die größten Werte der Sphärizität der Ellipse bei den kleinsten Klassen bestimmt. Aus beiden Sphärizitäten wird ein Ellipsenformfaktor für jede Klasse bestimmt, mit dem die Abweichung des Partikels von einem Ellipsoiden berücksichtigt wird, vgl. Abschnitt 3. Der kleinste Ellipsenformfaktor wurde für die kleinste Klasse zu 0,93 bestimmt; hier ist $1/\psi_{Eli}$ größer als $1/\psi_c$. Der größte Ellipsenformfaktor wurde für die Klasse 5,6 / 8 mm mit 1,40 ermittelt.

Mit der Annahme eines Ellipsoids als einfachen Modellkörper der Partikel wurde für jede Klasse die dritte Halbachse im Raum mit den entsprechenden Werten des Frettdurchmessers und der senkrecht dazu stehenden Länge nach Gleichung 3.4 bestimmt. Des Weiteren wurde das Volumen jeder Klasse benötigt. Die Volumenverteilung ist im Anhang „erweiterte Untersuchungen“ dargestellt, in dem ein Vergleich der CPA-Ergebnisse mit denen einer herkömmlichen Siebanalyse stattfindet.

Aus den bekannten Werten der Ellipsenformfaktoren und der Halbachsen der Ellipsoiden wurde die Oberfläche der Partikel jeder Klasse nach Gleichung 3.5 bestimmt. Die Summe der Oberflächen aller Klassen ergab die Gesamtoberfläche der Partikel. Sie lag im Mittel des Referenzbetons bei $A_{CPA} = 4696 \text{ cm}^2$ ($V = 0,081$). Abbildung 4.4.3 zeigt die minimale, mittlere und maximale Zusammensetzung der Gesamtoberfläche aus den Oberflächen der einzelnen Klassen jeweils als Summenlinie.

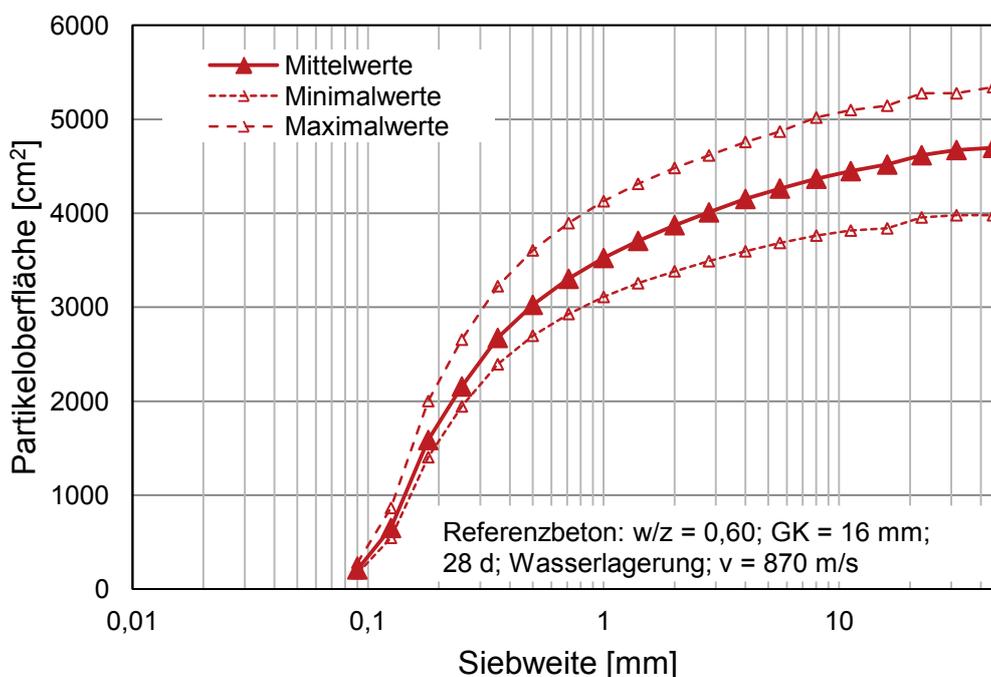


Abbildung 4.4.3: Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Siebweite

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Vermessung der Ausbruchkrater erfolgte mit dem Laserscanner. Dabei wurde eine mittlere Oberfläche des Ausbruchkraters der Vorderseite von $A_{VS,3D} = 66,7 \text{ cm}^2$ ($V = 0,139$) festgestellt. Die mittlere Oberfläche des rückseitigen Ausbruchkraters wurde zu $A_{RS,3D} = 146,5 \text{ cm}^2$ ($V = 0,275$) ermittelt.

Des Weiteren wurden bis zu sechs Bruchstücke größer 25 mm entdeckt, deren Oberfläche mit dem Scannerverfahren bestimmt wurde. Die Masse der Bruchstücke, die mit diesem Verfahren vermessen wurden, beträgt $m_{SV} = 70,6 \text{ g}$ ($V = 0,88$). Die Oberfläche wurde im Mittel zu $A_{SV} = 139,7 \text{ cm}^2$ ($V = 0,822$) berechnet.

Gesamtbruchfläche

Die Gesamtbruchfläche berechnet sich aus der Summe der Oberflächen der Makro-Meso-Ebene und der Meso-Mikro-Ebene abzüglich der Originalfläche im Bereich der Ausbruchkrater (siehe Abschnitt 3.4.4.3). Die Originalfläche wurde mit dem fotografischen Verfahren ermittelt; an der Vorderseite zu $A_{VS,ori} = 60,2 \text{ cm}^2$ ($V = 0,135$) und an der Rückseite zu $A_{RS,ori} = 134,0 \text{ cm}^2$ ($V = 0,302$). Damit ergibt sich die Gesamtbruchfläche zu $A_{GB} = 4855 \text{ cm}^2$ ($V = 0,086$). Der Anteil der Meso-Mikro-Ebene an dieser Gesamtbruchfläche ist erheblich; Abbildung 4.4.4 zeigt dazu die Aufteilung der einzelnen Oberflächen an der Gesamtsumme.

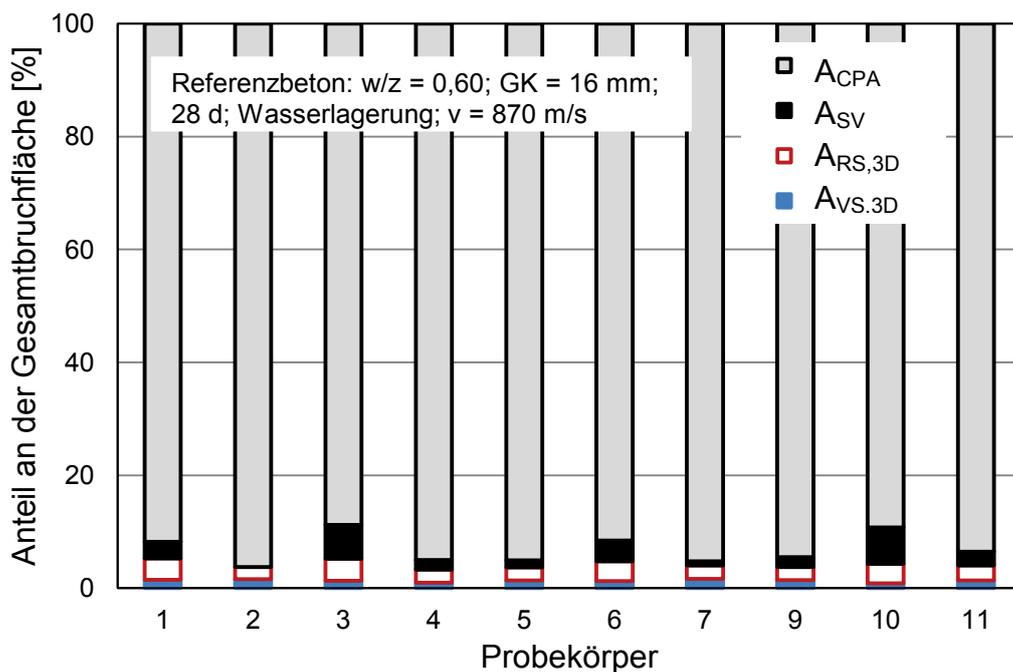


Abbildung 4.4.4: Anteil der einzelnen Oberflächen an der Gesamtbruchfläche

Energiebetrachtung

Die Geschwindigkeit des Projektils vor dem Auftreffen auf den Probekörper beträgt $v_z = 876 \text{ m/s}$ ($V = 0,005$). Nach der Perforation konnte mit Hilfe des doppelt-belichteten Fotos eine mittlere Geschwindigkeit von $v_{aus} = 665 \text{ m/s}$ ($V = 0,05$) bestimmt wer-

den. Bei einer Projektilmasse von 9,5 g ergibt sich damit eine Energiedifferenz der kinetischen Energie vor und nach der Perforation von $\Delta E = 1538 \text{ J}$ ($V = 0,135$).

4.4.2.3 Diskussion

Der Einfluss der Partikelmessung auf die Bestimmung der Gesamtbruchfläche ist wie erwartet sehr groß. Daran zeigt sich die Bedeutung der Berücksichtigung der Partikel in einem Schadenskriterium. Bezogen auf ein festes Volumen (hier: das Volumen der Ausbruchkrater) besitzen kleinere Fragmente zwangsläufig eine größere Oberfläche. In dieser Arbeit kam eine relativ neue Messmethode (CPA) zum Einsatz. Daher wurden weitere Untersuchungen zur Messmethode durchgeführt, deren Ergebnisse im Anhang „erweiterte Untersuchungen“ einzeln gezeigt werden. Diese Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst und gedeutet werden:

- Die CPA Ergebnisse können als reproduzierbar gelten.
- Vergleichbare Siebanalysen zeigen erwartbare, leicht unterschiedliche Ergebnisse vor allem im gröberen Siebbereich. Nach Haver&Boker [60] entstehen diese Unterschiede dadurch, dass Siebe quadratische Öffnungen besitzen. Dadurch können plattige Partikel diagonal und längliche Partikel aufrecht durch die Sieböffnung fallen. Es wird folglich kein Größenparameter direkt an dem jeweiligen Partikel gemessen. Dagegen erfolgt bei der CPA eine direkte Messung und anschließende Einteilung in eine Größenklasse. Werden beide Verfahren miteinander verglichen, muss berücksichtigt werden, dass die Einteilung der Partikel in Größenklassen auf unterschiedlichen Definitionen der Größe basiert. Da in dieser Arbeit versucht wird, der realen Oberfläche möglichst nah zu kommen, ist die CPA durch die direkte Vermessung der Partikel geeigneter.
- Die Abhängigkeit der Größe der Oberfläche wird vor allem vom zugrunde liegendem Partikelmodell bestimmt. Ein Vergleich zwischen einem Kugelmodell, einem Quadermodell und dem angewandten Ellipsoidmodell führt zu Oberflächen zwischen 4696 cm^2 und 7324 cm^2 . Während das Kugelmodell auf Grund der unrealistisch großen Volumina verworfen werden kann, wurde das Quadermodell nach einer rein visuellen Betrachtung der Partikel ausgeschlossen. Da die gesamte Anzahl der Partikel auf Grund ihrer Größe nicht betrachtet werden kann, stützt sich diese Schlussfolgerung nur auf die Beobachtung einer geringen Partikelanzahl. Die Mikroskopaufnahmen unterschiedlich großer

Partikel ähnelten eher Ellipsoiden als Quadern. Die Beurteilung der Einflüsse auf den Beschusswiderstand und damit auch auf die Bruchfläche wird unter der Annahme eines Ellipsoidmodells geführt; damit wäre eine Abweichung der Partikelform von einem idealen Ellipsoiden als systematischer Fehler einzustufen, so dass ein relativer Vergleich der Einflüsse trotz allem geführt werden kann.

- Ein Vergleich der dreidimensional aufgenommenen Krateroberflächen mit zu Kegeln idealisierten Krateroberflächen zeigt an der Vorderseite der Probekörper nur geringe Unterschiede (ca. 4 % Abweichung); auf der Rückseite ist die Oberfläche aus der dreidimensionalen Aufnahme ca. 11 % größer. Da der Anteil der Krateroberflächen an der Gesamtbruchfläche als gering einzustufen ist (ca. 4,5 %), aber der Arbeitsaufwand durch das Scannen hoch ist, kann durch diese einfache Idealisierung eine gute Annäherung an die tatsächliche Oberfläche mit sehr geringem Aufwand erfolgen.

Ein weiterer diskussionsbedürftiger Punkt, der sich aus den Ergebnissen des Referenzbetons ergibt, betrifft den Abfall der Partikelanzahl im Feinstbereich der Sieblinie (siehe Abbildung 4.4.1). Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten könnte in einer unzureichend genauen Messung der CPA im Feinstbereich liegen. Dieser für das Messgerät nur schwer zu erfassende Bereich wird vom Hersteller aber erst ab der Klasse < 0,063 mm angegeben. In diesem Bereich kommt es zu einer Konglomeratbildung der Partikel. Eine weitere mögliche Erklärung liegt im Massenverlust. Dieser beträgt ca. 0,24 % der ursprünglichen Masse. Es ist wahrscheinlich, dass eher feinste als gröbere Partikel verloren gehen. Eine Möglichkeit diesen systematischen Fehler (siehe weitere Testreihen) zu berücksichtigen, liegt darin, die Partikelanzahl im Feinstbereich aus den gröberen Werten zu interpolieren. Die Geradengleichung, die sich aus den Werten von 0,125 mm bis 45 mm ergibt, lautet:

$$\text{Partikelanzahl} = 13743 \cdot \text{Siebweite}^{-2,517} \quad \text{Gl. 4.3}$$

Die korrigierten Ergebnisse aus Gleichung 4.3 zeigt Abbildung 4.4.5. Die Bruchfläche würde sich in Folge dessen um ca. 36 % vergrößern. Da die Ursache aber nicht endgültig geklärt werden kann und eine untere Grenze der Partikelfinheit nicht angegeben werden kann, wird im Folgenden auf diesen Schritt verzichtet und der Fehler akzeptiert.

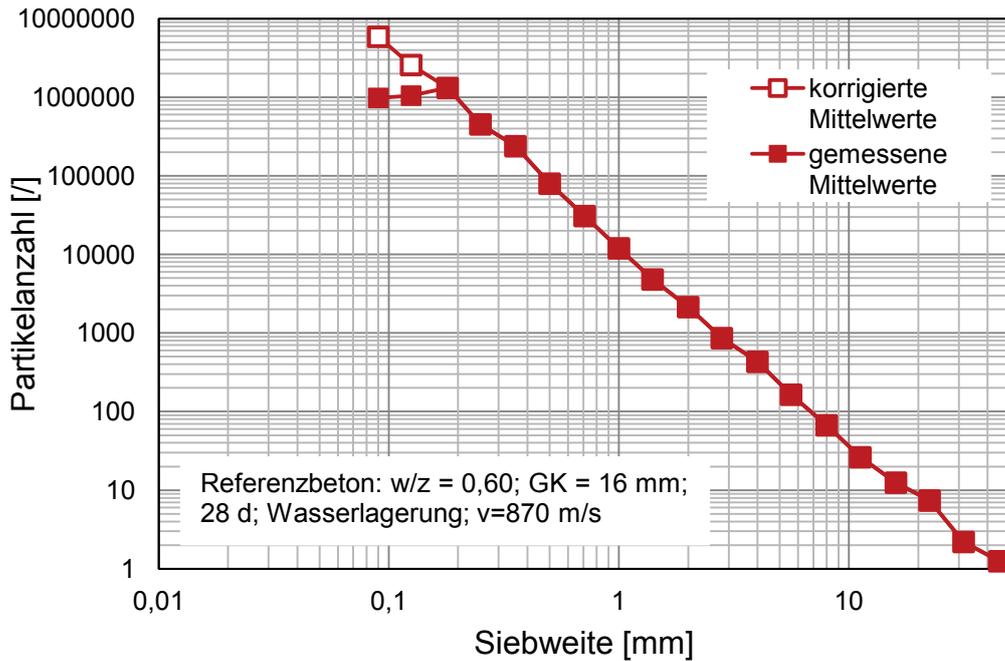


Abbildung 4.4.5: Korrektur der Partikelanzahl infolge Interpolation

Die Sphärizität der Partikel sinkt mit abnehmender Größe; gleichzeitig steigt das Verhältnis von Länge zu Feretdurchmesser. Die Form der Partikel ist folglich im unteren Siebbereich runder und gleichzeitig länglich. Diese Partikelbeschreibung kann mit der Definition der Sphärizität und mit Hilfe von Abbildung 4.4.6 erklärt werden:

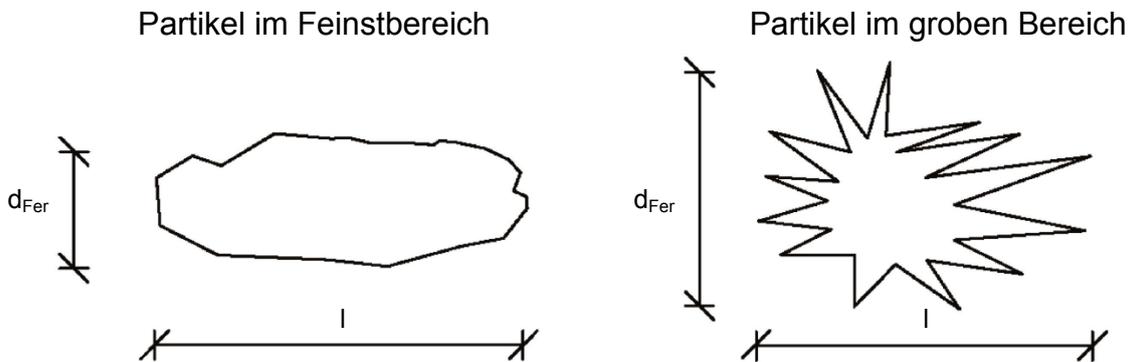


Abbildung 4.4.6: Partikelform in unterschiedlichen Siebgrößen (Abbildung zur Verdeutlichung übertrieben)

Die Sphärizität stellt den Quotienten aus gemessenem Umfang zu Umfang des flächengleichen Kreises dar. Ein größerer Umfang bei gleichbleibender Fläche tritt bei kantigen Partikeln auf. Kleinere Partikel könnten in Folge von Kollisionen bei der Bewegung der Partikel und damit einhergehendem Abrieb der Kanten (Transport, Sammeln der Partikel, Vibrationsrinne) runder werden als größere.

4.4.3 Einfluss des Betonalters

4.4.3.1 Einführung

Wie erwähnt steigt mit zunehmendem Alter die Festigkeit des Betons durch Nachhärtung an und die Verformbarkeit geht zurück, wodurch sich der Beton spröder verhält. In den bruchmechanischen Untersuchungen zeigt sich, dass sich die Bruchenergie dadurch nur geringfügig ändert. Bisherige Untersuchungen zum Beschusswiderstand in Folge der Alterung ergaben keine größeren Änderungen, wenn der Erhärtungsvorgang des Beton zum Großteil abgeschlossen ist (vgl. Abschnitt 2.2.3.6).

Bei der Untersuchung des Betonalters löste die Kamera beim Probekörper 3.2.a-9 nicht rechtzeitig aus, so dass zur weiteren Betrachtung nur zehn Probekörper herangezogen werden können. Des Weiteren wurden die Probekörper 3.2.a-4 und 3.2.a-9 in mehrere große Bruchstücke zerlegt. Hier wurde das fotografische Verfahren angewandt. Alle Einzelwerte finden sich im Anhang „Alter“.

4.4.3.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Meso-Mikro-Ebene

Die untersuchte Masse der Probekörper im Alter von 91 d beträgt im Mittel $m_{CPA,91d} = 295,3 \text{ g}$ ($V = 0,107$) und liegt damit ca. 18 % über der untersuchten Masse des Referenzbetons. Im Gegensatz zur Massenzunahme sinkt die Anzahl der Partikel auf ca. 81 % der Partikelanzahl des Referenzbetons und beträgt 3,400 Millionen Partikel ($V = 0,207$).

Die Aufteilung der Partikelanzahl nach Größe und Alter ist Abbildung 4.4.7 zu entnehmen. Absteigend bis zur Klasse 0,125 / 0,18 mm sind in allen Klassen im höheren Probenalter mehr Partikel vorhanden. Erst ab der Klasse 0,125 / 0,18 mm ist eine Änderung bemerkbar; gleichzeitig stellt diese Klasse jeweils den Maximalwert von Partikeln in einer Klasse dar. Im Feinstbereich konnten deutlich weniger Partikel im höheren Alter festgestellt werden, so dass die Gesamtpartikelanzahl geringer ausfällt.

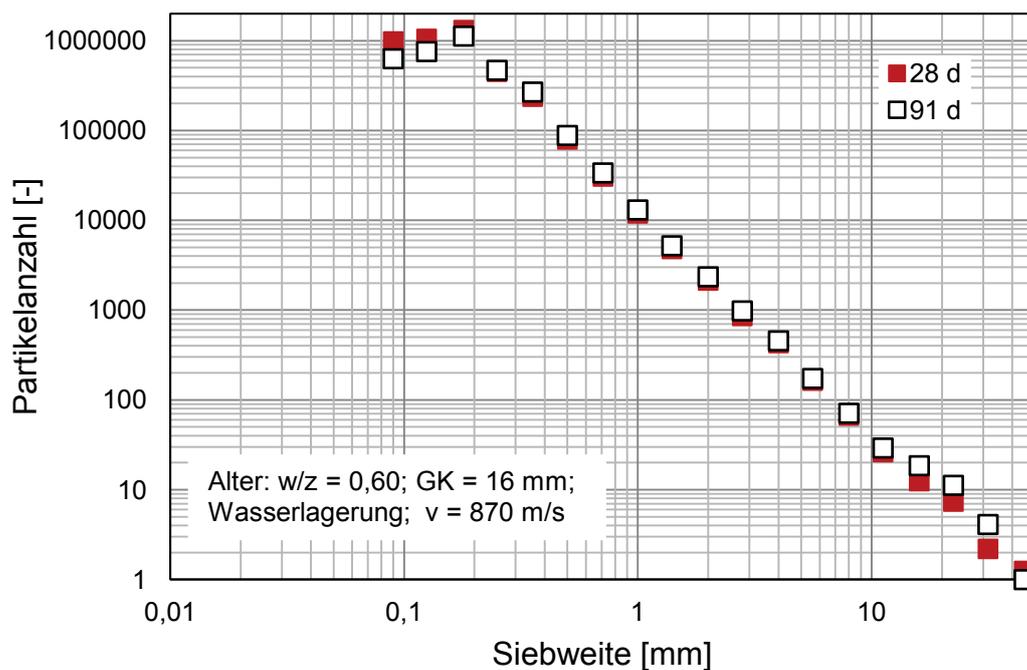


Abbildung 4.4.7: Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichem Alter der Probekörper

Die Werte der Sphärizität unterscheiden sich bezüglich des Alters im feinen Siebbereich wenig; im gröberen Siebbereich können teilweise Unterschiede festgestellt werden. Der größte Unterschied zwischen den beiden Altersstufen findet sich in der Klasse 11,2 / 16 mm; hier beträgt der Wert der Sphärizität im Alter von 28 d 1,32 und im Alter von 91 d 1,45. Da die Sphärizität der Ellipsen unterschiedlichen Alters in dieser Klasse gleich ist, vergrößert sich der Ellipsenformfaktor um 14 %.

Die relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit vom Alter ist in Abbildung 4.4.8 dargestellt. Die Partikel der jüngeren Probekörper sind feiner verteilt, erst im groben Siebbereich ab etwa 16 mm Siebweite gleichen sich die relativen Werte der Partikeloberfläche an. In diesem Bereich wurden deutlich mehr Partikel registriert. Die Oberfläche der Partikel im Alter von 91 d wurde zu $A_{CPA,91d} = 4708 \text{ cm}^2$ ($V = 0,101$) bestimmt und ist damit trotz unterschiedlicher Verteilung nahezu genauso groß wie die Oberfläche des Referenzbetons ($A_{CPA} = 4696 \text{ cm}^2$).

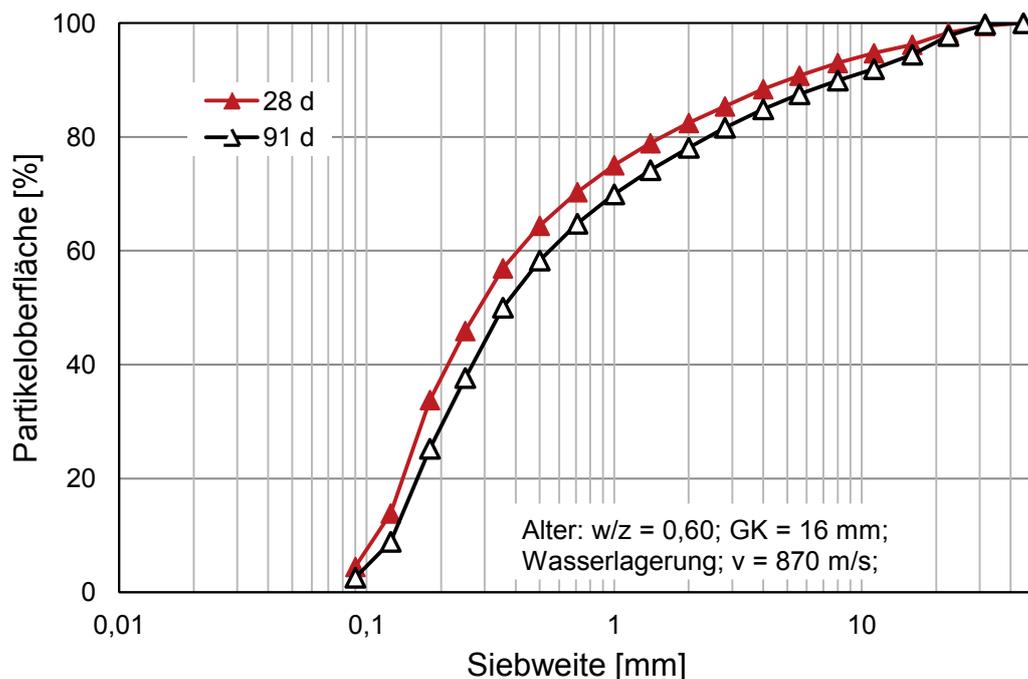


Abbildung 4.4.8: Relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichem Alter der Probekörper

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Ergebnisse der Oberflächen der Makro-Meso-Ebene sind in Tabelle 4.4.2 zusammengefasst. Die mittlere Gesamtbruchfläche aller Probekörper beträgt im Alter von 91 d $A_{GB,91d} = 4983 \text{ cm}^2$ ($V = 0,101$). Diese Bruchfläche entspricht 102,6 % der Referenzbruchfläche ($A_{GB} = 4855 \text{ cm}^2$).

Tabelle 4.4.2: Übersicht der verschiedenen Oberflächen der Makro-Meso-Ebene (in Klammern: Variationskoeffizient)

	$A_{VS,3D} [\text{cm}^2]$	$A_{RS,3D} [\text{cm}^2]$	$A_{SV} [\text{cm}^2]$	$A_{VS,Ori} [\text{cm}^2]$	$A_{RS,Ori} [\text{cm}^2]$
28 d (3.1.a)	66,7 (0,139)	146,5 (0,275)	139,7 (0,822)	60,2 (0,135)	134,0 (0,302)
91 d (3.2.a)	91,2 (0,216)	150,1 (0,140)	205,5 (0,531)	80,7 (0,254)	131,1 (0,158)

Probekörper 3.2.a-4 wurde durch das Projektil in 4 Bruchstücke zerlegt, die eine Masse zwischen 1737 g und 3251 g aufweisen. Die Gesamtmasse dieser Bruchstücke beträgt 10865 g. Die Bruchstücke des Probekörpers 3.2.a-4 haben in Summe eine Oberfläche von 2877 cm^2 , von der eine Originalfläche von 2436 cm^2 abgezogen werden muss.

Energiebetrachtung

Die mittlere Prüfgeschwindigkeit beträgt bei der Testreihe 3.2.a 871 m/s ($V = 0,005$); dies entspricht 99,4 % der Prüfgeschwindigkeit des Referenzbetons. Die Geschwindigkeiten der Projektile nach der Perforation der Probekörper betragen im Mittel $v_{\text{aus},91\text{d}} = 648$ m/s ($V = 0,050$) und liegt damit bei ca. 97,4 % der Austrittsgeschwindigkeit des Referenzbetons. Die daraus bestimmbare Energiedifferenz beträgt bei einer Projektilmasse von 9,5 g $\Delta E_{91\text{d}} = 1599$ J ($V = 0,128$). Die Energiedifferenz ist damit rund 4 % größer als die des Referenzbetons ($\Delta E = 1538$ J).

4.4.3.3 Diskussion

Erwartungsgemäß steigen die Festigkeitskennwerte (Druck, Biegezug und Spaltzug) und der E-Modul mit zunehmendem Alter in ähnlicher Weise wie in den bruchmechanischen Untersuchungen an. Die Gesamtbruchfläche A_{GB} und die Energiedifferenz ΔE steigen nur geringfügig mit zunehmendem Alter an und können auf Grund der Streuung der Testreihen grundsätzlich als unabhängig vom Alter gelten (siehe Abbildung 4.4.9). Ähnlich geringe Unterschiede der Schädigung aus Beschussbelastungen an Probekörpern aus Beton verschiedener Altersstufen (> 28 d) können in Kustermann et al. [76] gefunden werden.

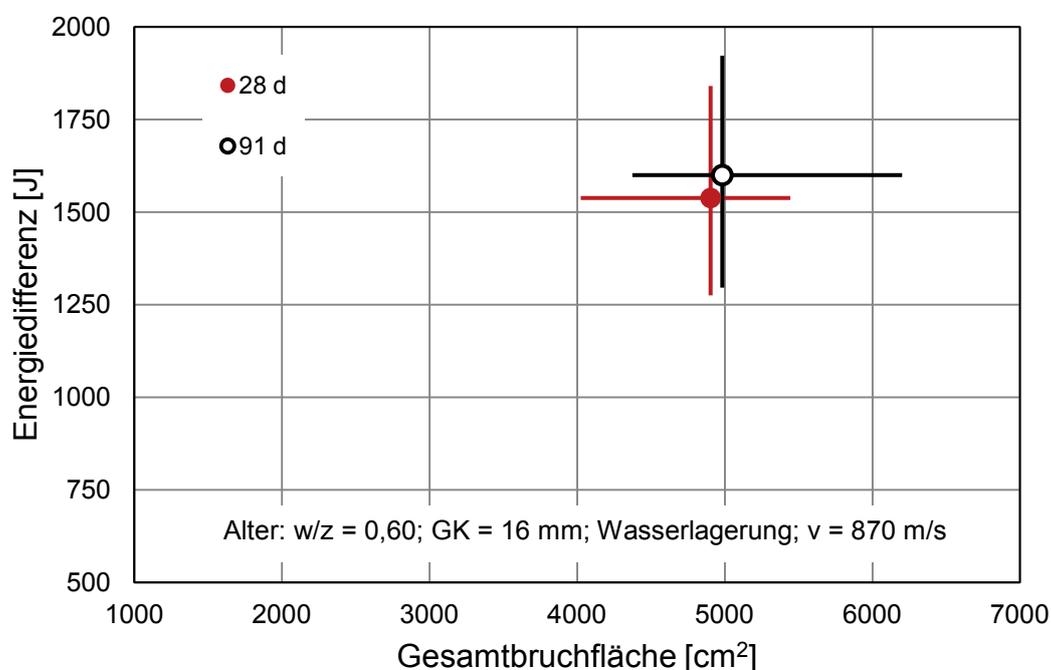


Abbildung 4.4.9: Energiedifferenz über die Gesamtbruchfläche bei unterschiedlichem Alter der Probekörper mit Angabe der Minimal- und Maximalspanne

Eine detailliertere Betrachtung der nahezu gleich großen Gesamtbruchflächen beider Altersstufen zeigt, dass im Alter von 91 d an der Vorderseite der Probekörper im Mittel ein größerer Ausbruchkrater gemessen wurde. Die Masse der Fragmente m_{Fr} ist folglich größer als bei jüngeren Probekörpern und der Wirkungsbereich der Druckwelle steigt an (Wirkungsbereich der Druckwelle = geschädigter Bereich des Probekörpers). Der größere Wirkungsbereich ist auf die Nacherhärtung der älteren Probekörper zurückzuführen. Mit der Nacherhärtung steigt nicht nur die Druckfestigkeit und die Steifigkeit der wassergelagerten Probekörper an, sondern sie werden auch dichter. Beim Auslösen der Druckwelle kann Energie durch die dichtere Zementsteinmatrix weiter weg vom Einschlagort transportiert werden; in einer weniger dichten Zementsteinmatrix wird die Druckwelle häufiger an Fehlstellen (z. B.: Poren, Mikrorisse usw.) reflektiert, so dass ihr Wirkungsbereich kleiner ist.

4.4.4 Einfluss der Lagerung

4.4.4.1 Einführung

Die geänderte Lagerung der Probekörper von Wasserlagerung zu Trockenlagerung führt zu einer größeren spezifischen Bruchenergie. Dieser Anstieg kann mit den stärkeren van-der-Waals Bindungen zwischen den aneinander haftenden Oberflächen und der damit verbundenen höheren Festigkeit erklärt werden (vgl. Abschnitt 4.3.3). Die geringere dreidimensionale Bruchfläche ist eine Folge der erhöhten Anzahl gebrochener Gesteinskörner. Ballistische Untersuchungen der Auswirkung eines Lagerungswechsels sind nicht bekannt.

Der Probekörper 3.3.a-8 wird auf Grund einer fehlenden Auslösung der Kamera nicht in der Mittelwertbetrachtung berücksichtigt. Die Einzelwerte, die als Grundlage der dargestellten Mittelwerte und Variationskoeffizienten dienen, sind im Anhang „Lagerung“ aufgeführt.

4.4.4.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Meso-Mikro-Ebene

In Folge der Trockenlagerung steigt die Prüfmasse der Meso-Mikro-Ebene nur geringfügig um ca. 4,7 % und beträgt $m_{CPA,TL} = 261,7 \text{ g}$ ($V = 0,116$). Diese Masse besteht aus 3,534 Millionen Partikeln ($V = 0,116$) und entspricht damit rund 85 % der

Partikelanzahl des Referenzbetons. Die Aufteilung der Partikelanzahl nach Größe und Lagerung ist Abbildung 4.4.10 zu entnehmen.

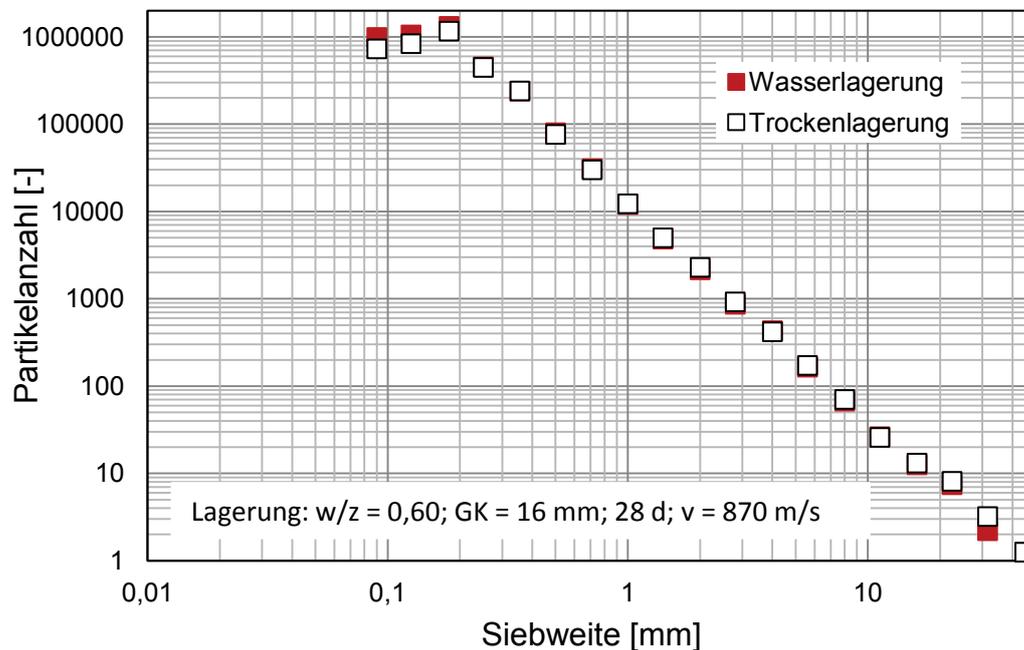


Abbildung 4.4.10: Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlicher Lagerung der Probekörper

Deutlich zu erkennen ist, dass die Anzahl der Partikel in den meisten Klassen bei beiden Lagerungsarten nahezu gleich ist. Am unteren und oberen Ende des Betrachtungsraums sind Unterschiede zu erkennen; in den kleineren Klassen liegen mehr Partikel bei Wasserlagerung als bei Trockenlagerung vor, in den größeren Klassen verhält es sich umgekehrt.

Die Werte der Sphärizität unterscheiden sich bezüglich der Lagerungsart nur geringfügig. Die relative Oberflächenverteilung der Partikel in Abhängigkeit von der Lagerung ist in Abbildung 4.4.11 dargestellt. Der Verlauf beider Kurven ist sehr ähnlich; da im feinsten Siebbereich mehr Partikel bei Wasserlagerung entstanden sind, ist hier die relative Oberfläche größer. Die absolute Oberfläche der trockengelagerten Probekörper wurde zu $A_{CPA,TL} = 4375,8 \text{ cm}^2$ ($V = 0,109$) bestimmt. Damit ist diese Oberfläche ca. 6,8 % kleiner als die Oberfläche des Referenzbetons ($A_{CPA} = 4696 \text{ cm}^2$).

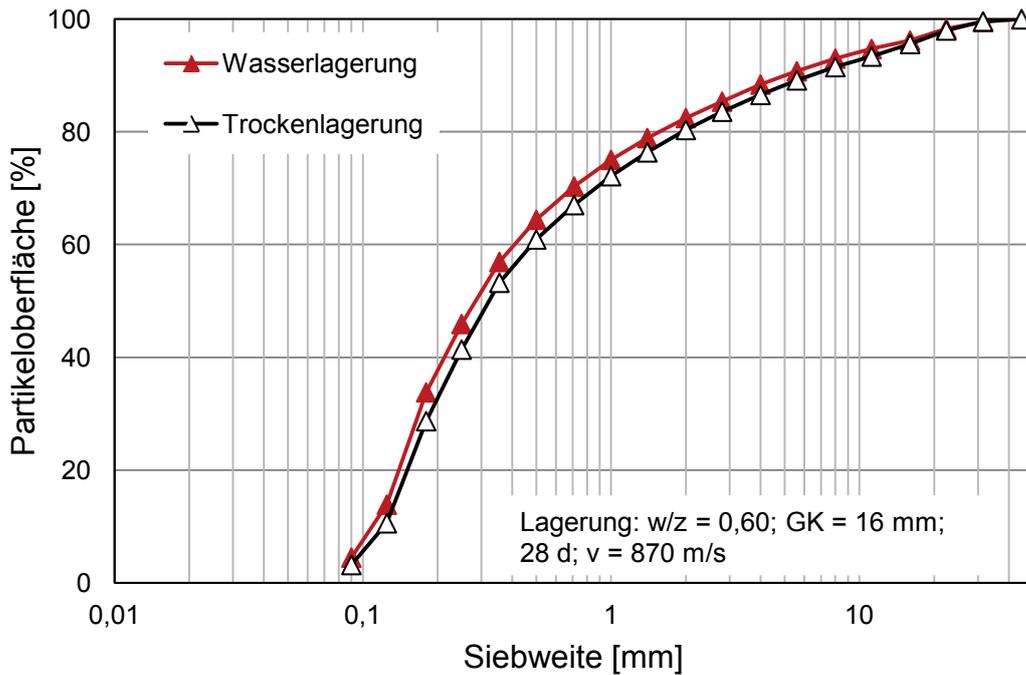


Abbildung 4.4.11: Relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlicher Lagerung der Probekörper

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die mittlere Masse der Bruchstücke, die mit dem Scannerverfahren untersucht wurden, beträgt $m_{SV} = 38,6 \text{ g}$ ($V = 1,379$). Es wurden bis zu zehn Bruchstücke je Platte mit diesem Verfahren vermessen. Ihre mittlere Oberfläche ist zusammen mit den anderen betrachteten Oberflächen in Tabelle 4.4.3 wiedergegeben.

Tabelle 4.4.3: Übersicht der verschiedenen Oberflächen der Makro-Meso-Ebene (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]
Wasserlagerung (3.1.a)	66,7 (0,139)	146,5 (0,275)	139,7 (0,822)	60,2 (0,135)	134,0 (0,302)
Trockenlagerung (3.3.a)	81,8 (0,222)	113,9 (0,188)	97,4 (1,185)	75,4 (0,251)	100,5 (0,246)

Die mittlere Gesamtbruchfläche aller Probekörper beträgt bei Trockenlagerung $A_{GB,TL} = 4493 \text{ cm}^2$ ($V = 0,123$). Diese Bruchfläche entspricht 92,5 % der Referenzbetonbruchfläche ($A_{GB} = 4855 \text{ cm}^2$).

Energiebetrachtung

Die mittlere Prüfgeschwindigkeit beträgt bei den Versuchen mit trockengelagerten Probekörpern 869 m/s ($V = 0,004$) und liegt damit bei 99,1 % der Prüfgeschwindigkeit

keit des Referenzbetons. Nach der Perforation der Probekörper wurde eine mittlere Geschwindigkeiten der Projektile von $v_{\text{aus,TL}} = 683 \text{ m/s}$ ($V = 0,043$) gemessen. Diese Geschwindigkeit entspricht ca. 102,7 % der Austrittsgeschwindigkeit des Referenzbetons. Die daraus bestimmbare Energiedifferenz beträgt $\Delta E_{\text{TL}} = 1365 \text{ J}$ ($V = 0,135$) und ist damit kleiner als die des Referenzbetons ($\Delta E = 1538 \text{ J}$).

4.4.4.3 Diskussion

Die Festbetonkennwerte der Begleitkörper zu den ballistischen Untersuchungen gleichen denen der bruchmechanischen Untersuchung. Die Druckfestigkeit der trockengelagerten Proben ist ca. 15 % größer als die Druckfestigkeit der wassergelagerten Proben. Aus der bruchmechanischen Untersuchung ergibt sich durch die Trockenlagerung der Probekörper eine größere spezifische Bruchenergie.

Die trockengelagerten Probekörper werden in einem kleineren Wirkungsbereich geschädigt. In Folge dessen entstehen weniger Fragmente und eine kleinere Gesamtbruchfläche A_{GB} . Gleichzeitig wird festgestellt, dass weniger Energie vom Probekörper absorbiert wurde; die Energiedifferenz ΔE nimmt ab (siehe Abbildung 4.4.12). Diese Abnahme kann wie folgt erklärt werden:

Ein maßgeblicher Unterschied zwischen den trocken- und den wassergelagerten Probekörpern liegt im unterschiedlich gefüllten Kapillarporenraum. Die durch das Projektil in den Probekörper eingebrachte Druckwelle wird durch luftgefüllten Kapillarporen teilweise reflektiert; dieser Vorgang ist vergleichbar mit der Reflexion der Druckwelle als Zugwelle an den freien Enden des Probekörpers, vgl. Abschnitt 2.2. Weiterhin entstehen durch den luftgefüllten Porenraum Expansionsräume, die dazu führen, dass das Material dem Projektil ausweichen kann. Hingegen leiten wassergefüllte Poren die Energie der Druckwelle weiter, so dass sich hier größere Wirkungsbereiche bilden.

Die kleinere Gesamtbruchfläche der trockenen Probekörper entsteht auch dadurch, dass mehr Energie aufgewendet werden muss, um die gleiche Fläche zu erzeugen, vgl. spezifische Bruchenergie (Abschnitt 4.3.3).

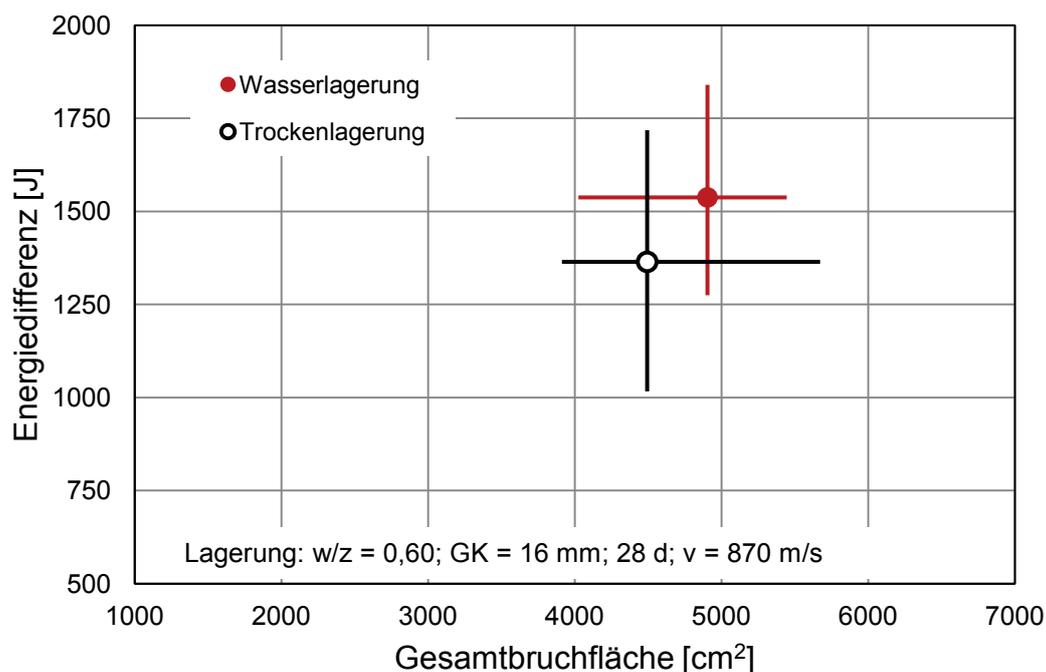


Abbildung 4.4.12: Energiedifferenz über die Gesamtbruchfläche bei unterschiedlich gelagerten Probekörpern mit Angabe der Minimal- und Maximalspanne

4.4.5 Einfluss der Prüfgeschwindigkeit

4.4.5.1 Einführung

Mit steigender Prüfgeschwindigkeit nimmt die Eindringtiefe des Projektils zu, vgl. Abschnitt 2.2.3. In dieser Arbeit wurden drei verschiedene Geschwindigkeiten untersucht (870 m/s, 710 m/s und 600 m/s). Für die Bruchfläche wird erwartet, dass sie mit abnehmender Geschwindigkeit kleiner wird.

In den Testreihen 3.1.a und 3.7.a wurden die Werte von zehn Probekörpern zur Bestimmung der Mittelwerte herangezogen (ohne 3.1.a-8 und 3.7.a-2). In der Testreihe 3.7.b konnten alle elf beschossenen Probekörper zur Mittelwertbildung genutzt werden. Hier traten keine Probleme bei der Bestimmung der Austrittsgeschwindigkeit des Projektils auf. Die im Folgenden präsentierten Mittelwerte und Variationskoeffizienten beruhen auf den Einzelwerten, die im Anhang „Prüfgeschwindigkeit“ zusammengestellt sind.

4.4.5.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Meso-Mikro-Ebene

Die Masse der Partikel zur Untersuchung in der Meso-Mikro-Ebene sinkt mit abnehmender Prüfgeschwindigkeit ab. Bei einer Geschwindigkeit von 600 m/s beträgt die

Partikelmasse $m_{CPA,600} = 174,6 \text{ g}$ ($V = 0,162$), bei einer Geschwindigkeit von 710 m/s wurde eine Partikelmasse von $m_{CPA,710} = 183,5 \text{ g}$ ($V = 0,124$) gemessen.

Die Partikelanzahl liegt bei der geringsten Geschwindigkeit bei 1,936 Millionen ($V = 0,098$) und entspricht damit ca. 46 % der Partikelanzahl des Referenzbetons. Bei einer Prüfgeschwindigkeit von 710 m/s sind 2,664 Millionen Partikel ($V = 0,153$) entstanden (64 % der Partikelanzahl des Referenzbetons). Die Aufteilung der Partikelanzahl nach Größe und Geschwindigkeit ist Abbildung 4.4.13 zu entnehmen. Im feinen Siebbereich wurden bei niedrigerer Prüfgeschwindigkeit deutlich weniger Partikel registriert. Bei allen drei getesteten Geschwindigkeiten ist bei der Klasse 0,125 / 0,18 mm eine Änderung im Kurvenverlauf zu sehen, siehe Abschnitt 4.4.2.

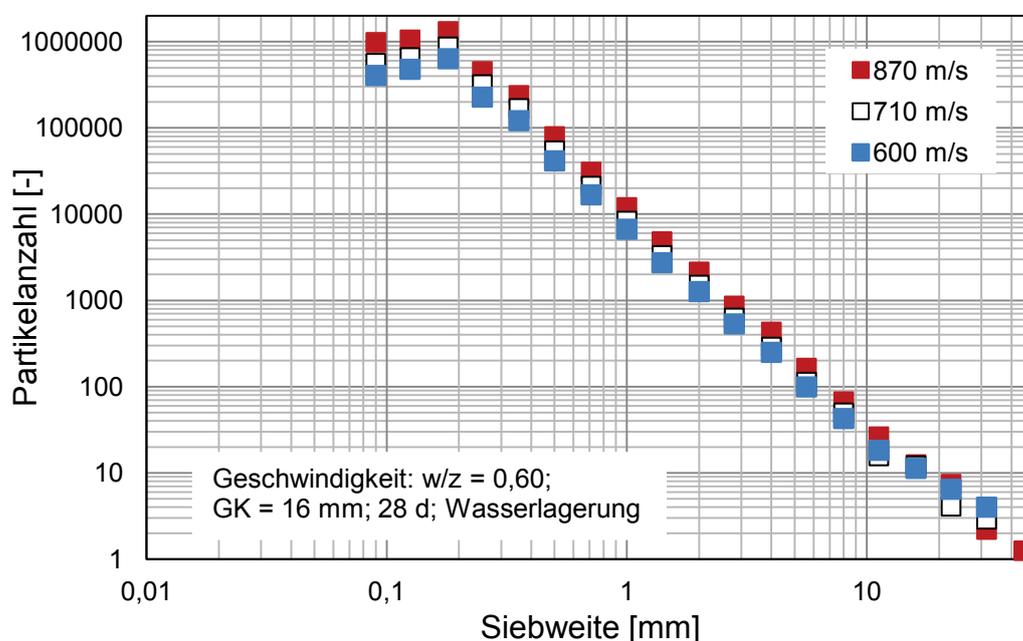


Abbildung 4.4.13: Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Die Werte der Sphärizität unterscheiden sich nur geringfügig. Die relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit ist in Abbildung 4.4.14 dargestellt. Während die Partikel in Folge der beiden höheren Geschwindigkeiten nahezu gleich verteilt sind, sind die Partikel der kleinsten Prüfgeschwindigkeit deutlich gröber verteilt. Mit steigender Geschwindigkeit nimmt in Folge der erhöhten Partikelanzahl die absolute Größe der Partikeloberfläche zu. Bei einer Geschwindigkeit von 600 m/s beträgt die Partikeloberfläche $A_{CPA,600} = 2556 \text{ cm}^2$ ($V = 0,101$); bei einer Prüfgeschwindigkeit von 710 m/s ist die Partikeloberfläche $A_{CPA,710} = 3090 \text{ cm}^2$ ($V = 0,099$)

groß. Die Oberfläche der Partikel des Referenzbetons ($A_{CPA} = 4696 \text{ cm}^2$) ist größer als die Oberflächen der Partikel der Testreihen mit geringeren Geschwindigkeiten.

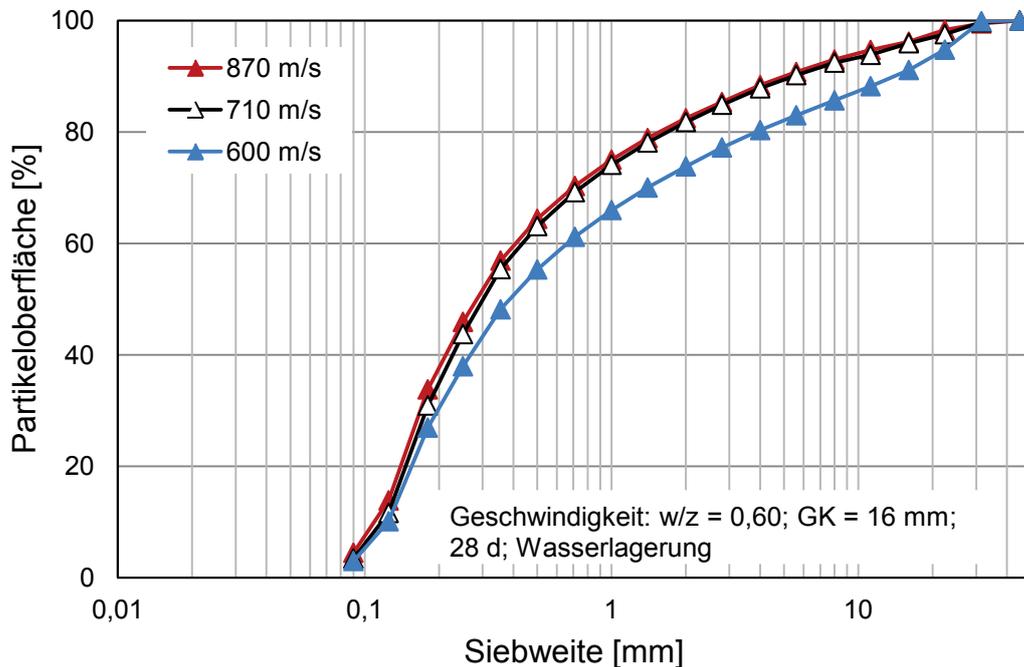


Abbildung 4.4.14: Relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Probekörper wurden in allen Versuchen als zusammenhängende Platten aus dem Kugelfang ausgebaut. Die mittleren Massen der Bruchstücke, die mit dem Scannerverfahren untersucht wurden, betragen $m_{SV,710} = 48,3 \text{ g}$ ($V = 0,917$) und $m_{SV,600} = 45,2 \text{ g}$ ($V = 0,938$). Die Ergebnisse der verschiedenen Oberflächen sind zusammenfassend in Tabelle 4.4.4 wiedergegeben.

Tabelle 4.4.4: Übersicht der verschiedenen Oberflächen der Makro-Meso-Ebene (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	$A_{VS,3D} [\text{cm}^2]$	$A_{RS,3D} [\text{cm}^2]$	$A_{SV} [\text{cm}^2]$	$A_{VS,Ori} [\text{cm}^2]$	$A_{RS,Ori} [\text{cm}^2]$
870 m/s (3.1.a)	66,7 (0,139)	146,5 (0,275)	139,7 (0,822)	60,2 (0,135)	134,0 (0,302)
710 m/s (3.7.a)	64,4 (0,218)	101,1 (0,285)	97,7 (0,801)	56,7 (0,247)	89,4 (0,294)
600 m/s (3.7.b)	55,6 (0,245)	107,8 (0,339)	100,1 (0,817)	51,4 (0,252)	97,9 (0,323)

Aus diesen Werten wurde die Gesamtbruchfläche ermittelt. Eine Prüfgeschwindigkeit von 710 m/s hat eine Gesamtbruchfläche in Höhe von $A_{GB,710} = 3206,8 \text{ cm}^2$

($V = 0,118$) zur Folge; bei 600 m/s ist sie $A_{GB,600} = 2673,7 \text{ cm}^2$ ($V = 0,110$) groß. Abbildung 4.4.15 zeigt die Gesamtbruchfläche in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit (Einzel- und Mittelwerte).

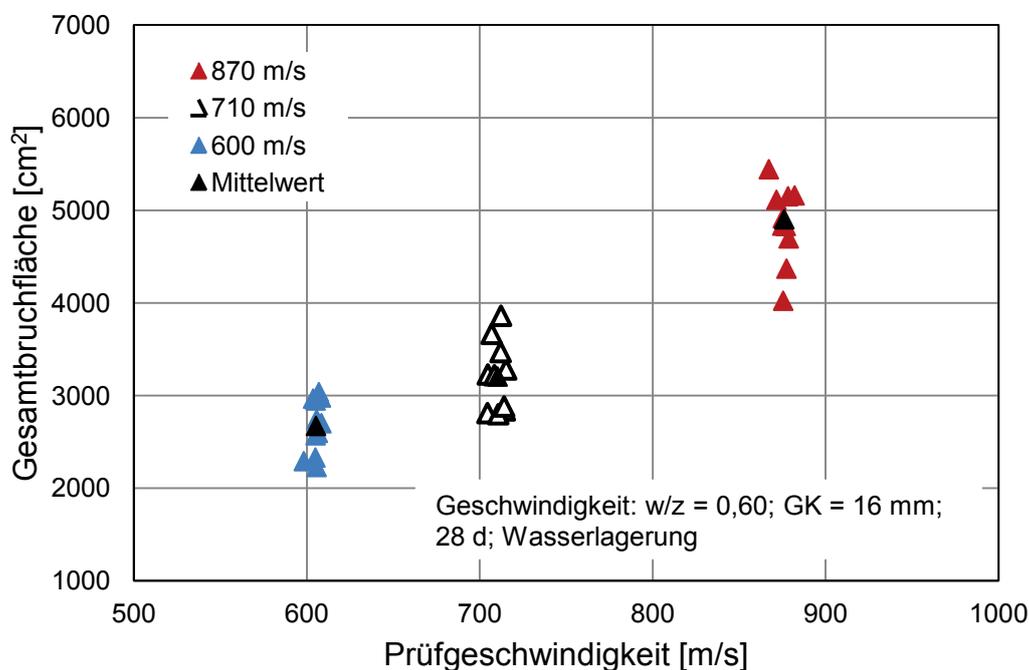


Abbildung 4.4.15: Gesamtbruchfläche in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit

Energiebetrachtung

Angestrebt waren die Prüfgeschwindigkeiten 870 m/s, 710 m/s und 600 m/s. Hierbei kam es versuchsbedingt jeweils zu leichten Abweichungen. Die mittleren Prüfgeschwindigkeiten der Testreihe 3.1.a sind 876 m/s ($V = 0,005$), der Testreihe 3.7.a 710 m/s ($V = 0,006$) und der Testreihe 3.7.b 605 m/s ($V = 0,005$).

Die mittleren Geschwindigkeiten der Projektile nach der Perforation der Probekörper sind $v_{aus} = 665 \text{ m/s}$ ($V = 0,053$), $v_{aus,710} = 485 \text{ m/s}$ ($V = 0,049$) und $v_{aus,600} = 349 \text{ m/s}$ ($V = 0,103$). Aus diesen Geschwindigkeiten wurde die Energiedifferenz bestimmt. Für den Referenzbeton beträgt $\Delta E = 1538 \text{ J}$, für die Prüfgeschwindigkeit 710 m/s ist $\Delta E_{710} = 1279 \text{ J}$ ($V = 0,087$) und für die geringste Geschwindigkeit ergibt sich $\Delta E_{600} = 1156 \text{ J}$ ($V = 0,098$). Abbildung 4.4.16 zeigt die Ergebnisse zur Energiemessung. Mit steigender Prüfgeschwindigkeit wird die Energiedifferenz größer.

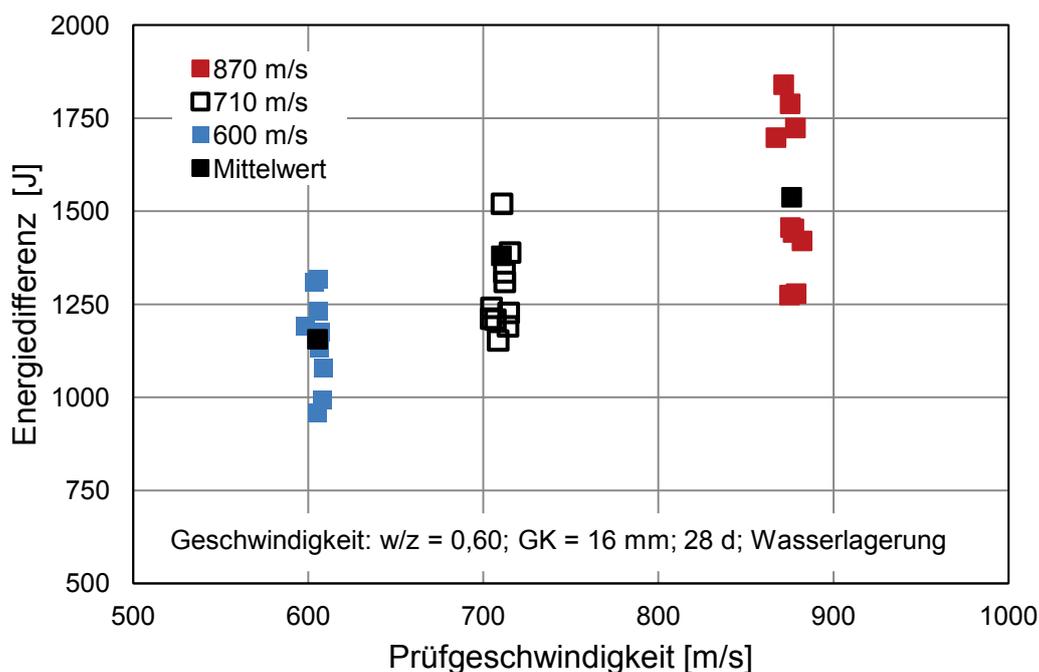


Abbildung 4.4.16: Energiedifferenz in Abhängigkeit von der Prüfgeschwindigkeit

4.4.5.3 Diskussion

Ein Vergleich der Festbetonkennwerte aus beiden Untersuchungsarten führt zu annähernd gleichen Ergebnissen (siehe Anhang „Frisch- und Festbetonkennwerte“). Somit können die bruchmechanischen Ergebnisse zur Interpretation der ballistischen Untersuchung herangezogen werden. Die bruchmechanischen Untersuchungen zeigen einen Anstieg der Bruchenergie mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit. Dieser Anstieg wurde mit einer Zunahme der Festigkeit und der Durchbiegung begründet (vgl. Abschnitt 4.3.4).

In den ballistischen Untersuchungen dieses Abschnitts konnte eine Zunahme der Energiedifferenz und der Gesamtbruchfläche mit steigender Prüfgeschwindigkeit festgestellt werden, siehe Abbildung 4.4.17. Die zunehmende Gesamtbruchfläche lässt sich durch die zunehmende Fragmentanzahl in nahezu jeder Größenklasse der Siebreihe R 20/3 erklären. Auffällig ist dabei, dass sich die Wirkungsbereiche bei 710 m/s und 600 m/s Prüfgeschwindigkeit nur minimal unterscheiden. Dass die Fragmentanzahl dennoch zunimmt, liegt an der feineren Verteilung der Fragmente bei einer Geschwindigkeit von 710 m/s. Zusammengefasst bedeutet das: Die Energie aus dem Projektil mit einer Prüfgeschwindigkeit von 600 m/s bringt einen Wirkungsbereich und eine grobe Verteilung der Fragmente hervor; wird die Energie gesteigert (710 m/s) ändert sich der Wirkungsbereich zunächst nicht, aber es entstehen mehr

Fragmente, die feiner verteilt sind. Eine weitere Energiesteigerung (870 m/s) ändert nahezu nichts an der Verteilung der Fragmente, sorgt aber für eine Vergrößerung des Wirkungsbereichs, die auch eine größere Anzahl an Fragmenten zur Folge hat.

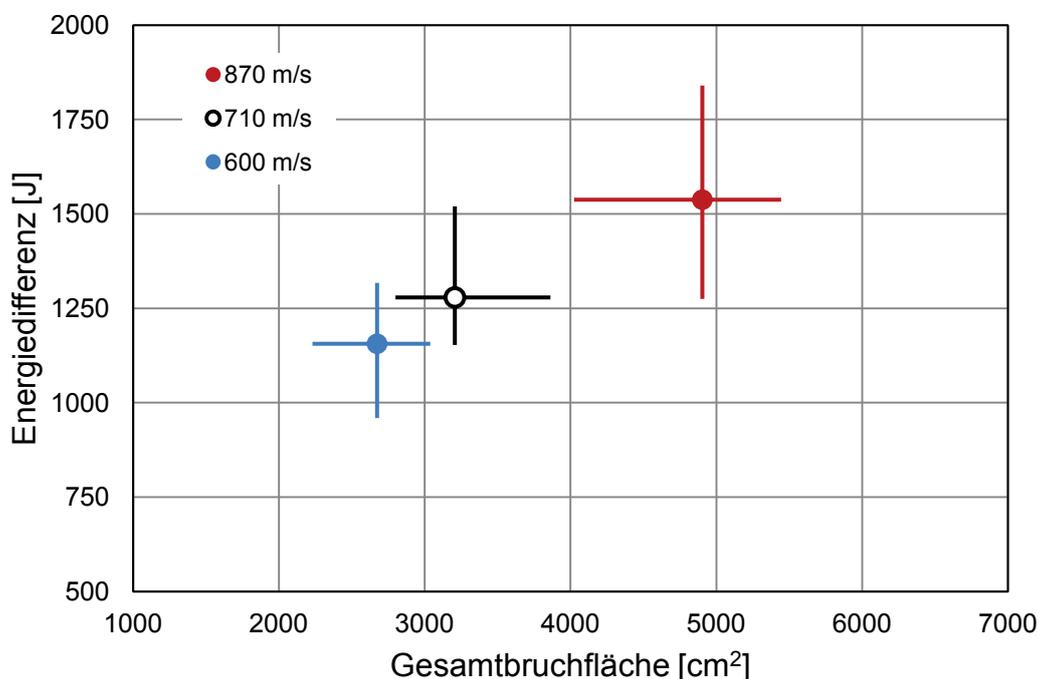


Abbildung 4.4.17: Energiedifferenz über die Gesamtbruchfläche bei unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten mit Angabe der Fehlerbalken

4.4.6 Einfluss des w/z-Werts

4.4.6.1 Einführung

Bisherige Untersuchungen zum Beschusswiderstand von Beton gehen davon aus, dass der Widerstand mit zunehmender Druckfestigkeit wächst (vgl. 2.2). Einer der Parameter zur Einstellung der Druckfestigkeit einer Betonzusammensetzung ist der w/z-Wert. Die in dieser Arbeit gewählten w/z-Werte sind 0,60 für den Referenzbeton, 0,45 und 0,35. In Abschnitt 4.3.5 konnten bekannte Ergebnisse zur Bruchenergie bestätigt werden; diese steigt mit sinkendem w/z-Wert an.

Die dargestellten Mittelwerte der einzelnen Testreihen und ihre Variationskoeffizienten ergeben sich aus jeweils zehn Versuchen. In der Testreihe 3.5.b wurde elf Versuche durchgeführt, jedoch löste die Kamera beim 2. Schuss nicht rechtzeitig aus. Die Ergebnisse dieses Versuchs sind nicht in den Mittelwerten berücksichtigt. Alle Einzelwerte finden sich im Anhang „w/z-Wert“.

4.4.6.2 Ergebnisse

Bruchfläche der Meso-Mikro-Ebene

Die Prüfmassen zur Untersuchung mit dem CPA ändern sich innerhalb der üblichen Streuung nur minimal. In der Testreihe 3.5.a beträgt die Masse $m_{\text{CPA},045} = 248,2 \text{ g}$ ($V = 0,099$) und in der Testreihe 3.5.b ist die Masse $m_{\text{CPA},035} = 258,6 \text{ g}$ ($V = 0,112$).

Abbildung 4.4.18 ist zu entnehmen, dass die Verteilung dieser Massen aber unterschiedlich ist. Mit zunehmendem w/z-Wert entstehen mehr feine und weniger grobe Partikel. Für einen w/z-Wert von 0,35 sind im Mittel 3,488 Millionen Partikel ($V = 0,160$) gezählt worden; für einen w/z-Wert von 0,45 wurden 3,792 Millionen Partikel ($V = 0,278$) ermittelt. Bei allen Verteilungen ist ein Anstieg der Partikelanzahl bis zur Klasse 0,125 / 0,18 mm zu sehen; hier wird ein Maximum erreicht.

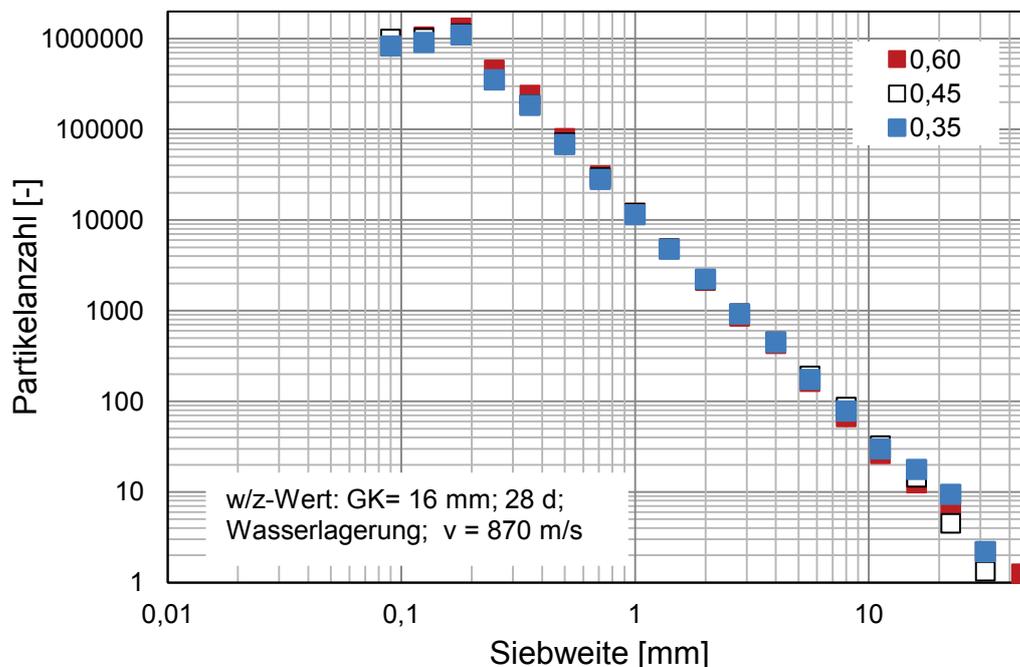


Abbildung 4.4.18: Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichen w/z-Werten

Die Sphärizitäten $1/\psi_c$ der einzelnen Siebweiten verändern sich im Bereich kleiner 4 mm in Abhängigkeit vom w/z-Wert nur unbedeutend; hingegen variieren sie im Mittel der größeren Siebklassen zwischen 1,22 (w/z: 0,35) über 1,31 (w/z: 0,45) zu 1,35 (w/z: 0,60). Folglich sinkt mit ansteigendem w/z-Wert die Ähnlichkeit der größeren Partikel mit einem Ellipsoiden.

Die Partikeloberflächen steigen mit zunehmendem w/z-Wert an. Ein Grund dafür liegt in der Anzahl der Partikel und in der Änderung der Sphärizitäten im größeren Siebbe-

reich. Abbildung 4.4.19 zeigt die relative Verteilung der Oberflächen als Summenlinie in Abhängigkeit von der Siebweite und den w/z-Werten. Die Partikel der Probekörper aus Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 sind feiner verteilt. Die Oberflächen betragen absolut: $ACPA_{0,35} = 3988 \text{ cm}^2$ ($V = 0,107$) und $ACPA_{0,45} = 4098 \text{ cm}^2$ ($V = 0,186$).

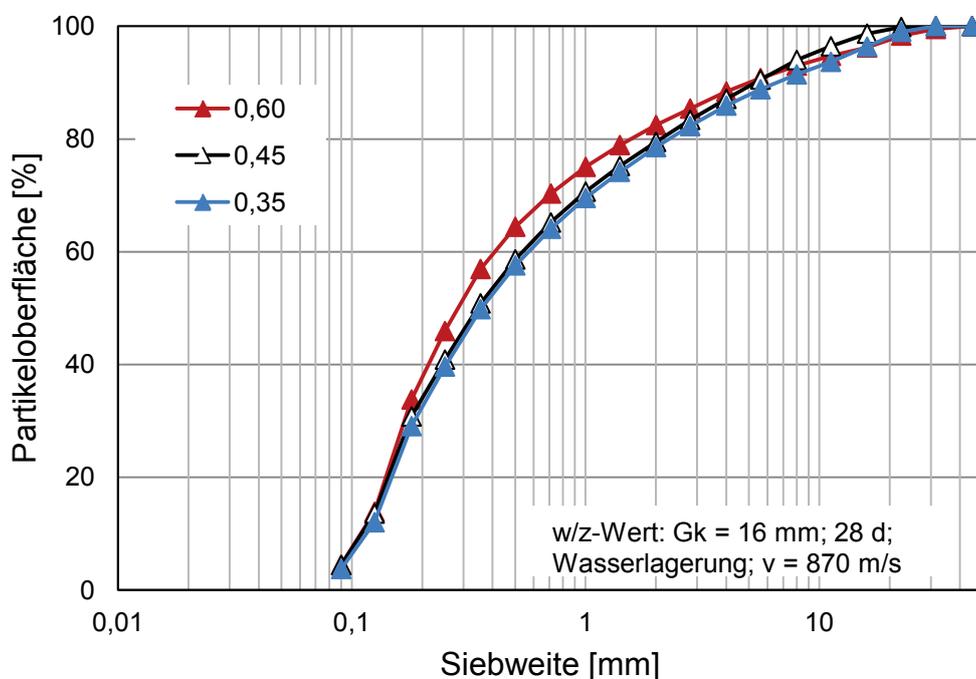


Abbildung 4.4.19: Relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichen w/z-Werten

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Ergebnisse der verschiedenen Oberflächen sind zusammenfassend in Tabelle 4.4.5 wiedergegeben. Aus diesen Werten wurde die Gesamtbruchfläche ermittelt. Bei einem w/z-Wert von 0,35 beträgt diese $A_{GB,035} = 4362 \text{ cm}^2$ ($V = 0,121$) und bei 0,45 ergibt sich $A_{GB,045} = 4542 \text{ cm}^2$ ($V = 0,166$).

Tabelle 4.4.5: Übersicht der verschiedenen Oberflächen der Makro-Meso-Ebene (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	$A_{VS,3D} [\text{cm}^2]$	$A_{RS,3D} [\text{cm}^2]$	$A_{SV} [\text{cm}^2]$	$A_{VS,Ori} [\text{cm}^2]$	$A_{RS,Ori} [\text{cm}^2]$
0,60 (3.1.a)	66,7 (0,139)	146,5 (0,275)	139,7 (0,822)	60,2 (0,135)	134,0 (0,302)
0,45 (3.5.a)	104,1 (0,115)	157,2 (0,158)	416,2 (0,232)	84,0 (0,113)	133,4 (0,172)
0,35 (3.5.b)	96,6 (0,280)	180,3 (0,134)	335,3 (0,524)	74,0 (0,294)	157,0 (0,168)

Die Probekörper konnten in allen Versuchen als zusammenhängende Platten aus dem Kugelfang ausgebaut werden. Die mittleren Massen der Bruchstücke, die mit dem Scannerverfahren untersucht wurden, betragen $m_{SV,035} = 137,8 \text{ g}$ ($V = 0,541$) und $m_{SV,045} = 164,6 \text{ g}$ ($V = 0,247$).

Abbildung 4.4.20 zeigt die Gesamtbruchfläche in Abhängigkeit zu den w/z-Werten. Mit steigendem w/z-Wert steigt die Gesamtbruchfläche an. Bei der Testreihe 3.5.a ist auffällig, dass ein Einzelwert (3.5.a-3) gegenüber den anderen Werten ausreißt. Die mit der CPA ermittelte Partikeloberfläche ist hier deutlich kleiner gegenüber den anderen Einzelwerten. Er wurde bei der Berechnung der Mittelwerte dennoch berücksichtigt.

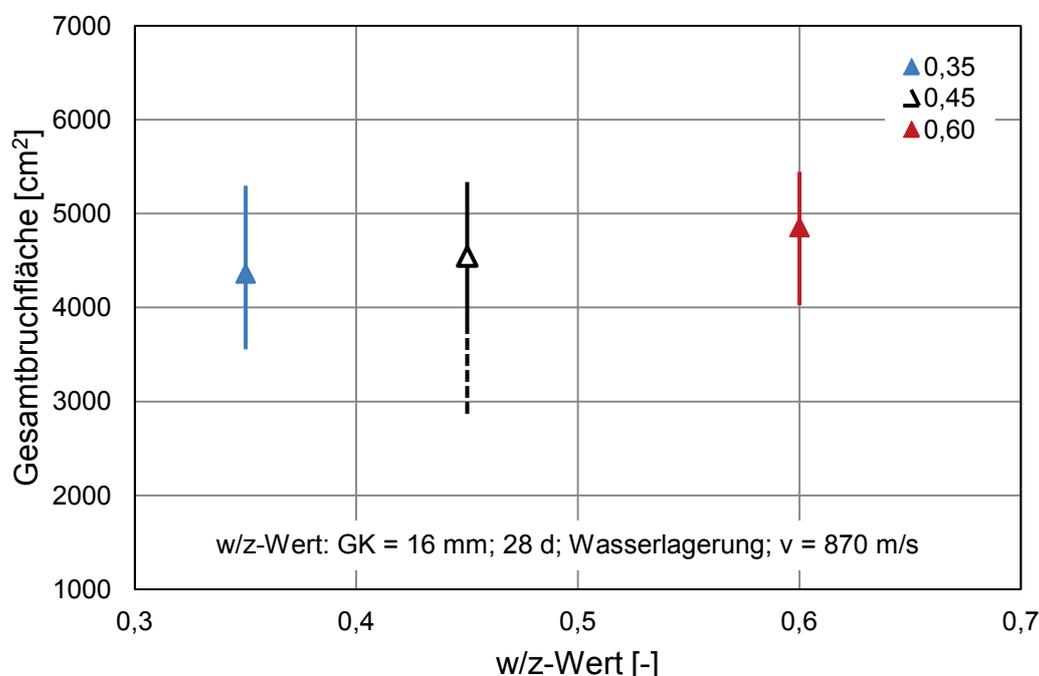


Abbildung 4.4.20: Gesamtbruchfläche in Abhängigkeit vom w/z-Wert mit Angabe der Streubereiche (gestrichelte Linie: verlängerter Streubereich durch Ausreißer)

Energiebetrachtung

Die Prüfgeschwindigkeit vor dem Auftreffen des Projektils auf den Probekörper beträgt 869 m/s ($V = 0,001$) für die Testreihe 3.5.a und 868 m/s ($V = 0,003$) für die Testreihe 3.5.b. Nach der Perforation der Probekörper betragen die Geschwindigkeiten der Projektile im Mittel $v_{aus,045} = 647 \text{ m/s}$ ($V = 0,037$) und $v_{aus,035} = 629 \text{ m/s}$ ($V = 0,038$). Aus diesen Geschwindigkeiten wurde die Energiedifferenz bestimmt. Für den w/z-Wert 0,45 wurde eine Energiedifferenz $\Delta E_{045} = 1595 \text{ J}$ ($V = 0,093$) berechnet

und für den w/z-Wert 0,35 ist die Energiedifferenz $\Delta E_{0,35} = 1705 \text{ J}$ ($V = 0,083$) groß. Abbildung 4.4.21 gibt die Ergebnisse zur Energiemessung wieder.

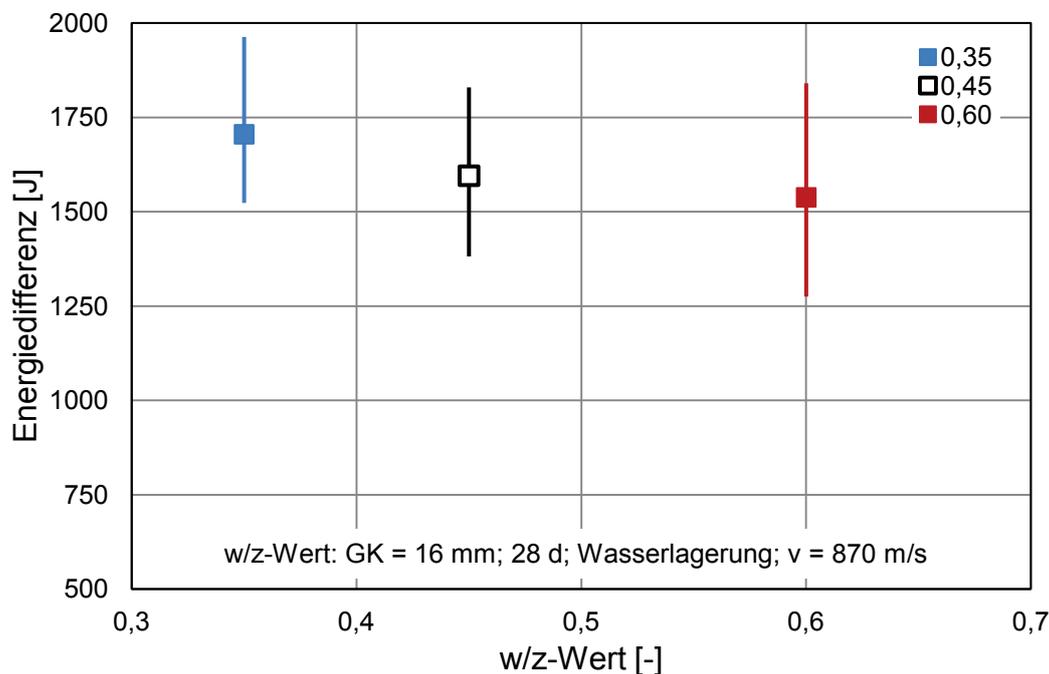


Abbildung 4.4.21: Energiedifferenz in Abhängigkeit vom w/z-Wert

4.4.6.3 Diskussion

Die gemessenen Begleitwerte der Festigkeit und der E-Moduln steigen wie erwartet mit sinkendem w/z-Wert an und liegen in einer ähnlichen Größenordnung wie die Begleitwerte der bruchmechanischen Untersuchung. Die mit sinkendem w/z-Wert ansteigende Bruchenergie konnte damit begründet werden, dass zum Trennen von Probekörpern mit dichter, höherfesterer Matrix mehr Energie benötigt wird. Bei w/z-Werten $> 0,40$ kann das sich ausbildende Kapillarporensystem unter Belastung als Sollbruchstelle dienen und dem Trennriss so einen Weg vorgeben.

Durch einen geringeren w/z-Wert im Beton wird einerseits mehr Energie vom Probekörper absorbiert, andererseits wird die aus der Energie entstehende Gesamtbruchfläche kleiner. Abbildung 4.4.22 zeigt, dass die Werte der Energiedifferenz und der Gesamtbruchfläche sehr eng beieinander liegen. Der Ausreißer in der Testreihe 3.5.a ist in der Darstellung mit berücksichtigt.

Bei näherer Betrachtung der Ergebnisse fallen folgende Besonderheiten auf:

- Obwohl die Gesamtbruchfläche für Betone mit kleinerem w/z-Wert sinkt, steigt die Ausbruchkraterfläche und damit der Wirkungsbereich der Druckwellen

le an. Die Fragmentmassen steigen folglich auch, sind aber für die Betone mit w/z-Werten 0,35 und 0,45 in gleicher Größenordnung.

- Die Verteilung der Fragmente ist für Betone mit kleinerem w/z-Wert deutlich größer; besonders deutlich zeigt sich das in der Anzahl der Bruchstücke > 25 mm.

Der größere Wirkungsbereich der Druckwelle bei den untersuchten Betonen mit kleinerem w/z-Wert kann durch die dichtere Matrix und das fehlende bzw. gering ausgeprägte Kapillarporensystem erklärt werden. Dadurch wird die Druckwelle weniger oft reflektiert bzw. abgelenkt und kann die notwendige Bruchenergie über längere Strecken transportieren. Größere Fragmente entstehen dabei durch die steigende spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ mit sinkendem w/z-Wert. Aus der größeren spezifischen Bruchenergie folgt, dass mehr Energie zur Verfügung stehen muss, um die gleiche Fläche zu erhalten. Ist die zur Verfügung stehende Energie nicht groß genug, wird ein Fragment nicht weiter zerteilt.

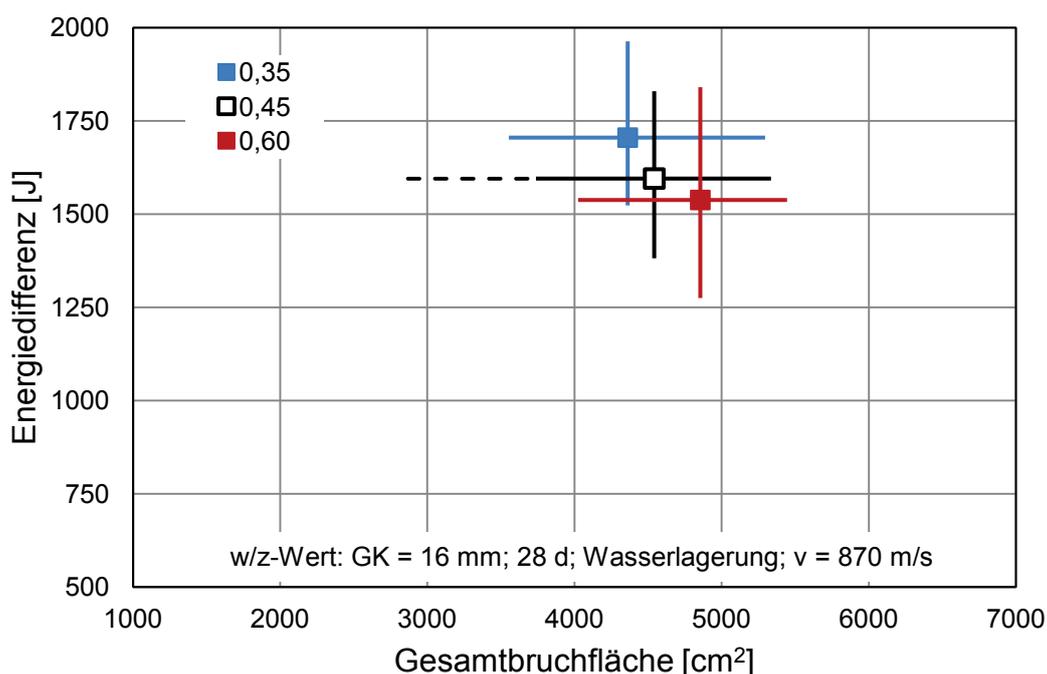


Abbildung 4.4.22: Energiedifferenz über die Gesamtbruchfläche bei unterschiedlichen w/z-Werten mit Angabe der Minimal- und Maximalspanne (gestrichelte Linie: verlängerter Streubreich durch Ausreißer)

4.4.7 Einfluss des Größtkorndurchmessers

4.4.7.1 Einführung

Untersuchungen von Kustermann et al. [76] haben gezeigt, dass ein hoher Beschusswiderstand in Form eines kleinen Ausbruchkraters dann erreicht wird, wenn der Größtkorndurchmesser mindestens so groß ist wie der Projektildurchmesser. In dieser Arbeit werden Betone mit einem Größtkorn von 16 mm und 8 mm und eine Mörtelmischung mit einem 4 mm Größtkorn untersucht. Bei diesen Mischungen wurde das Verhältnis des Zementleinvolumens zum Volumen der Gesteinskörnung konstant gehalten. Zusätzlich wird ein reiner Zementstein geprüft. In Abschnitt 4.3.6 konnten bekannte Untersuchungen zur Bruchenergie bestätigt werden; die Bruchenergie steigt mit zunehmendem Größtkorndurchmesser auf Grund eines längeren Rissweges an.

Es sind jeweils zehn Probekörper in der Mittelwertberechnung berücksichtigt. In der Testreihe 3.6.a wurde der Probekörper 3.6.a-3 ausgelassen, da hier die Kamera nicht rechtzeitig auslöste. Im Folgenden sind die Mittelwerte und der Variationskoeffizient dargestellt. Die Einzelwerte finden sich im Anhang „Größtkorndurchmesser“.

4.4.7.2 Ergebnisse

Die untersuchten Massen der Probekörper und die Anzahl der Partikel finden sich in Tabelle 4.4.6. Die Massen m_{CPA} werden mit kleiner werdendem Größtkorndurchmesser geringer; die Masse des Zementsteins hingegen ist genauso groß wie die des Referenzbetons.

Tabelle 4.4.6: Untersuchte Massen und Anzahl an Partikeln unterschiedlicher Größtkorndurchmesser (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	Masse m_{CPA} [g]	Anzahl der Partikel in Millionen
16 mm (3.1.a)	250,0 (0,160)	4,173 (0,110)
8 mm (3.6.a)	182,0 (0,131)	2,894 (0,249)
4 mm (3.6.b)	97,3 (0,269)	2,359 (0,211)
0 mm (3.6.c)	250,0 (0,197)	1,934 (0,134)

Die Anzahl der Partikel sinkt mit abnehmendem Größtkorndurchmesser ab. Auffällig ist, dass die Partikelanzahl des Zementsteins nur etwa halb so groß ist wie die des Referenzbetons, obwohl die Partikelmassen beider Testreihen gleich groß sind.

Abbildung 4.4.23 zeigt die Anzahl der Partikel in den einzelnen Klassen. Bei allen Testreihen kann wie auch schon bei den anderen untersuchten Einflüssen ein Knick in der Verteilung der Partikel in der Klasse 0,125 / 0,18 mm festgestellt werden.

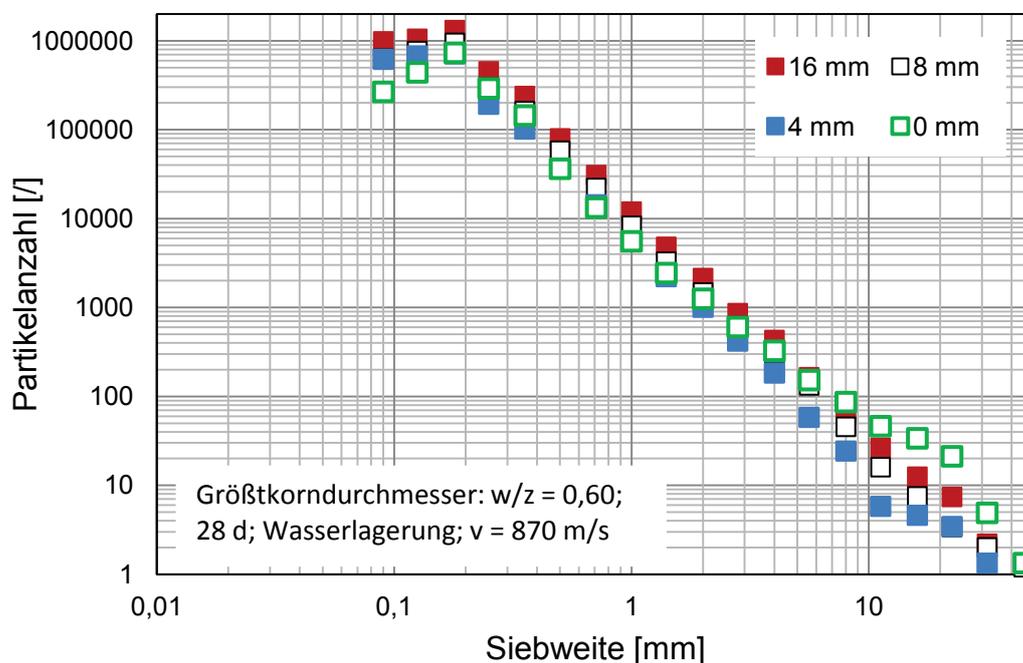


Abbildung 4.4.23: Partikelanzahl in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichen Größtkorndurchmessern

Die Werte der Sphärizität unterscheiden sich in den meisten Klassen nur geringfügig; erst ab der Klasse 11,2 / 16 mm variieren die Werte stärker (zwischen 1,36 und 1,66), sind aber in verschiedenen Klassen mal größer und mal kleiner als die vergleichbaren Werte der anderen Testreihen. Auf Grund der geringen Partikelanzahl in dieser Größe wirken sich einzelne Abweichung eines Partikels von der Rundheit stärker auf die Mittelwerte der Sphärizität aus.

Die relative Partikeloberflächenverteilung in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser ist in Abbildung 4.4.24 dargestellt. Die Verteilung der Partikel der Beton- und der Mörtelmischungen sind nahezu identisch; die Partikel des Mörtels sind geringfügig feiner verteilt. Dagegen ist die Verteilung des Zementsteins deutlich gröber. Es können mehr große Partikel und weniger feine festgestellt werden; dieses Verhalten setzt sich in der Größe und Anzahl der Bruchstücke fort.

Die Oberflächen der Partikel betragen:

- Mischung mit Größtkorndurchmesser 16 mm: $A_{CPA} = 4696$ ($V = 0,081$) cm^2 ,

- Mischung mit Größtkorndurchmesser 8 mm: $A_{CPA,8} = 3030$ ($V = 0,183$) cm^2 ,
- Mischung mit Größtkorndurchmesser 4 mm: $A_{CPA,4} = 2085$ ($V = 0,196$) cm^2 ,
- Mischung aus Zementstein: $A_{CPA,0} = 3167$ ($V = 0,085$) cm^2 .

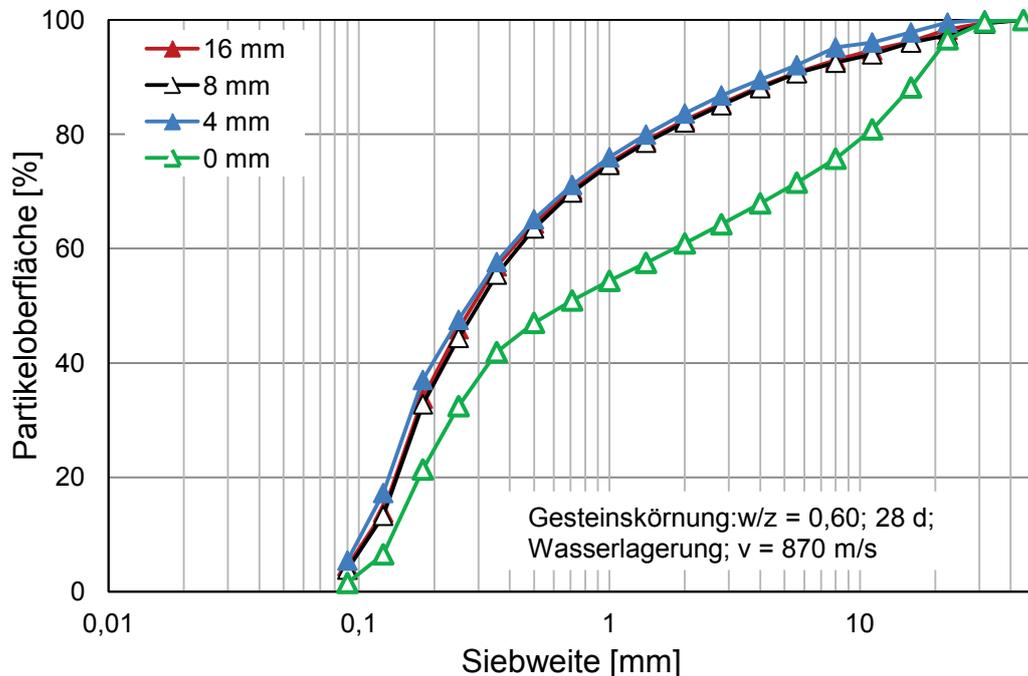


Abbildung 4.4.24: Relative Partikeloberfläche in Abhängigkeit von der Siebweite bei unterschiedlichen Größtkorndurchmessern

Bruchfläche der Makro-Meso-Ebene

Die Probekörper mit Gesteinskörnung in ihrer Zusammensetzung sind als vollständige Platten aus dem Stahlrahmen ausgebaut worden. Die Probekörper der Zementsteinmischung sind ausnahmslos in mehrere große Bruchstücke zerfallen, so dass diese Oberflächen mit dem fotografischen Verfahren ermittelt wurden. Die Massen dieser Bruchstücke betragen zwischen 340 g und 3210 g (vgl. 4.4.1).

Bruchstücke mit einer Einzelmasse unter 300 g und einer kleinsten Abmessung > 25 mm wurden in größerer Anzahl für die Zementsteinmischung gefunden (im Mittel ca. 31 Bruchstücke). Diese mit dem Scannerverfahren untersuchten Bruchstücke haben eine mittlere Masse je Probekörper von 414,2 g ($V = 0,404$). Die anderen Testreihen dieses Abschnitts weisen nur eine geringe Anzahl an Bruchstücken dieser Größe auf (0 bis 7). Die mittlere Masse zur Bestimmung der Oberflächen mit dem Scannerverfahren sind für die Testreihe 3.6.a $m_{SV,8} = 22,5$ g ($V = 0,783$) und für die Testreihe 3.6.b $m_{SV,4} = 32,4$ g ($V = 0,817$).

Die Ergebnisse der verschiedenen Oberflächen sind zusammenfassend in Tabelle 4.4.7 wiedergegeben.

Tabelle 4.4.7: Übersicht der verschiedenen Oberflächen der Makro-Meso-Ebene (in Klammern: Variationskoeffizient)

Testreihe	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]
16 mm (3.1.a)	66,7 (0,139)	146,5 (0,275)	139,7 (0,822)	60,2 (0,135)	134,0 (0,302)
8 mm (3.6.a)	69,4 (0,117)	91,5 (0,171)	53,7 (0,721)	58,0 (0,151)	73,0 (0,225)
4 mm (3.6.b)	46,6 (0,241)	74,6 (0,303)	101,6 (0,680)	39,4 (0,223)	57,6 (0,354)

Testreihe	A_{FV} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	A_{Ori} [cm ²]
0 mm (3.6.c)	2870,2 (0,044)	1036,1 (0,304)	2389,7 (0,012)

Die Abhängigkeit der Gesamtbruchfläche vom Größtkorndurchmesser ist in Abbildung 4.4.25 dargestellt. Zusätzlich ist der Streubereich der Mittelwerte eingefügt.

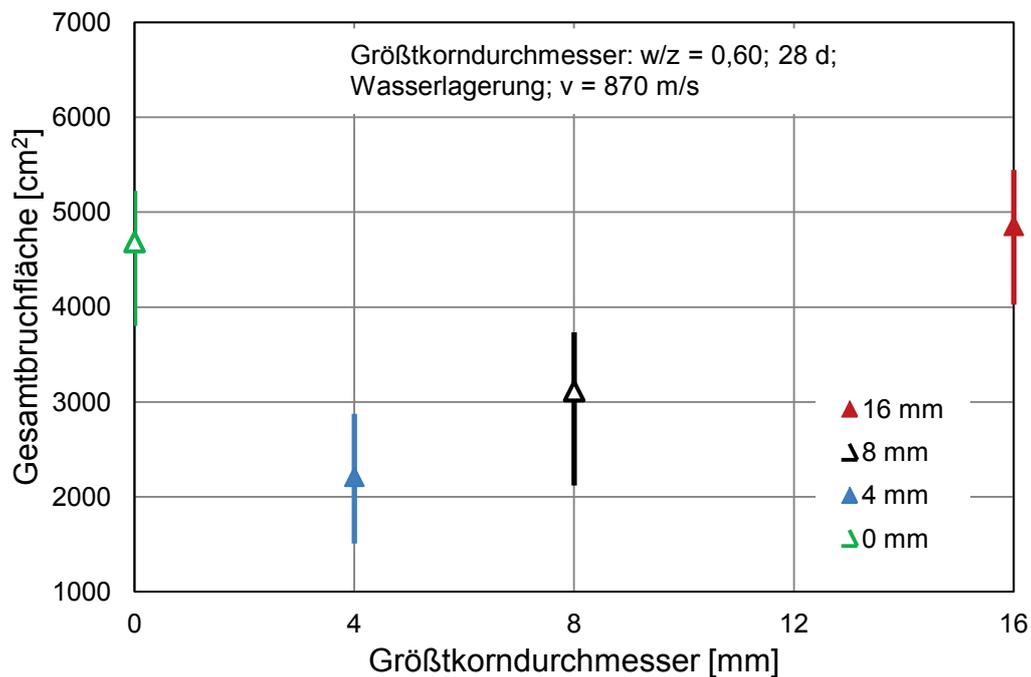


Abbildung 4.4.25: Gesamtbruchfläche in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser mit Angabe der Streubereiche

Die mittlere Gesamtbruchfläche ergibt sich zu:

- $A_{GB} = 4855$ ($V = 0,086$) cm² für den Größtkorndurchmesser 16 mm,
- $A_{GB,8} = 3113$ ($V = 0,177$) cm² für den Größtkorndurchmesser 8 mm,

- $A_{GB,4} = 2210$ ($V = 0,191$) cm^2 für den Größtkorndurchmesser 4 mm und
- $A_{GB,0} = 4684$ ($V = 0,109$) cm^2 für den Zementstein ohne Gesteinskorn.

Die Gesamtbruchfläche des Zementsteins ist fast so groß wie die des Referenzbetons mit einem 16 mm Größtkorn (96,5 %). Für die anderen beiden Testreihen gilt: Mit abnehmendem Größtkorndurchmesser wird die Gesamtbruchfläche kleiner. Die Gesamtbruchflächen der Testreihe 3.6.a bzw. der Testreihe 3.6.b entsprechen 64,1 % bzw. 45,5 % des Referenzbeton.

Energiebetrachtung

Während die Prüfgeschwindigkeit als konstant in allen Testreihen angesehen werden kann, steigt die Austrittsgeschwindigkeit mit abnehmendem Größtkorndurchmesser an. Für die Energiedifferenz ergibt sich daraus, dass diese mit kleinerem Größtkorndurchmesser sinkt. Es wird weniger Energie absorbiert; beispielsweise absorbiert der Zementstein im Mittel nur noch 42 % der Energie, die der Referenzbeton aufnimmt. Abbildung 4.4.26 zeigt den Zusammenhang zwischen Energiedifferenz und Größtkorndurchmesser.

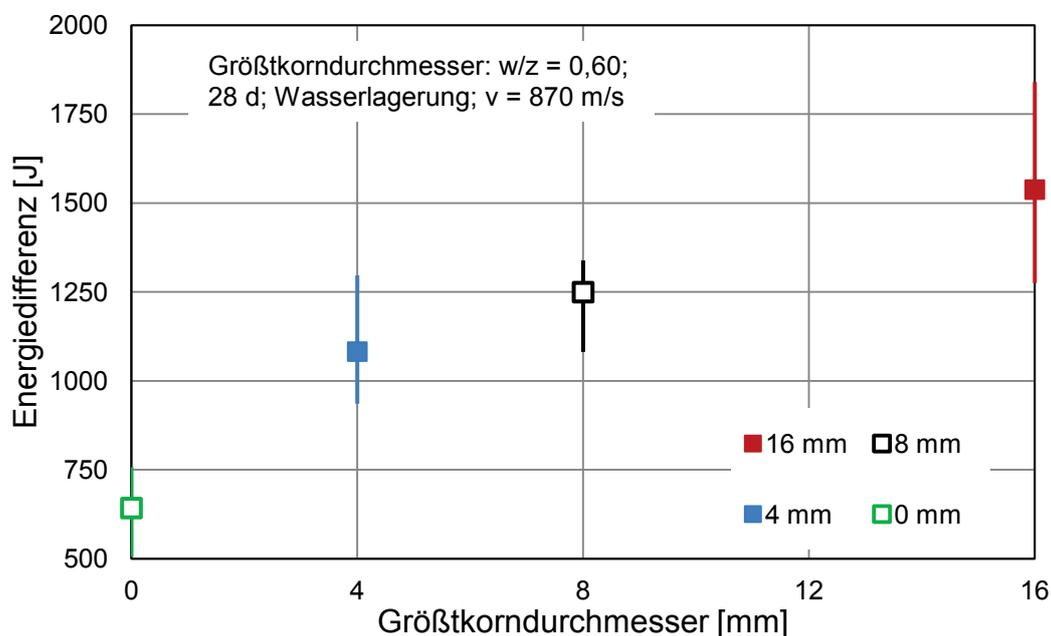


Abbildung 4.4.26: Energiedifferenz in Abhängigkeit vom Größtkorndurchmesser

Die gemessenen Prüfgeschwindigkeiten vor und nach der Perforation des Probekörpers durch das Projektil finden sich zusammen mit den Ergebnissen der Energiedifferenz in Tabelle 4.4.8.

Tabelle 4.4.8: Ergebnisse der Geschwindigkeiten vor und nach der Perforation sowie der Energiedifferenz

Testreihe	v_z [m/s]	v_{aus} [m/s]	ΔE [J]
16 mm (3.1.a)	876 (0,005)	665 (0,050)	1538 (0,135)
8 mm (3.6.a)	873 (0,010)	710 (0,031)	1223 (0,089)
4 mm (3.6.b)	869 (0,005)	727 (0,022)	1082 (0,102)
0 mm (3.6.c)	869 (0,004)	788 (0,015)	643 (0,144)

4.4.7.3 Diskussion

Die Begleitwerte der Betone und des Zementsteins stimmen in beiden Untersuchungsabschnitten gut miteinander überein, so dass ein Vergleichbarkeit gewährleistet ist. Hingegen passen die Festigkeitskennwerte der Mörtelmischung beider Untersuchungen nicht zusammen. Trotz intensiver Fehlersuche konnte kein Grund für die Unterschiede gefunden werden. Die Übertragung der Bruchmechanikergebnisse auf die ballistische Untersuchung kann daher nur unter Vorbehalt stattfinden.

Die ballistische Untersuchung bestätigt die Ergebnisse von Kustermann et al. [76]; durch ein größeres Größtkorn wird der „Beschusswiderstand“ größer. Die Energieabsorption des Probekörpers und die Ausbruchkraterfläche steigen an. Im Gegensatz zu den Betonen und der Mörtelmischung zeigt die Zementsteinmischung ein nicht vergleichbares, eigenes Materialverhalten. Obwohl die Energiedifferenz deutlich geringer ist, wurde für Probekörper aus Zementstein die zweitgrößte Gesamtbruchfläche gemessen. Die bereits für die geringere spezifische Bruchenergie verantwortliche fehlende Rissverzahnung sorgt auch in der ballistischen Untersuchung dafür, dass über einen Trennriss hinweg weder Kräfte noch Energie übertragen werden können. Da wenig Energie gebraucht wird, um eine Bruchfläche im Zementstein zu erzeugen, ergibt sich trotz relativ geringer Energiedifferenz eine relativ große Gesamtbruchfläche. Die spezifische Bruchenergie ist folglich maßgebend für das Verhalten des Zementsteins unter Beschuss.

Für die Betone und den Mörtel zeigt sich, dass der Wirkungsbereich der Druckwelle kleiner wird, wenn der Größtkorndurchmesser sinkt. Die Fragmentmasse nimmt ab, bleibt aber für diese Testreihen gleichermaßen fein verteilt. Die kleineren Wirkungsbereiche entstehen dadurch, dass die Druckwelle bei kleinerem Korn öfter verschiedene Komponenten (Korn / Zementsteinmatrix) durchläuft. An jeder Grenzfläche von einer Komponente zur anderen wird die Welle durch Reflexionen abgeschwächt. Zu-

sätzlich steigt der Anteil der Kontaktzone mit abnehmendem Korndurchmesser, so dass von mehr Fehl- und Schwachstellen ausgegangen werden kann. Weitere Grenzflächen (Luftpore / Zementsteinmatrix) sind vorhanden und beeinflussen die Ausbreitung der Druckwelle. Besonders bei der Mörtelmischung ist schon im Frischbetonzustand ein hoher Luftporenanteil festgestellt worden. Des Weiteren können die Luftporen als Expansionsraum dienen, so dass das Material beim Eindringen des Projektils „ausweichen“ kann und weniger Energie des Projektils aufnimmt. Die Porosität der Mischungen mit unterschiedlichem Größtkorn ist ausschlaggebend für das Probekörperverhalten unter Beschuss.

Abbildung 4.4.28 zeigt die Energiedifferenz und die Gesamtbruchfläche mit Angabe der Minimal- und Maximalspanne.

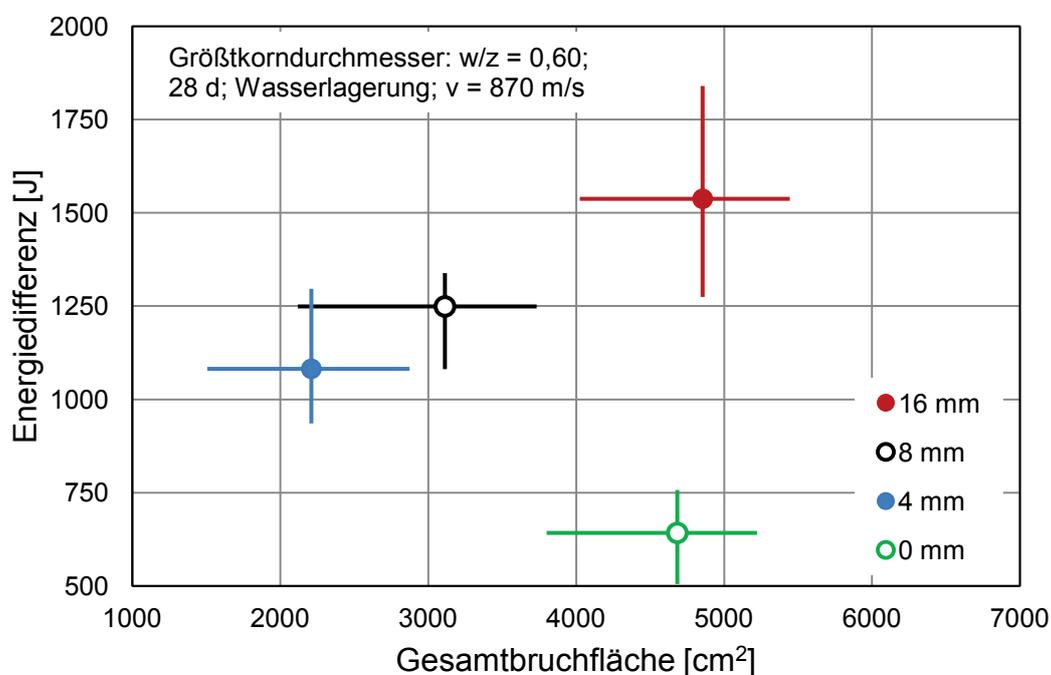


Abbildung 4.4.27: Zusammenhang zwischen Energiedifferenz und Gesamtbruchfläche unterschiedlicher Größtkorndurchmesser

4.4.8 Diskussion der ballistischen Ergebnisse

In den folgenden Diskussionspunkten werden die Ergebnisse des Zementsteins nicht berücksichtigt. Im vorherigen Abschnitt 4.4.7 wurde festgestellt, dass das Materialverhalten des Zementsteins nicht mit dem des Betons verglichen werden kann.

In vielen Modellen wird die Druckfestigkeit als entscheidender Materialkennwert herangezogen, um das Materialverhalten unter Beschuss abzubilden, vgl. Abschnitt 2.2.

Dabei steht eine große Druckfestigkeit für einen hohen Beschusswiderstand. Im Folgenden wird zuerst untersucht, ob die Druckfestigkeit des Betons mit dem in dieser Arbeit verwendeten Beschusswiderstand in Zusammenhang gebracht werden kann. Unter dem Beschusswiderstand kann hier einerseits die absorbierte Energie, andererseits die Größe der Schädigung (Gesamtbruchfläche) verstanden werden. Die Abbildungen 4.4.28 und 4.4.29 zeigen die Energiedifferenz bzw. die Gesamtbruchfläche über die Druckfestigkeit mit Angabe der jeweiligen Fehlerbalken.

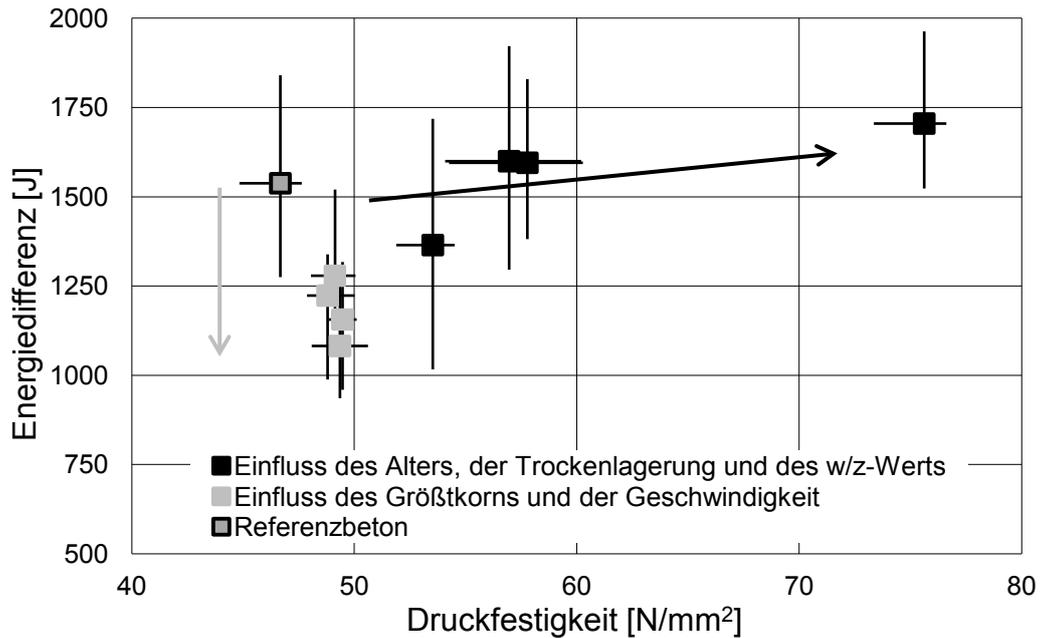


Abbildung 4.4.28: Zusammenhang zwischen Energiedifferenz und Druckfestigkeit

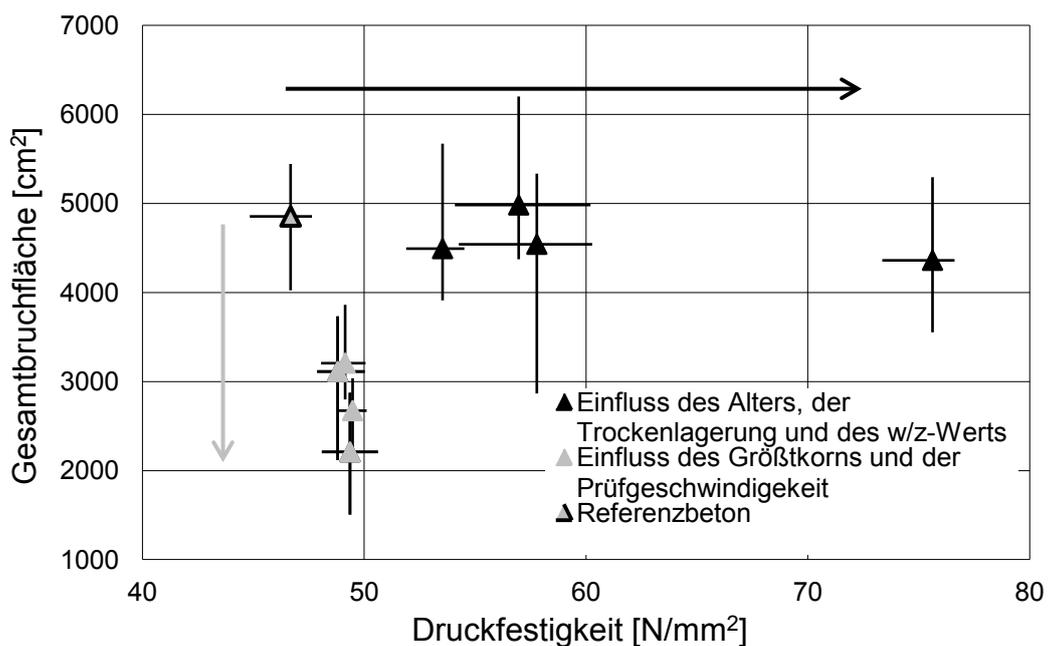


Abbildung 4.4.29: Zusammenhang zwischen Gesamtbruchfläche und Druckfestigkeit

Aus den Abbildungen wird deutlich, dass sich die Änderungen des Größtkorns und der Prüfgeschwindigkeit trotz annähernd gleichbleibender Druckfestigkeit erheblich auf die Energiedifferenz bzw. die Gesamtbruchfläche auswirken (grauer Pfeil). Dagegen übt die Änderung der Druckfestigkeit durch Alterung, Trockenlagerung oder unterschiedliche w/z-Werte nur einen geringen Einfluss auf die Größe der Energiedifferenz bzw. die Gesamtbruchfläche aus (schwarzer Pfeil). Ein Zusammenhang über alle Einflüsse hinweg kann weder zwischen der Druckfestigkeit und der absorbierten Energie noch zwischen der Druckfestigkeit und der Gesamtbruchfläche festgestellt werden. Auch für weitere Kennwerte (z. B.: Größe des Ausbruchkraters) ergibt sich kein Zusammenhang mit der Druckfestigkeit.

Dagegen ist zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und der Energiedifferenz ein linearer Trend erkennbar; Abbildung 4.4.30 zeigt diesen Trend grafisch ohne die Ergebnisse der unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten. Aus diesem Zusammenhang kann gefolgert werden, dass die Dichte und die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit des jeweiligen Materials von Bedeutung für die Energieabsorption sind.

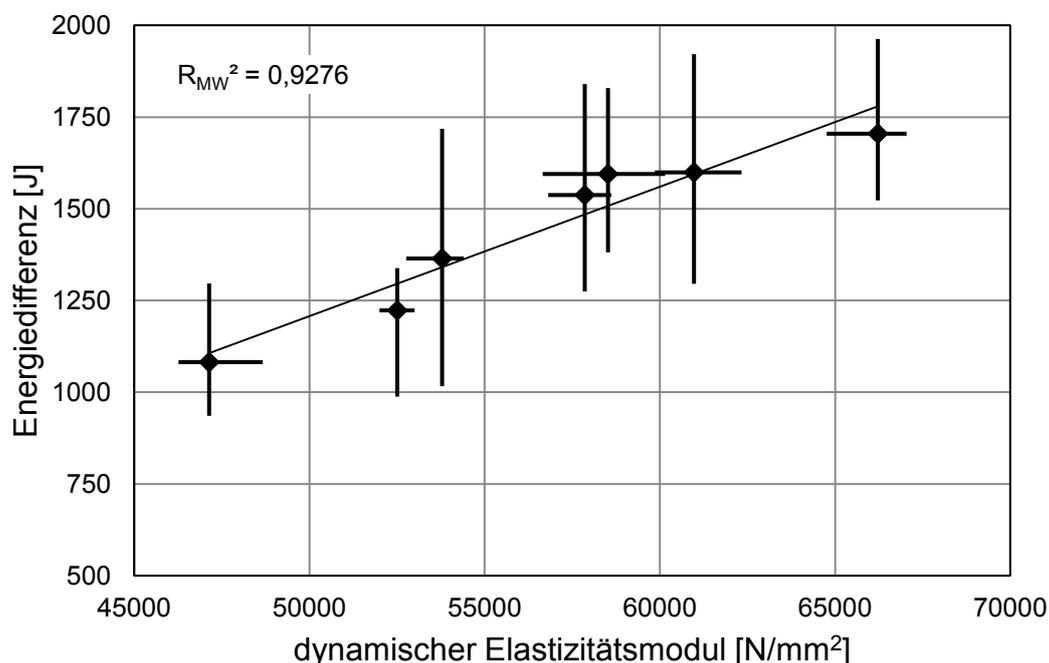


Abbildung 4.4.30: Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und Energiedifferenz

Ein weiterer häufig verwendeter Kennwert ist die Größe der Ausbruchkrater, vgl. Abschnitt 2.2.2. Diese wurden dreidimensional erfasst und sind in Abbildung 4.4.31 mit der absorbierten Energie zu sehen.

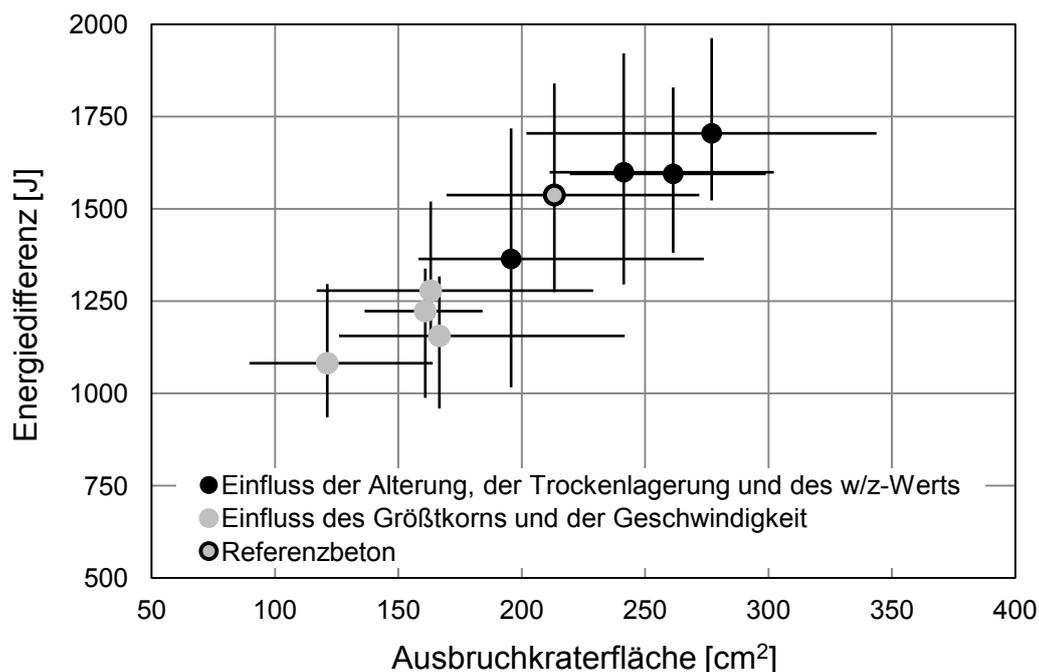


Abbildung 4.4.31: Zusammenhang zwischen Ausbruchkraterfläche und Energiedifferenz

Der Wirkungsbereich der Bruchenergie wird durch die Ausbruchkrater sichtbar. In dieser Arbeit wird der Wirkungsbereich definiert als Bereich, in dem die verfügbare Energie größer ist als die notwendige Bruchenergie zur Erzeugung von Oberflächen. Dadurch entsteht in diesem Bereich eine Schädigung des Probekörpers. Mit ansteigendem Wirkungsbereich ist tendenziell ein Anstieg der absorbierten Energie verbunden. Dabei kann mit zunehmender Ausbruchkraterfläche ein langsamerer Anstieg der Energiedifferenz beobachtet werden. Ein ähnliches Verhalten kann für die Darstellung der Fragmentmasse zur Energiedifferenz festgestellt werden.

In der eigenen Untersuchung wurden die größten Wirkungsbereiche für Probekörper aus Beton mit verringertem w/z-Wert und für Probekörper im höheren Alter festgestellt. Betone mit verringertem w/z-Wert haben einen deutlich kleineren Porenanteil, so dass diese Betone dichter sind, vgl. Zement Taschenbuch [119]. Die fortschreitende Hydratation der unter Wasser gelagerten Proben im Alter von 90 d führt ebenso zu einer geringeren Porosität der Betonstruktur. Die kleinsten Wirkungsbereiche wurden für die Probekörper mit verringertem Größtkorndurchmesser ermittelt. Für diese Probekörper kann von einer größeren Kontaktzone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung ausgegangen werden, durch die es zu einer erhöhten Porosität kommt. Die Probekörper aus Mörtel wiesen einen besonders kleinen Wirkungsbereich auf; diese Probekörper haben schon im Frischbetonzustand deutlich mehr Luft-

poren. In Folge der poröseren Struktur des Betons bzw. Mörtels sind Expansionsräume vorhanden, so dass beim Auftreffen des Projektils verdrängte Fragmente in Poren und Hohlräume ausweichen können. Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass **größere Wirkungsbereiche bzw. Fragmentmassen dann entstehen, wenn die Betonstruktur weniger Zwischenräume aufweist.**

Neben den Poren als Expansionsräumen tritt ein weiterer Effekt mit zunehmender Porosität auf. Die Grenzfläche Zementsteinmatrix / Pore ist vergleichbar mit der Grenzfläche Material / Luft am Rand des Probekörpers. Nach Eibl [46] wird an einem freien Rand die Druckwelle als Zugwelle reflektiert, vgl. Abschnitt 2.2.2. Je größer der Porenanteil ist, desto öfter wird folglich die Druckwelle punktuell reflektiert. Dadurch kommt es zu fortschreitenden Wellenüberlagerungen, die Energie verbrauchen und einen kleinen Wirkungsbereich bewahren.

Hingegen wurde für die Grenzfläche Zementsteinmatrix / wassergefüllte Pore ein größerer Wirkungsbereich festgestellt. Dieses Verhalten kann damit erklärt werden, dass über das inkompressible Wasser hinweg Kräfte und Energie übertragen werden können. Im bruchmechanischen Untersuchungsabschnitt wurde vermutet, dass die trockengelagerten Probekörper auf Grund der van-der-Waals Bindungen eine höhere spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ aufweisen. Folglich muss mehr Energie eingesetzt werden, um eine gleichgroße Fläche zu erzeugen, so dass der Wirkungsbereich kleiner wird und / oder die Fragmente gröber verteilt sind. Diese Überlegung wird durch einen Vergleich der spezifischen Bruchenergie $G_{F,3D}$ mit der entstandenen Bruchfläche A_{GB} unterstützt. Abbildung 4.4.32 zeigt diese Werte für die Einflüsse der Alterung, der Trockenlagerung und des w/z-Werts. Trotz der großen Streuungen ist ein klarer Trend der Mittelwerte erkennbar: **Mit zunehmender spezifischer Bruchenergie entsteht weniger Bruchfläche.**

Diese Schlussfolgerung kann nicht auf die unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten angewandt werden. Durch die Abhängigkeit der spezifischen Bruchenergie von der Geschwindigkeit muss für die direkte Einbeziehung dieser Daten die Änderung der spezifischen Bruchenergie in diesem Geschwindigkeitsbereich bekannt sein. Tendenziell wurde in Abschnitt 4.3.4 für eine zunehmende Prüfgeschwindigkeit eine steigende spezifische Bruchenergie beobachtet; gleichzeitig steigt in der ballistischen Untersuchung die Gesamtbruchfläche an, so dass andere Faktoren neben der spezifischen Bruchenergie für die Gesamtbruchfläche ausschlaggebend sein müssen. Der

einzigste Unterschied zwischen den Testreihen ist die Prüfgeschwindigkeit und damit die eingebrachte Energie. **Folglich ist die Größe der vom Projektil eingebrachten Energie für die Größe der Bruchfläche entscheidend**, vgl. Abschnitt 4.4.5. Die Auswirkungen aus der geänderten Energie sind deutlich größer als die Auswirkungen der geänderten spezifischen Bruchenergie.

Auch die Auswirkungen der Änderung des Größtkorndurchmessers muss auf andere Faktoren als die spezifische Bruchenergie zurückgeführt werden. Durch eine geringere Rissverzahnung bei kleinerem Korndurchmesser kann weniger Energie über einen Trennriss hinweg weitergegeben werden, vgl. Abschnitt 4.4.7. Des Weiteren wird durch ein kleineres Größtkorn die Kontaktzone und der Porenraum vergrößert. Poren können, wie oben aufgeführt, zur Reflexion der Druckwelle und zu kleineren Wirkungsbereichen führen.

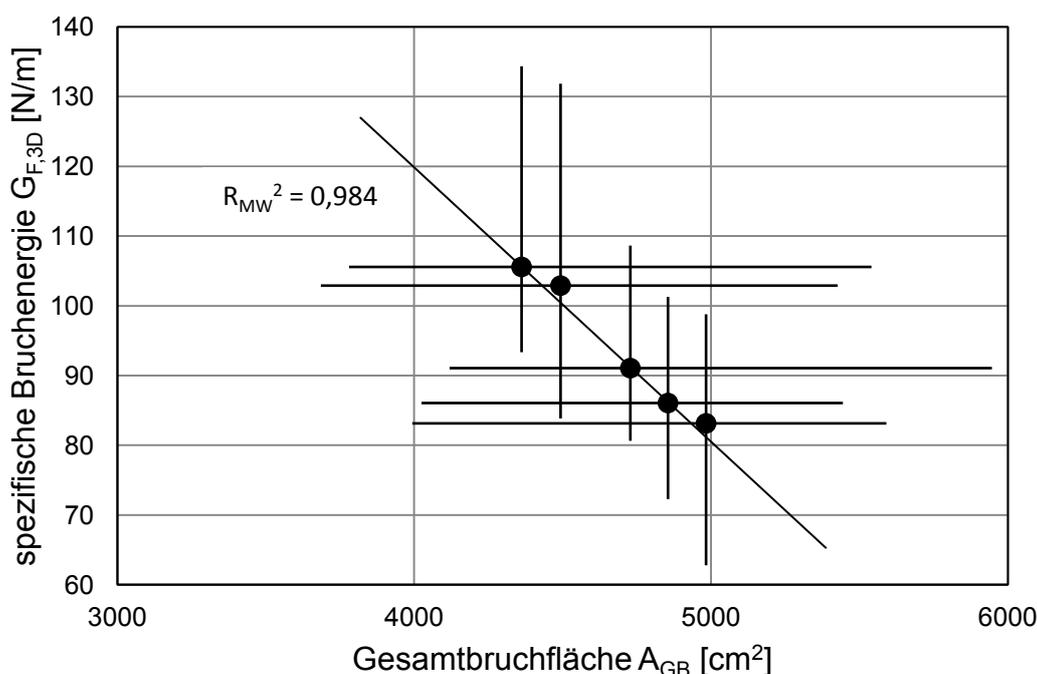


Abbildung 4.4.32: Spezifische Bruchenergie in Abhängigkeit von der Gesamtbruchfläche

4.4.9 Zusammenfassung der ballistischen Untersuchung

In der ballistischen Untersuchung wurden die Energiedifferenz des Projektils und die Schädigung des Probekörpers in Form einer Bruchfläche bestimmt. Die Energiedifferenz ergibt sich aus der Projektilgeschwindigkeit vor und nach der Perforation des Probekörpers; da Energie nicht verloren gehen kann, muss die kinetische Energie

des Projektils in andere Energieformen übergegangen sein. Die Größe der absorbierten Energie wird entscheidend von den folgenden vier Faktoren bestimmt:

- der Porosität der Probekörper (→Wellenausbreitungsgeschwindigkeit, Dichte),
- der spezifischen Bruchenergie,
- der möglichen Rissverzahnung zwischen Rissufern und
- der Größe der eingebrachten Energie.

Je poröser ein Probekörper ist, desto öfter wird die Druckwelle und damit Energie an Poren und Fehlstellen reflektiert. In Folge dessen kann weniger Energie absorbiert werden; der Wirkungsbereich der Energie wird kleiner. Im Zusammenhang damit steht auch die spezifische Bruchenergie. Dichtere Materialien haben in der Regel eine höhere spezifische Bruchenergie, d. h. es muss mehr Energie eingesetzt werden, um die gleiche Bruchfläche zu erhalten.

Die Schädigung wird in dieser Untersuchung durch die aus der Energiedifferenz entstehende Gesamtbruchfläche abgebildet. Die Gesamtbruchfläche wird hauptsächlich aus der Oberfläche der Fragmente gebildet. Diese ist abhängig davon, ob alle Fragmente berücksichtigt worden sind und welches Fragmentmodell angesetzt wird. Innerhalb der Massenermittlung konnte festgestellt werden, dass nahezu alle Fragmente gefunden wurden. Das Ellipsoidmodell berücksichtigt zwei direkte Abmessungen (Feretdurchmesser und Länge), das Volumen und die Fragmentform (Sphärizität). Die Größe der Gesamtbruchfläche hängt ebenfalls von den oben genannten Faktoren ab.

Aus der Untersuchung ist deutlich geworden, dass die Druckfestigkeit als einziger Kennwert des Materials das Verhalten nicht genau genug berücksichtigt. Einflüsse, die die Druckfestigkeit verändern, bewirken nicht zwangsläufig eine größere Energieabsorption. Des Weiteren gibt es Einflüsse, die keine Änderung der Druckfestigkeit hervorrufen, sich aber signifikant auf die absorbierte Energie auswirken.

5 Energetische Beschreibung des Materialverhaltens

5.1 Einführung

Das Verhalten eines Materials kann durch den Widerstand beschrieben werden, den es der dynamischen Belastung entgegenbringt. Ein Widerstand ist „in der Dynamik alles, was einer Bewegung hindernd entgegenwirkt, d. h. Bewegungsenergie verbraucht“ [85]. In dieser Arbeit wird die Bewegung des Projektils durch das Auftreffen auf einen Probekörper behindert. Der Widerstand des Probekörpers besteht darin, dass die Energie des Projektils teilweise aufgenommen wird. Bei einer Perforation des Probekörpers gilt: Je geringer die Austrittsenergie des Projektils ist, umso mehr Energie wurde vom Probekörper aufgenommen und desto größer ist der Widerstand des Materials. Die Untersuchungen in dieser Arbeit ermöglichen es, Beziehungen zwischen den verschiedenen Betoneinflüssen und der aufgenommenen Energie auf der Widerstandsseite herzustellen.

Die aufgenommene Energie geht in unterschiedliche Energieformen über. Nach dem Energie-Balance-Modell von Dinovitzer et al. [42] stehen die Austrittsenergie und die Verformungsenergie des Projektils sowie die kinetische Energie und die Verformungsenergie der Fragmente mit der Eintrittsenergie im Gleichgewicht, vgl. Abschnitt 2. Die Größe der einzelnen Energieformen kann zum Teil aus den beobachteten Versuchsergebnissen abgeleitet werden. Diese werden (soweit möglich) im Folgenden näher bestimmt und im Zusammenhang mit den jeweiligen untersuchten Einflüssen dieser Arbeit betrachtet.

5.2 Austrittsenergie des Projektils

5.2.1 Einführung

Die Austrittsenergie des Projektils ist ein entscheidender Kennwert zur Charakterisierung des Beschusswiderstandes eines Materials. Je geringer die Austrittsenergie ist, desto geringer ist die davon ausgehende Gefährdung. Die Austrittsenergie des Projektils wird aus der Geschwindigkeit des Projektils nach der Perforation und seiner Masse bestimmt.

5.2.2 Einfluss der Eintrittsenergie

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass die Eintrittsenergie einen großen Einfluss auf die Größe der Austrittsenergie besitzt, vgl. Abschnitt 4.4.5. Mit steigender Eintrittsenergie nimmt die Austrittsenergie zu, siehe Abbildung 5.2.1.

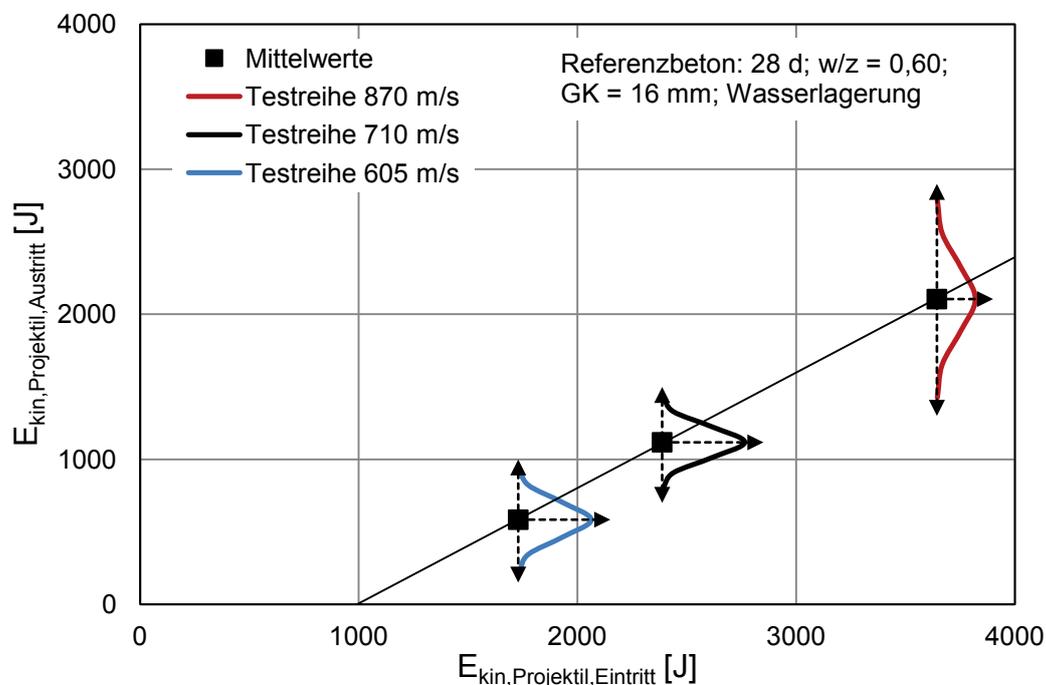


Abbildung 5.2.1: Zusammenhang zwischen Eintritts- und Austrittsenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

Dieser Zusammenhang ist bestimmt durch Gleichung 5.1. Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression beträgt für die Einzelwerte $R_{EW}^2 = 0,952$, so dass eine sehr hohe Korrelation zwischen der Eintritts- und der Austrittsenergie vorliegt.

$$E_{\text{kin,Projektile, Austritt,E}} = 0,8 \cdot E_{\text{kin,Projektile, Eintritt}} - 790 \quad \text{Gl. 5.1}$$

Des Weiteren ist zu sehen, dass bei einer Eintrittsenergie von ca. 990 J keine Austrittsenergie mehr entsteht; diese Energie entspricht einer Prüfungsgeschwindigkeit des genutzten Projektils von ca. 455 m/s. Bei dieser Geschwindigkeit wird ein 5 cm-dicker Probekörper des Referenzbetons mit dem gewählten Projektil noch nicht perforiert.

Im nächsten Schritt wird der festgestellte Zusammenhang zwischen Eintritts- und Austrittsenergie genutzt, um die Variationen der Eintrittsenergie innerhalb der einzelnen Testreihen ausgleichen zu können. Dazu wird die erwartete Austrittsenergie der einzelnen Versuche berechnet und der gemessenen Austrittsenergie gegenübergestellt. Abbildung 5.2.2 zeigt das Verhältnis der Mittelwerte der Testreihen zueinander

und gibt deren Normalverteilung an. Die Abweichung eines Verhältnisses vom Referenzwert (1,0) stellt dabei die Auswirkung des jeweiligen Einflusses auf die Austrittsenergie dar. Bei einem Verhältnis größer 1,0 sinkt die Austrittsenergie ab, bei einem kleineren Verhältnis steigt sie an.

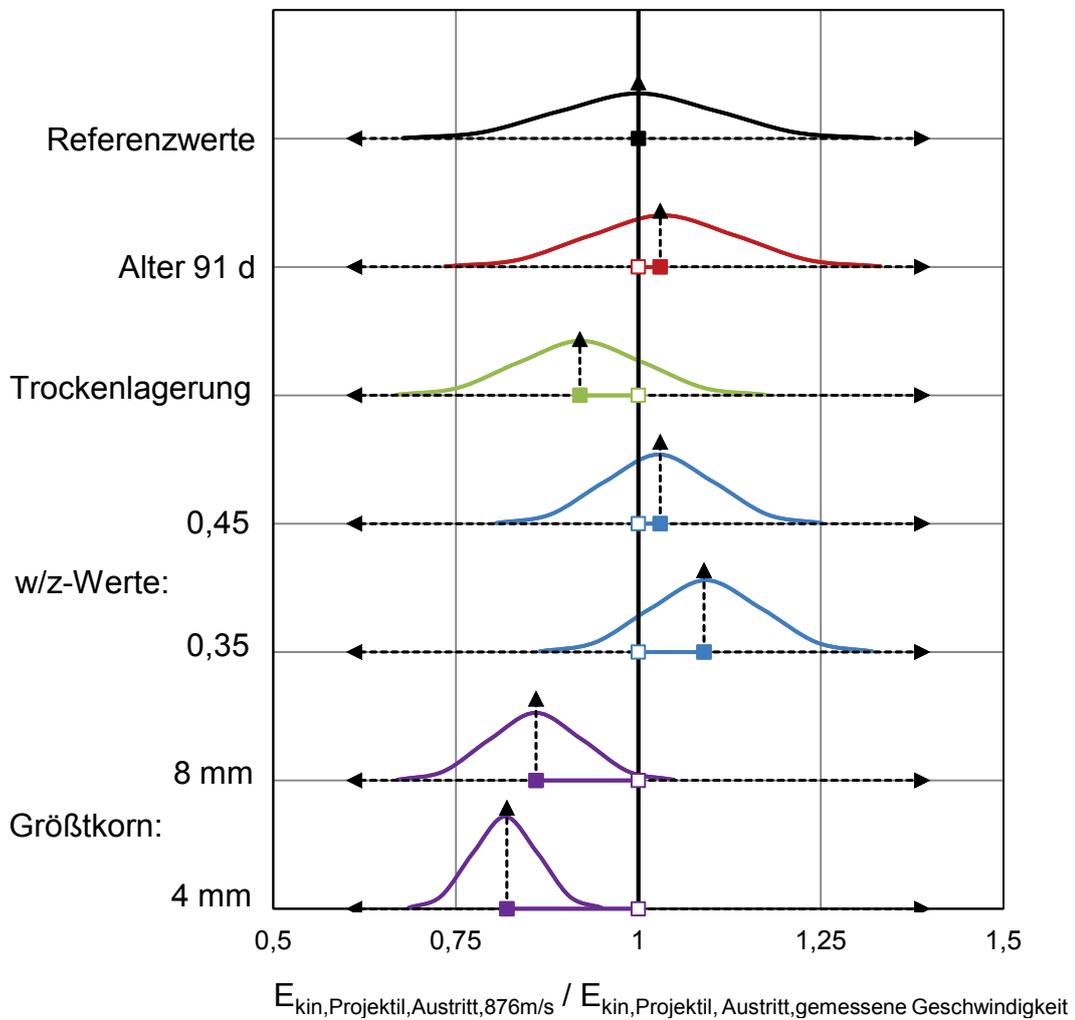


Abbildung 5.2.2: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Austrittsenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

5.2.3 Einfluss des Alters

Die Auswirkungen eines höheren Probenalters sind sehr gering. Diese Beobachtung aus Abschnitt 4.4.3 wird durch die Berücksichtigung der Eintrittsenergie noch verstärkt. Die Änderung des Probenalters im Bereich zwischen 28 d und 91 d führt zu einer Verringerung der Austrittsenergie um ca. 3,4 %. Ob im Alter über 91 d hinaus bei fortschreitender Nacherhärtung eine weitere Abnahme stattfindet, müssen weitere Untersuchungen klären.

Die lineare Regressionsanalyse zeigte für die Einzelwerte ein Bestimmtheitsmaß von $R_{EW}^2 = 0,146$ (sehr geringe Korrelation) und für die Mittelwerte von $R_{MW}^2 = 0,902$ (sehr hohe Korrelation). Die Regressionsgerade zeigt daher eher einen Trend als eine exakte Lösung. Die Normalverteilungen überlappen sich deutlich.

$$E_{\text{kin,Projektil,Austritt,w/z}} = 687 \cdot w/z + 1706 \quad \text{Gl. 5.3}$$

5.2.6 Einfluss des Größtkorndurchmessers

Die Austrittsenergien der Testreihen mit 8 mm bzw. 4 mm Größtkorndurchmesser betragen 2399 J bzw. 2511 J. Sie lagen damit deutlich über den Austrittsenergien des Referenzbetons bei gleicher Eintrittsgeschwindigkeit. Die Werte in Abbildung 5.2.4 wurden bezüglich ihrer Eintrittsenergie korrigiert und sind für die Referenzgeschwindigkeit von 876 m/s dargestellt.

Bisherige Ergebnisse haben gezeigt, dass mit größerem Größtkorndurchmesser der Beschusswiderstand wächst. Abbildung 5.2.4 zeigt den empirischen Zusammenhang der Austrittsenergie und des Größtkorndurchmessers. Die zugehörige Gleichung der linearen Regressionsanalyse mit d_{max} in [mm] lautet:

$$E_{\text{kin,Projektil,Austritt,GK}} = -39,7 \cdot d_{\text{max}} + 2746 \quad \text{Gl. 5.4}$$

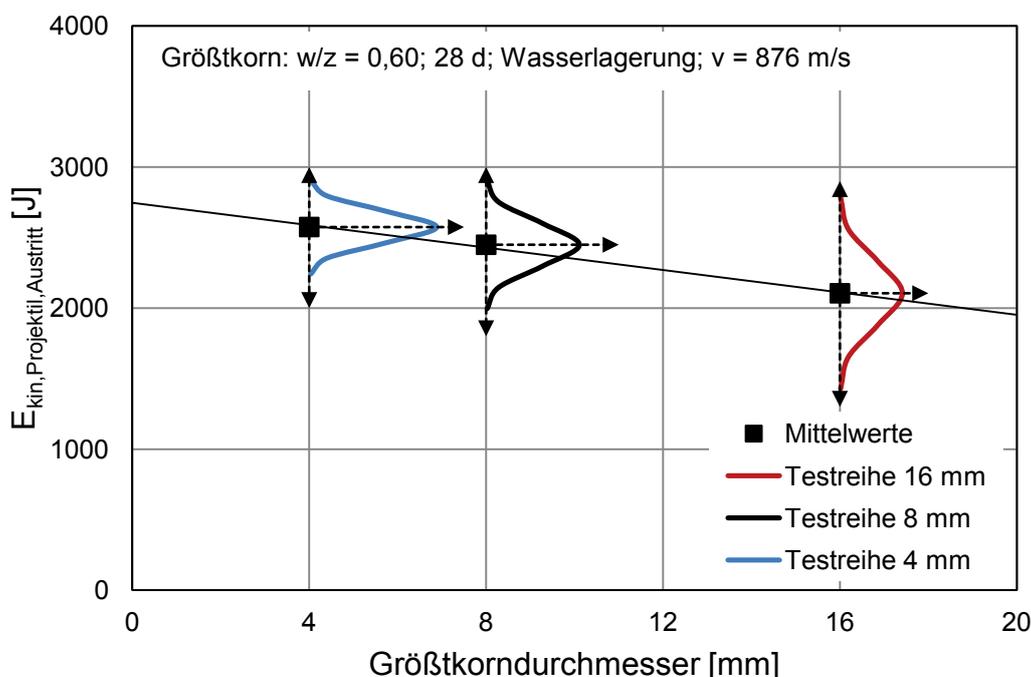


Abbildung 5.2.4: Zusammenhang zwischen Größtkorndurchmesser und Austrittsenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

Das Bestimmtheitsmaß der Einzelwerte beträgt $R_{EW}^2 = 0,596$ (mittlere Korrelation), das der Mittelwerte beträgt $R_{MW}^2 = 0,995$ (sehr hohe Korrelation). Die eigenen Ergebnisse bestätigen folglich die bekannten Ergebnisse und weisen daraufhin, dass ein beschusssicherer Beton mit einem möglichst großen Größtkorndurchmesser hergestellt werden sollte.

Gleichung 5.4 gilt auch näherungsweise für den Zementstein. Rechnerisch ergäbe sich hier eine Austrittsenergie von 2746 J; gemessen wurde im Mittel eine Austrittsenergie von 2946 J.

5.2.7 Zusammenfassung

Die ballistische Untersuchung hat gezeigt, dass vor allem von der Eintrittsenergie und dem Größtkorndurchmesser ein wesentlicher Einfluss auf die Austrittsenergie des Projektils ausgeht. Daneben zeigten sich auch Änderungen in Folge des w/z-Werts und der Lagerungsart. Das Probenalter hat dagegen keine signifikanten Auswirkungen auf die Austrittsenergie.

5.3 Verformungsenergie des Projektils

Die Verformungsenergie des Projektils konnte nicht näher bestimmt werden. Einerseits konnte augenscheinlich keine äußere Änderung der wiedergewonnenen Projektilteile festgestellt werden. Andererseits können weder plastische noch elastische Verformungen grundsätzlich ausgeschlossen werden. Die dabei notwendige Verformungsenergie wird als gering gegenüber den anderen Energieformen angenommen (vgl. Abschnitt 2).

5.4 Bruchenergie des Zielobjekts

5.4.1 Einführung

Die Bruchenergie $E_{V,T,Fragmente}$ ist das Produkt aus der spezifischen Bruchenergie $G_{F,3D}$ und der Gesamtbruchfläche A_{GB} und ist ein Parameter zur Beschreibung der Schädigung. Die spezifische Bruchenergie gilt als Materialkennwert, der von der Prüfgeschwindigkeit abhängt, vgl. Abschnitte 2 und 4.3. In Abschnitt 2 wurde gezeigt, dass vor allem bei dynamischen Belastungen die spezifische Bruchenergie deutlich ansteigt. Dieser Einfluss kann durch einen dynamischen Faktor k_{dyn} berücksichtigt

werden, der mit der spezifischen Bruchenergie $G_{F,3D,(stat)}$ aus den quasi-statischen Versuchen multipliziert wird. Es ergibt sich Gleichung 5.5.

$$E_{V,T,Fragmente} = k_{dyn} \cdot G_{F,3D,(stat)} \cdot A_{GB} \quad \text{Gl. 5.5}$$

Die absolute Größe von k_{dyn} ist für den hier untersuchten Geschwindigkeitsbereich nicht bekannt. Es kann aber angenommen werden, dass sich im Geschwindigkeitsbereich der meisten Testreihen (zwischen dem kleinsten und dem größten Einzelwert: 856 m/s und 882 m/s) keine signifikante Änderung einstellen wird. Daher wird der dynamische Faktor für diesen Geschwindigkeitsbereich als Konstante betrachtet und im Folgenden $k_{dyn,870}$ genannt.

Die Darstellungen in diesem Abschnitt können auf Grund der unbekannt absoluten Größe von k_{dyn} nicht die absolute Bruchenergie $E_{V,T,Fragmente}$ wiedergeben, sondern zeigen den Quotienten aus $E_{V,T,Fragmente}$ und $k_{dyn,870}$.

5.4.2 Einfluss der Eintrittsenergie

Der Geschwindigkeitsbereich der Testreihen mit unterschiedlichen Prüfgeschwindigkeiten erstreckt sich von 598 m/s bis 882 m/s. Hierfür kann kein konstanter Wert des dynamischen Faktors k_{dyn} angenommen werden. In Abbildung 5.4.1 ist die Eintrittsenergie und der Quotienten aus Bruchenergie und dynamischem Faktor $k_{dyn,870}$ dargestellt.

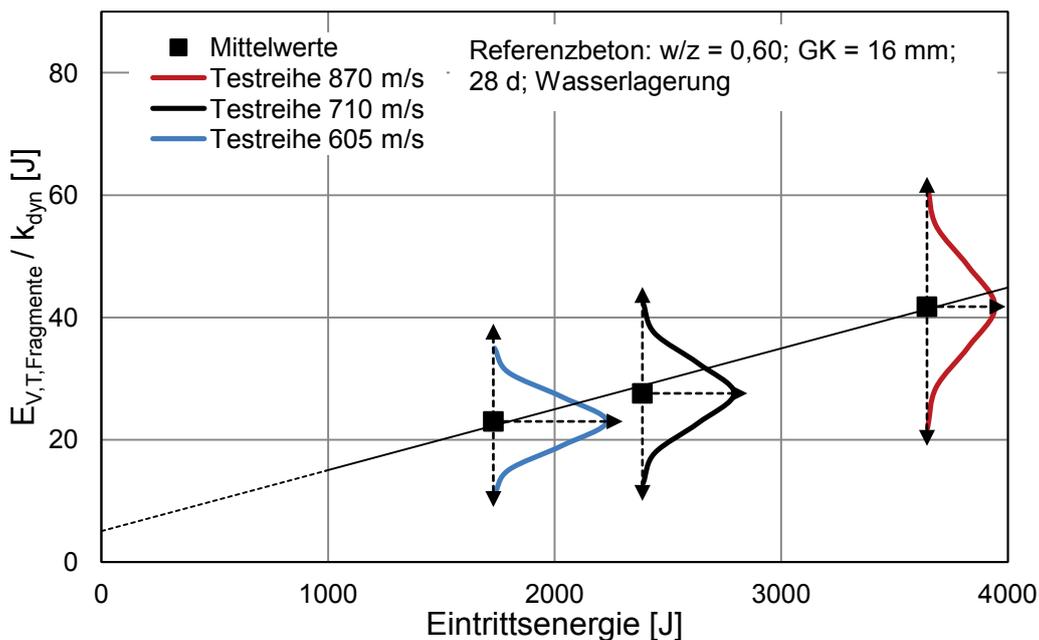


Abbildung 5.4.1: Zusammenhang zwischen Eintrittsenergie und Bruchenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

Die sich aus diesen Kennwerten ergebende lineare Regressionsgerade ist erst ab einer Eintrittsenergie von 990 J als durchgezogene Linie mit einer Steigung von 0,01 dargestellt. Diese Eintrittsenergie wurde in Abschnitt 5.2 als notwendige Perforationsenergie bestimmt, so dass ab dieser Eintrittsenergie in jedem Fall Bruchenergie umgesetzt wird. Für den Bereich zwischen 0 J und 990 J kann keine eindeutige Aussage getroffen werden. Die fortgeführte Regressionsgerade zeigt in diesem Bereich, dass ohne Eintrittsenergie Bruchenergie entsteht. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass erst Eintrittsenergie des Projektils notwendig ist, um Bruchenergie zu erhalten.

Die Regressionsgerade muss folglich korrigiert werden: Die Änderung des dynamischen Faktors der Referenzgeschwindigkeit $k_{\text{dyn},870}$ gegenüber dem der geringeren Geschwindigkeiten wird mit einem weiteren Korrekturfaktor $k_{\text{dyn},\text{kor}}$ beschrieben. Die Größe dieses Faktors kann aber erst dann ermittelt werden, wenn bekannt ist, ab welcher Eintrittsenergie Bruchenergie entsteht.

Der Zusammenhang zwischen der Eintrittsenergie und der Bruchenergie kann mit Gleichung 5.6 beschrieben werden, wenn die Eintrittsenergie größer als 990 J ist. Hierin beträgt $k_{\text{dyn},\text{kor}}$ für die Referenzgeschwindigkeit 1,0.

$$E_{V,T,\text{Fragmente}} = 0,01 \cdot k_{\text{dyn},870} \cdot k_{\text{dyn},\text{kor}} \cdot E_{\text{kin,Projektil, Eintritt}} \quad \text{Gl. 5.6}$$

Zur Korrektur der Schwankungen der Eintrittsenergie wird im nächsten Schritt Gleichung 5.6 mit $k_{\text{dyn},\text{kor}} = 1,0$ (siehe Abschnitt 5.4.1) genutzt, um die einzelnen Testreihen an die Referenzeintrittsenergie anzupassen. Daraus ergeben sich die in Abbildung 5.4.2 gezeigten Verhältnisse der erwarteten Bruchenergie der einzelnen Versuche infolge der Eintrittsenergie und der gemessenen Bruchenergie.

Zusätzlich sind die Normalverteilungen gezeigt, die sowohl die Streuungen der spezifischen Bruchenergie als auch die der Bruchfläche berücksichtigen. Die Abweichung eines Verhältnisses vom Referenzwert (1,0) stellt dabei die Auswirkung des jeweiligen Einflusses auf die Bruchenergie dar. Bei einem Verhältnis größer 1,0 sinkt die Bruchenergie ab, bei einem kleineren Verhältnis steigt sie an.

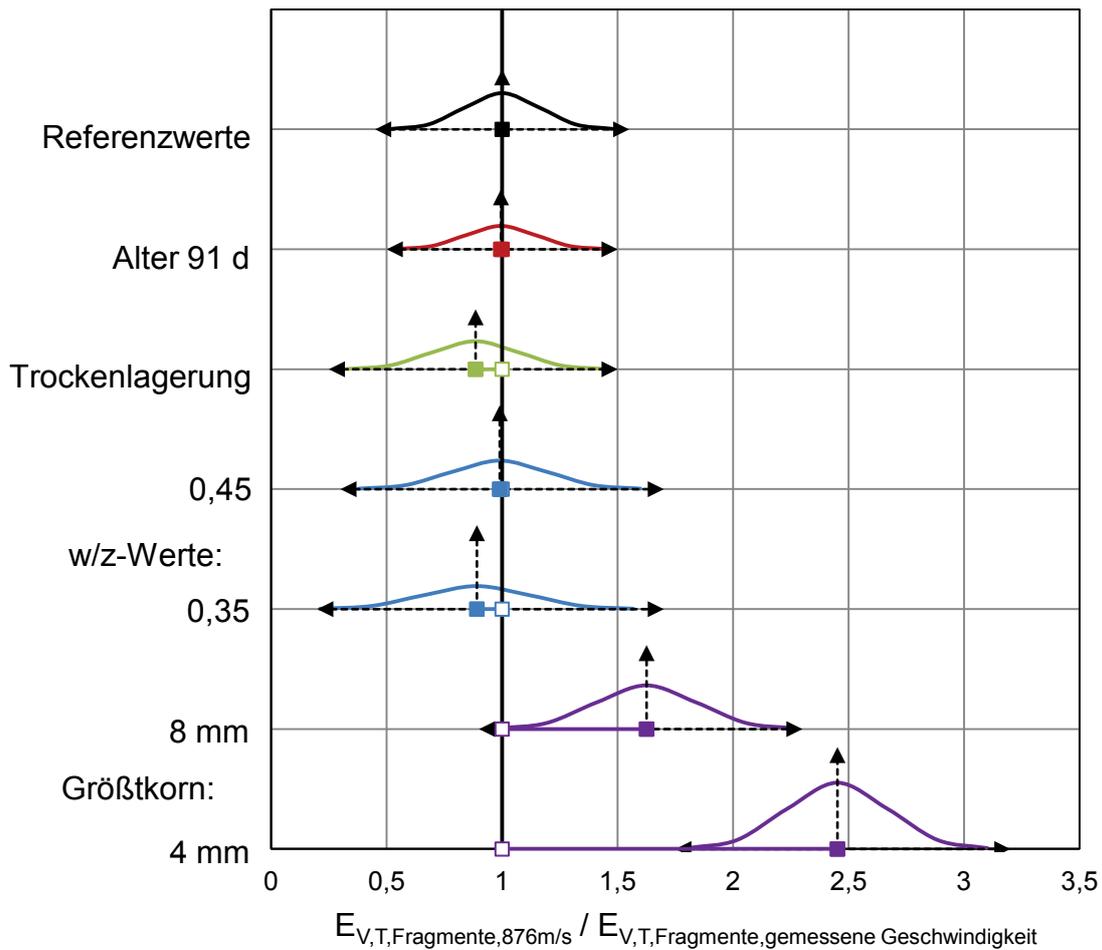


Abbildung 5.4.2: Gegenüberstellung der gemessenen und der berechneten Bruchenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

5.4.3 Einfluss des Alters

Die Auswirkungen eines höheren Probenalters auf die Bruchenergie sind sehr gering. Nach der Korrektur der Variationen der Eintrittsenergie beträgt der Unterschied zwischen den beiden Altersstufen weniger als 1 % bezogen auf das Referenzalter. Geringe Unterschiede wurden auch in der bruchmechanischen Untersuchung für die spezifische Bruchenergie und zwischen den entstandenen Bruchflächen festgestellt. Es kann folglich davon ausgegangen werden, dass ein höheres Probenalter, trotz deutlicher Nacherhärtung, keine Auswirkungen auf die Bruchenergie hat.

5.4.4 Einfluss der Lagerung

Eine Trockenlagerung der Probekörper hat zur Folge, dass mehr Bruchenergie freigesetzt wird. Durch die hohe spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ wird trotz geringerer Bruchfläche mehr Energie in Bruchenergie umgesetzt. Eine Berücksichtigung der Lagerung kann, wie bereits in Abschnitt 5.2 durchgeführt, mit dem Faktor 0,92 erfol-

gen. Der Unterschied zwischen dem Umrechnungsfaktor 0,92 und dem aus den Ergebnissen berechneten Wert 0,897 ist nicht signifikant (Signifikanzniveau $\alpha < 0,01$). Folglich gilt Gleichung 5.7:

$$E_{V,T,Fragmente,WL} = 0,92 \cdot E_{V,T,Fragmente,TL} \quad \text{Gl. 5.7}$$

5.4.5 Einfluss des w/z-Werts

Für Betone mit kleinem w/z-Wert wurde eine größere spezifische Bruchenergie ermittelt. Gleichzeitig wurde für solche Betone eine kleinere Bruchfläche festgestellt. Wie Abbildung 5.4.3 zeigt, steigt die Bruchenergie für kleinere w/z-Werte tendenziell an.

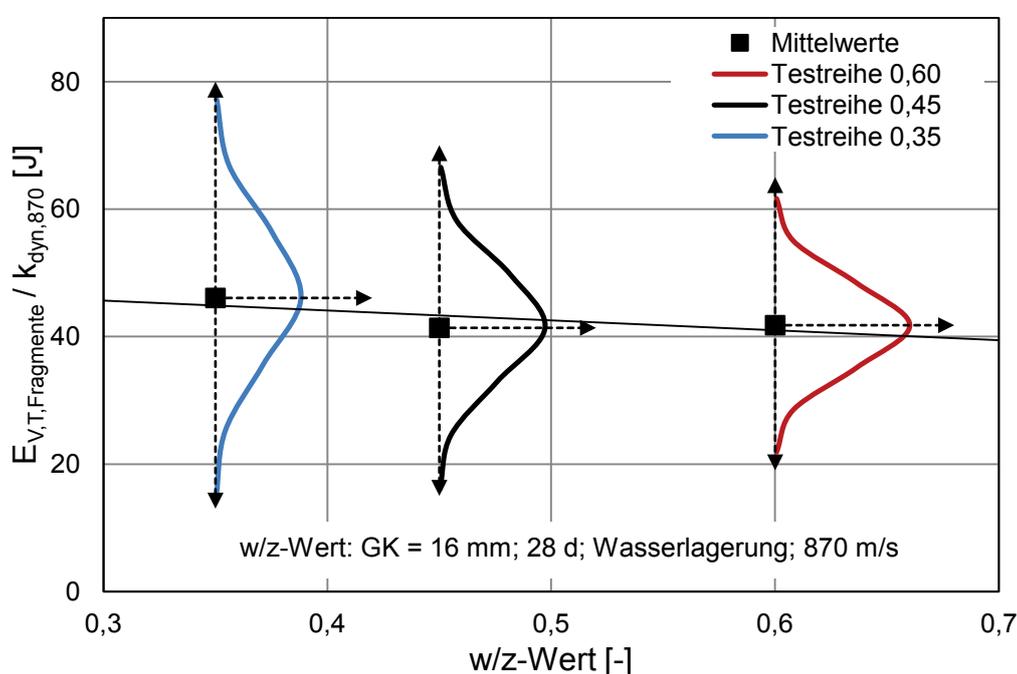


Abbildung 5.4.3: Zusammenhang zwischen w/z-Wert und Bruchenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

Bei der Betrachtung der Normalverteilungen der drei untersuchten w/z-Werte kann aber auch gesehen werden, dass sich alle Verteilungen deutlich überlappen. Dadurch kann keine eindeutige Beziehung zwischen dem w/z-Wert und der Bruchenergie abgeleitet werden. Das Bestimmtheitsmaß einer linearen Regressionsanalyse der Einzelwerte liefert einen Wert $R_{EW}^2 = 0,080$ (sehr geringe Korrelation), eine Analyse der Mittelwerte führt zu $R_{MW}^2 = 0,566$ (mittlere Korrelation). Die zugehörige Gleichung 5.8 lautet:

$$E_{V,T,Fragmente,w/z} / K_{dyn,870} = - 15,5 \cdot w/z + 50,3 \quad \text{Gl. 5.8}$$

5.4.6 Einfluss des Größtkorndurchmessers

Nach der Korrektur der Eintrittsgeschwindigkeit zeigt sich, dass bei einem größeren Größtkorndurchmesser mehr Bruchenergie freigesetzt wird. Obwohl Betone bzw. Mörtel mit kleinerem Größtkorn eine geringere spezifische Bruchenergie besitzen, entsteht weniger Bruchfläche in Folge der Projektilwirkung, vgl. Abschnitt 4.4.7. Abbildung 5.4.4 stellt einen linearen Zusammenhang zwischen dem Größtkorndurchmesser und der Bruchenergie dar. Die Regressionsanalyse führt zu einem Bestimmtheitsmaß der Einzelwerte von $R_{EW}^2 = 0,893$ (hohe Korrelation) bzw. der Mittelwerte von $R_{MW}^2 = 1$ (sehr hohe Korrelation). Die zugehörige Funktion ist in Gleichung 5.9 wiedergegeben.

$$E_{V,T,Fragmente,GK} / k_{dyn,870} = 2,08 \cdot d_{max} + 8,5 \quad \text{Gl. 5.9}$$

Gleichung 5.14 hat näherungsweise auch Gültigkeit für den Zementstein. Für diesen wurden im Mittel eine spezifische Bruchenergie von 23,9 N/m und eine durchschnittliche Gesamtbruchfläche von 4684 cm² ermittelt. Somit beträgt die gemessene Bruchenergie $E_{V,T,Fragmente} / k_{dyn,870} = 11,2$ J und ist geringfügig größer als die aus Gleichung 5.14 ermittelte Bruchenergie mit 8,5 J.

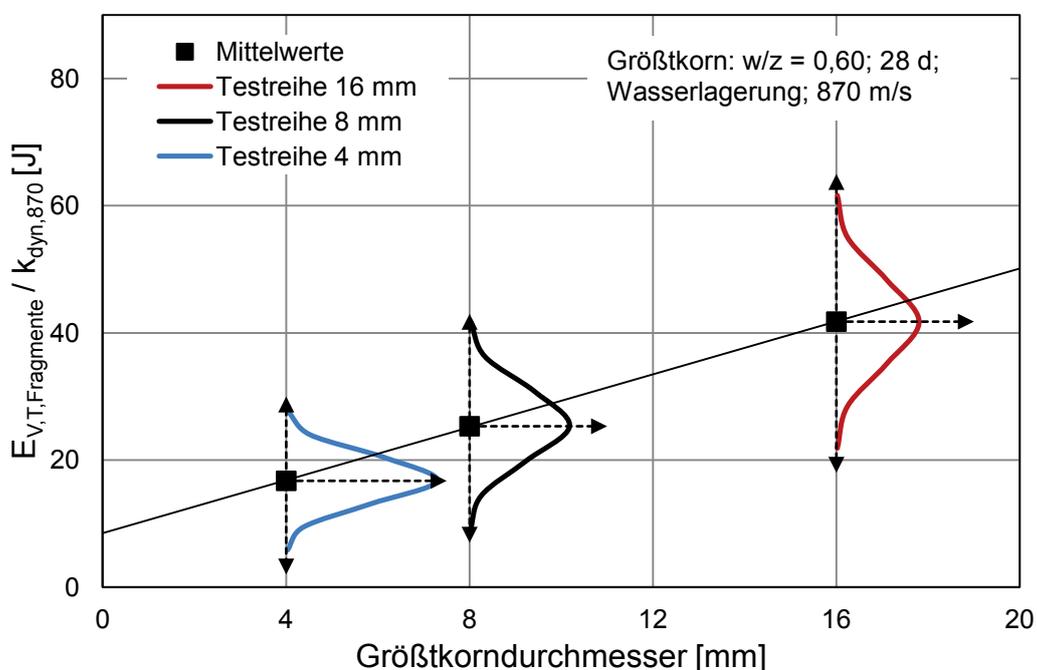


Abbildung 5.4.4: Zusammenhang zwischen Größtkorndurchmesser und Bruchenergie und Angabe der Normalverteilung der Testreihen

5.4.7 Zusammenfassung

Die Bruchenergie wird ähnlich wie die Austrittsenergie des Projektils wesentlich von der Eintrittsenergie und dem Größtkorndurchmesser beeinflusst. Auch Änderungen des w/z-Werts oder der Lagerungsart führen zu Auswirkungen auf die Bruchenergie. Dagegen zeigte sich keine Beeinflussung der Bruchenergie durch ein höheres Pro-bealter.

5.5 Kinetische Energie der Fragmente

5.5.1 Einführung

Die kinetische Energie der Fragmente $E_{\text{kin,Fragmente}}$ ergibt sich aus der Hälfte der Summe der einzelnen Fragmentmassen multipliziert mit der jeweiligen Fragmentgeschwindigkeit, Gleichung 5.10.

$$E_{\text{kin,Fragmente}} = 0,5 \cdot \sum_{i=1}^{i=n} (m_{\text{Fr},i} \cdot v_{\text{Fr},i}^2) \quad \text{Gl. 5.10}$$

Während die Massen der Fragmente und ihre Anzahl durch die Fragmentuntersuchung bestimmt werden konnten, fehlen zur Fragmentgeschwindigkeit bisher messtechnische Untersuchungsmöglichkeiten. Mangels dieser Untersuchungsmöglichkeiten können keine aussagekräftigen Beziehungen zwischen den jeweiligen Einflüssen und der kinetischen Energie der Fragmente ermittelt werden.

Im Folgenden wird zur Abschätzung der kinetischen Energie der Fragmente der dynamische Faktor der Bruchenergie mit $k_{\text{dyn},870} = 6$ angenommen. Diese Vergrößerung der Bruchenergie geben Weerheijm et al. in [120, 122 und 123] für Belastungsgeschwindigkeiten um 1000 GPa/s an, siehe Abschnitt 2.1.5. Damit kann die Bruchenergie berechnet werden und aus dem Energiegleichgewicht auf die kinetische Energie der Fragmente geschlossen werden, Gleichung 5.11. Es wird weiterhin die Annahme getroffen, dass andere Energieformen verhältnismäßig gering sind und vernachlässigt werden können.

$$E_{\text{kin,Fragmente}} = E_{\text{kin,Projektil, Eintritt}} - (E_{\text{V,T,Fragmente}} + E_{\text{kin,Projektil, Austritt}}) \quad \text{Gl. 5.11}$$

5.5.2 Einfluss der Eintrittsenergie

Mit Hilfe von Gleichung 5.11 kann eine Abschätzung der Größe der kinetischen Energie der Fragmente bei unterschiedlichen Eintrittsgeschwindigkeiten gegeben werden. Dieser Berechnung liegen drei Annahmen zu Grunde:

- Die Vergrößerung der spezifischen Bruchenergie in Folge der dynamischen Belastung wird zu $k_{\text{dyn},870} = 6$ angenommen.
- Die Vergrößerung der spezifischen Bruchenergie zwischen der minimalen und maximalen Prüfgeschwindigkeit dieser Arbeit ist konstant ($k_{\text{dyn},\text{kor}} = 1$).
- Es werden nur die Eintritts- und Austrittsenergie des Projektils und die Bruchenergie des Betons berücksichtigt; alle weiteren Energieformen werden vernachlässigt.

Unter diesen Voraussetzungen ergeben sich kinetische Energie der Fragmente zwischen 1007 J für die minimale Geschwindigkeit in dieser Arbeit bis zu 1287 J für die maximale Geschwindigkeit. Mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit nimmt die kinetische Energie der Fragmente zu, siehe Abbildung 5.5.1.

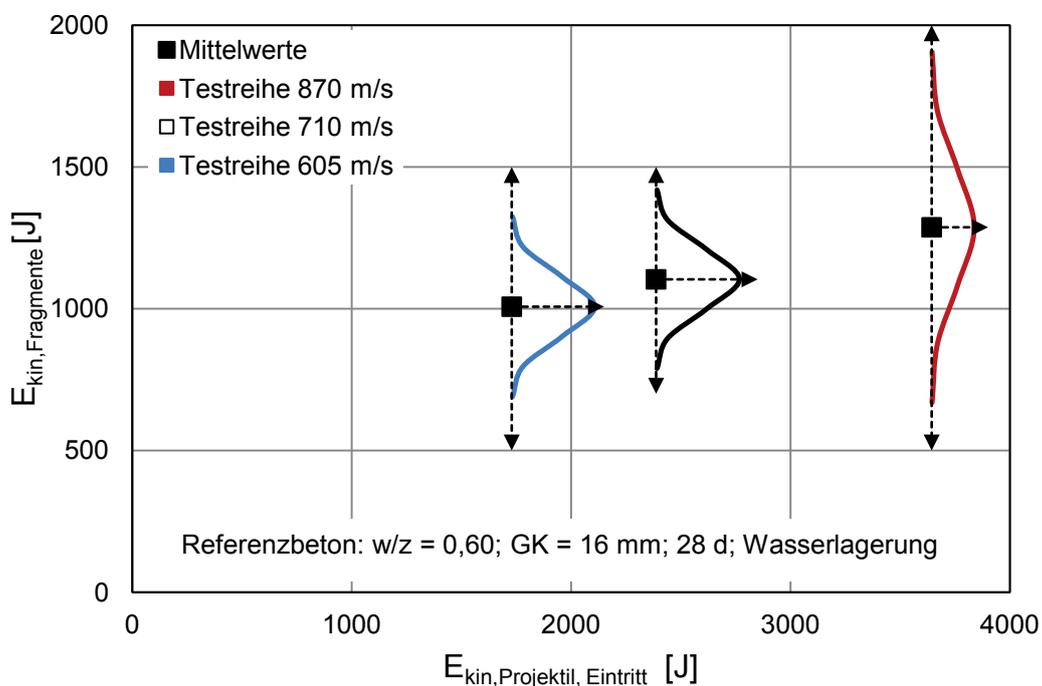


Abbildung 5.5.1: Zusammenhang zwischen Eintrittsenergie und kinetischer Energie der Fragmente und Angabe der Normalverteilung der Testreihen (Annahme: Spezifische Bruchenergie vergrößert sich in Folge der dynamischen Belastung, $k_{\text{dyn},870} = 6$, $k_{\text{dyn},\text{kor}} = 1$)

5.5.3 Einfluss des Alters

Die bisherigen Betrachtungen zwischen einzelnen Energieformen und dem untersuchten Probenalter zeigen keine bzw. sehr geringe Auswirkungen des Alters. Nach Gleichung 5.11 ergibt sich in Folge des Alters mit den getroffenen Annahmen eine geringe Erhöhung der kinetischen Energie der Fragmente um 4%.

5.5.4 Einfluss der Lagerung

Die Austrittsenergie und die Bruchenergie steigen durch die Änderung der Wasserlagerung zur Trockenlagerung der Probekörper an. Die mit Hilfe von Gleichung 5.11 bestimmte kinetische Energie der Fragmente sinkt von 1287 J bei Wasserlagerung auf 1070 J bei Trockenlagerung ab. Dies entspricht einer Abnahme um ca. 17 %.

5.5.5 Einfluss des w/z-Werts

Zwischen den unterschiedlichen Energieformen und den w/z-Werten konnten nur Tendenzen ermittelt werden. Demnach steigt die Austrittsenergie geringfügig an, während die Bruchenergie im gleichen relativen Maße sinkt. In Abbildung 5.5.2 ist gezeigt, dass die kinetische Energie der Fragmente mit kleiner werdenden w/z-Werten steigt. Für die Berechnung wurde wieder Gleichung 5.11 genutzt und die oben angegebenen Annahmen zu Grunde gelegt.

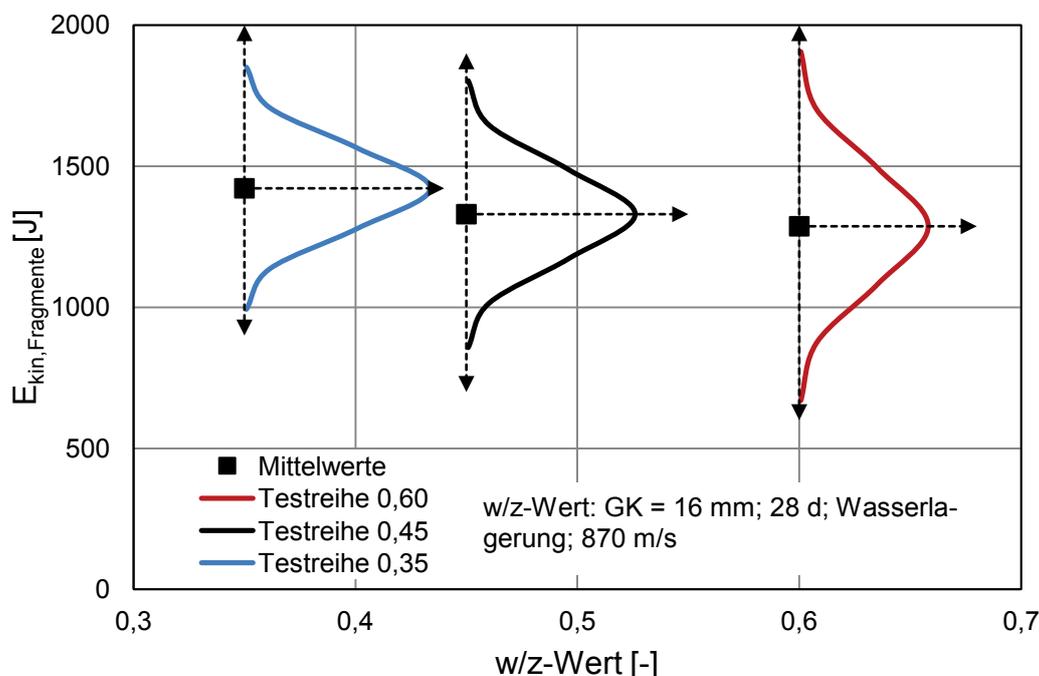


Abbildung 5.5.2: Zusammenhang zwischen w/z-Wert und kinetischer Energie der Fragmente und Angabe der Normalverteilung der Testreihen (Annahme: Spezifische Bruchenergie vergrößert sich in Folge der dynamischen Belastung, $k_{\text{dyn},870} = 6$, $k_{\text{dyn},\text{kor}} = 1$)

5.5.6 Einfluss des Größtkorndurchmessers

Neben der Prüfgeschwindigkeit konnten für den Größtkorndurchmesser bisher die eindeutigsten Beziehungen zu den unterschiedlichen Energieformen hergestellt werden. Dabei zeigte sich mit größerem Größtkorndurchmesser eine geringere Austrittsenergie und eine größere Bruchenergie.

In Abbildung 5.5.3 sind die kinetischen Energien der Fragmente für Betone mit unterschiedlichem Größtkorndurchmesser gezeigt. Demnach führen größere Größtkorndurchmesser zu einer höheren kinetischen Energie der Fragmente.

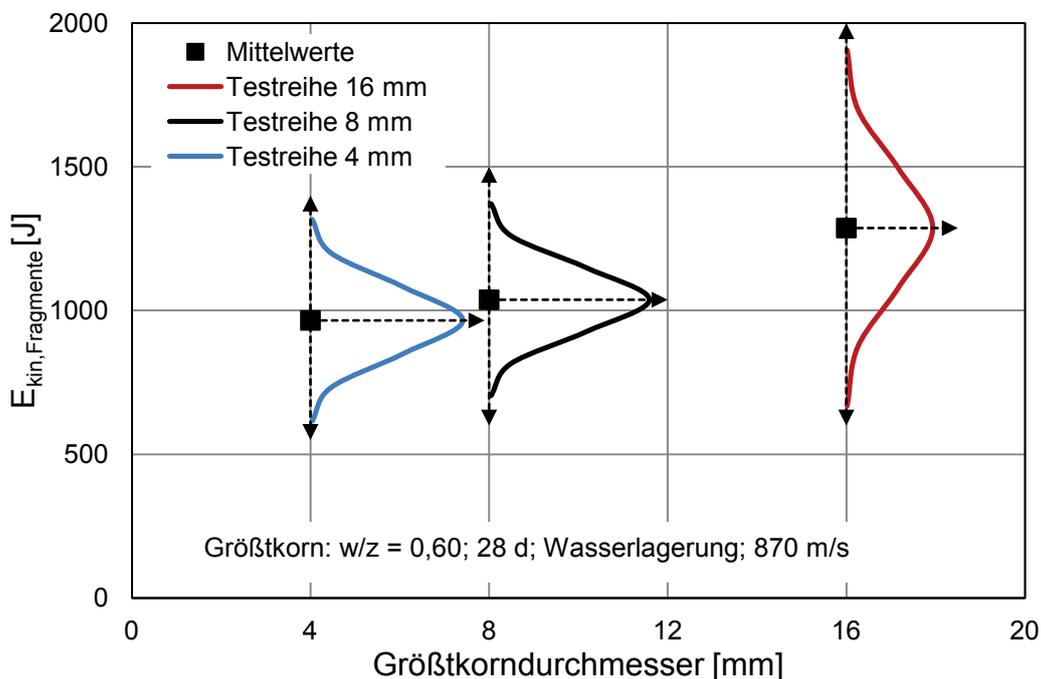


Abbildung 5.5.3: Zusammenhang zwischen Größtkorndurchmesser und kinetischer Energie der Fragmente und Angabe der Normalverteilung der Testreihen (Annahme: Spezifische Bruchenergie vergrößert sich in Folge der dynamischen Belastung, $k_{dyn,870} = 6$, $k_{dyn,kor} = 1$)

5.5.7 Zusammenfassung

Auf Grund der fehlenden Fragmentgeschwindigkeiten können keine exakten Beziehungen zwischen der kinetischen Energie der Fragmente und einzelnen Einflüssen hergestellt werden. In diesem Abschnitt wurde aber die Annahme getroffen, dass die spezifische Bruchenergie durch die dynamische Belastung um das sechsfache ansteigt. Mit dieser Annahme konnte eine Abschätzung der kinetischen Energie der Fragmente für die einzelnen Einflüsse erfolgen.

5.6 Zusammenfassung des Materialverhaltens

In diesem Abschnitt wurden Zusammenhänge zwischen einzelnen Energieformen und den in dieser Arbeit untersuchten Einflüssen dargestellt. Die einzelnen Energieformen stehen nach Dinovitzer et al. [42] im Gleichgewicht zueinander.

Eine entscheidende Energieform zur Beurteilung des Beschusswiderstandes ist die Austrittsenergie des Projektils. Ihre Abhängigkeit von der Eintrittsenergie, des Alters, der Lagerungsart, des w/z -Werts und des Größtkorndurchmessers wurde gezeigt.

Die Verformungsenergie des Projektils konnte nicht bestimmt werden und wurde auf Basis der visuellen Beobachtungen als gering gegenüber den anderen Energieformen angenommen.

Die Bruchenergie entsteht durch die Aufnahme der Eintrittsenergie des Projektils durch den Probekörper. Sie sorgt dafür, dass Bruchflächen entstehen und wird bestimmt durch die spezifische Bruchenergie und die Gesamtbruchfläche. Es entstehen Fragmente in unterschiedlicher Größe. In Abschnitt 5.4 wurden verschiedene Beziehungen zwischen der Bruchenergie und einzelnen Einflüssen gefunden.

Die kinetische Energie der Fragmente kann durch die fehlende Fragmentgeschwindigkeit bisher nicht angegeben werden. Eine Abschätzung für eine mögliche Entwicklung der kinetischen Energie durch einzelne Einflüsse wurden im vorherigen Abschnitt präsentiert.

6 Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung

Die Untersuchung von Beton unter dynamischen Belastungen stellt immer noch ein Spezialgebiet in der Forschung dar. Insbesondere die lokale dynamische Belastung durch Projektileinwirkung ist bisher nur wenig detailliert betrachtet worden. Diese Arbeit soll dazu beitragen, eine Grundlage für ein ausführliches Verständnis des Betonverhaltens unter Beschuss zu schaffen.

Der dieser Arbeit zugrunde liegende Ansatz verfolgt eine energetische Bilanzierung. Es wurden unterschiedliche Energieformen betrachtet, die sich durch die Beschussbelastung ergeben. Zu diesen gehören im Besonderen die kinetische Energie des Projektils und die Bruchenergie des Zielobjekts. Dieser Ansatz geht zurück auf eine Arbeit von Dinovitzer et al. [42]. Zur Ermittlung der unterschiedlichen Energieformen wurden bruchmechanische, ballistische und oberflächenanalytische Methoden verwendet. Dabei wurden unterschiedliche Betonzusammensetzungen und weitere bekannte Einflüsse auf das Betonverhalten in Zusammenhang mit der Projektileinwirkung gebracht. Das Untersuchungsprogramm umfasste Änderungen des Größtkorndurchmessers und des w/z-Werts sowie die Variationen der Prüfgeschwindigkeit, des Probenalters und der Probenlagerung.

Bruchmechanische Untersuchungen werden genutzt, um das Rissverhalten und den Bruch ursprünglich ganzer Probekörper zu beschreiben. Durch die ausgeprägte Bruchprozesszone vor dem Trennriss kann die Beschreibung nur mit nicht-linearen Modellen der Bruchmechanik wie dem fiktiven Rissmodell von Hillerborg [64] erfolgen. Hillerborg geht dabei davon aus, dass Energie zur Erzeugung von Oberflächen notwendig ist und führt die spezifische Bruchenergie als Parameter ein. Die spezifische Bruchenergie ist definiert als die notwendige Energie pro Einheitsfläche, um zwei Oberflächen zu erzeugen. Zur Ermittlung dieses Parameters wurde in dieser Arbeit ein 3-Punkt-Biegezugversuch an gekerbten Balken unter Berücksichtigung einer Empfehlung von RILEM [102] verwendet.

Die Auswertung der Literatur zeigt, dass einerseits eine Vielzahl von Einflüssen auf das bruchmechanische Verhalten von Beton bereits untersucht wurde; andererseits

sind Beschreibungen der Bruchflächen nur in begrenztem Umfang vorhanden, so dass in dieser Arbeit darauf ein Schwerpunkt gelegt wurde.

Die eigenen bruchmechanischen Versuche bestätigen zum großen Teil die bestehenden Erkenntnisse zwischen einzelnen Betoneinflüssen und der spezifischen Bruchenergie. Einzig der erwartete Anstieg der spezifischen Bruchenergie in Folge eines höheren Probenalters wurde in dieser Arbeit nicht bekräftigt: Die spezifische Bruchenergie ändert sich nicht durch ein höheres Probenalter.

Die Größe der Bruchfläche – und damit die der minimalen Rauheit und der fraktalen Dimension – ist entscheidend von der Rissverzahnung und der Biegezugfestigkeit des Betons bestimmt. Diese Kennwerte ändern sich wiederum mit den unterschiedlichen Einflussgrößen. Eine größere Rissverzahnung zeigt sich in einer größeren maximalen Durchbiegung; Kräfte werden länger zwischen den Rissufern übertragen. In diesem Fall steigt die Bruchfläche an, da weniger Gesteinskörner gebrochen wurden und der Riss um einzelne Gesteinskörner verläuft. Ein Anstieg der Biegezugfestigkeit führte zu einer größeren Anzahl gebrochener Gesteinskörner auf Grund der sich angleichenden Festigkeiten von Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung. Der Riss geht auf direktem Weg durch den Probekörper. Die Bruchflächen wirken hier weniger stark zerklüftet und sind kleiner.

Durch die Aufnahme der Bruchflächen konnte die bisherige Betrachtung der spezifischen Bruchenergie – unter Berücksichtigung der zweidimensionalen Querschnittsfläche – um die Rauheit der entstandenen Bruchflächen erweitert werden und somit auf die dreidimensionale Bruchfläche bezogen werden. Der Vorteil dieser Erweiterung liegt in einer präziseren Annäherung des Parameters an seine Definition. Zusätzlich wurde dadurch die Streuung des Parameters geringfügig verkleinert. Der Variationskoeffizient änderte sich beim Referenzbeton von 14,3 % auf 13,4 %.

Die Berücksichtigung des größenabhängigen Kennwerts „Rauheit“ wurde auch dadurch ermöglicht, dass als weiterer oberflächenanalytischer Kennwert die fraktale Dimension mit einer modifizierten Grid Scaling Method bestimmt wurde. Dieser Kennwert bestätigte die Veränderung der Bruchfläche in Folge eines Einflusses bzw. einer geänderten Betonzusammensetzung ohne selbst durch das Messsystem bzw. Messraster beeinflusst zu sein.

Die Ballistik untersucht u. a. das Verhalten von Zielobjekten beim Auftreffen eines Projektils. Die anerkannte Theorie zur Belastung durch Beschuss geht von der Initiierung einer Druckwelle beim Auftreffen des Projektils auf das Zielobjekt aus. Die kinetische Energie des Projektils wird dabei teilweise in andere Energieformen überführt. Es entstehen daraus unterschiedliche Schädigungen des Probekörpers wie Abplatzungen oder Fragmente. Diese Vorstellung wurde genutzt, um verschiedenste empirische, analytische oder numerische Modelle zur Beschreibung ballistischer Vorgänge zu entwickeln. Im Allgemeinen sind diese Modelle so aufgebaut, dass ein Kennwert der Schädigung als eine Funktion von Kennwerten der Einwirkung und des Zielmaterials dargestellt wird.

Schädigungskennwerte sind sehr unterschiedlich definiert. Oftmals wird die Eindringtiefe oder die Größe idealisierter Ausbruchkratervolumina an der Vorder- und Rückseite angegeben. Beispiele für Kennwerte der Einwirkung sind die Projektilgröße, die -form oder die -masse. Das Zielmaterial wird in der Regel nur durch die Festigkeit als Materialcharakteristikum berücksichtigt. Dabei gilt, dass sich mit zunehmender Festigkeit der Beschusswiderstand erhöht. Bisherige Untersuchungen zum Betonverhalten unter Beschuss konzentrieren sich folglich auf Sonderbetone mit hohen Festigkeiten. Einflüsse, die zur Änderung der Festigkeit führen können, wurden hinsichtlich des Betonverhaltens unter Beschuss nur in geringem Umfang erforscht. Daher fehlen größtenteils Zusammenhänge zwischen Einflüssen wie dem Betonalter oder der Betonzusammensetzung und einem Beschusswiderstand.

Die Literaturlauswertung zeigt außerdem, dass die entstehenden Fragmente bzw. Partikel und ihre Ausbreitung als nicht erforscht gelten können. Ein Schwerpunkt dieser Arbeit wurde folglich in die Entwicklung eines Schädigungskriteriums gelegt, das diese Fragmente berücksichtigt. Die Beurteilung der Fragmente muss ihre unterschiedlichen Formen und Größen einbeziehen.

Die ballistischen Untersuchungen dieser Arbeit wurden im Labor des Instituts für Ballistik, Waffen und Munition durchgeführt. Dazu wurden 5 cm-dicke, quadratische Betonplatten (Kantenlänge: 30 cm) mit Hartkerngeschossen aus einer Messwaffe mittig beschossen. Der Aufbau garantierte eine gleichbleibende Belastung der Zielobjekte. Die kinetische Energie der Projektile wurde mit Lichtschranken und doppeltbelichteten Fotos bestimmt. Nach dem Beschuss wurde die Gesamtbruchfläche mit Hilfe verschiedener Verfahren (Laserscanner, Bildauswerteverfahren, fotografisches

Verfahren, Scannerverfahren) ermittelt. Ziel war die Bestimmung der Bruchenergie des Zielobjekts als Produkt aus Gesamtbruchfläche und spezifischer Bruchenergie.

Die Fragmente wurden gesammelt und mit Hilfe des automatischen Bildauswerteverfahrens CPA analysiert. Dieses Verfahren ist einsetzbar, um sowohl Größenkennwerte als auch Formkennwerte zu ermitteln. Als ein geeigneter Kennwert zur Größenklassifizierung von Fragmenten wurde der Feretdurchmesser genutzt; die Zirkularität beschreibt in dieser Arbeit die Fragmentform. Aus den Kennwerten wurde ein idealisiertes Fragmentmodell abgeleitet, das auf der Grundform eines Ellipsoiden basiert. Gegenüber anderen Grundformen bietet es den Vorteil, dass in diesem Modell neben direkten Abmessungen das Volumen der Fragmente berücksichtigt werden kann.

Die Kraterflächen wurden mit einem 3D-Laserscanner vermessen. Weitere eingesetzte Verfahren sind das fotografische Verfahren zur Ermittlung der Oberflächen vor dem Beschuss und das Scannerverfahren zur Vermessung größerer Fragmente.

Die Gesamtbruchfläche eines Probekörpers aus der ballistischen Untersuchung hängt entscheidend von der Bruchfläche der Fragmente ab, die zwischen 90 und 95 % der Gesamtbruchfläche bilden. Für die Größe der Gesamtbruchfläche ist folglich entscheidend, wie diese Fragmente größenmäßig verteilt sind und wie groß der Wirkungsbereich der Energie (geschädigter Bereich des Probekörpers) ist. Für die Gesamtbruchfläche wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- In Folge eines größeren Probenalters ändert sich die Gesamtbruchfläche wie auch die Partikeloberfläche nur geringfügig, obwohl die Masse der Fragmente deutlich zunimmt. Ein Grund in der Massenzunahme kann in der gröberen Partikelverteilung gesehen werden. Diese gröbere Verteilung entsteht durch den Nacherhärtungsprozess des Zementsteins. Die dadurch dichtere Zementsteinmatrix leitet die absorbierte Energie in größere Bereiche um den Einschlagort. In einer weniger dichten Matrix kann Energie häufiger an Fehlstellen wie Poren reflektiert werden.
- Probekörper, die an Luft gelagert wurden, zeigen durch ihre Porenfüllung geringere Wirkungsbereiche. Die Bruchflächen dieser Probekörper sind deutlich geringer als diejenigen der im Wasser gelagerten Proben. An luftgefüllten Kapillarporen kann Energie häufiger reflektiert werden und seltener über eine Kapillarpore hinweg geleitet werden. Ein ähnlicher Effekt ist am Ende eines

Probekörpers bei der Reflexion der Druckwelle erkennbar, vgl. Eibl [46] (siehe Abschnitt 2.2.2.1).

- Erwartungsgemäß wird durch eine Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit die Gesamtbruchfläche größer. Auffällig ist dabei, dass sich die Wirkungsbereiche der geringeren Geschwindigkeiten nur minimal unterscheiden, bei der höchsten Geschwindigkeit aber ein deutlich größerer Wirkungsbereich gemessen wurde. Hingegen ist die Größenverteilung der Partikel für die kleinste untersuchte Geschwindigkeit deutlich gröber als für die höheren Geschwindigkeiten. Daraus kann geschlossen werden: Es gibt einen minimalen Wirkungsbereich, der unabhängig von der Größe der eingebrachten Energie entsteht. Die Größe des Wirkungsbereichs ändert sich zunächst nicht, daher führt die Erhöhung der zugeführten Energie durch eine höhere Geschwindigkeit zu feiner verteilten Fragmenten. Sobald dann ein Maximum der Verfeinerung der Fragmentverteilung erreicht ist, wird bei einer weiteren Erhöhung der Energiezufuhr der Wirkungsbereich größer.
- Betone mit kleinerem w/z -Wert besitzen größere Wirkungsbereiche der Energie als Betone mit großem w/z -Wert. Die entstehenden Fragmente sind aber deutlich gröber verteilt, d. h. es entstehen mehr große und weniger feine Fragmente. Insgesamt sinkt die Fragmentanzahl, so dass die Gesamtbruchfläche dieser Betone kleiner wird. Der größere Wirkungsbereich der Druckwelle kann durch die dichtere Matrix und das fehlende bzw. gering ausgeprägte Kapillarporensystem erklärt werden. Dadurch wird die Druckwelle weniger oft reflektiert bzw. abgelenkt und kann die notwendige Bruchenergie über längere Strecken transportieren. Größere Partikel entstehen dabei durch die steigende spezifische Bruchenergie $G_{F,3D}$ mit sinkendem w/z -Wert. Aus der größeren spezifischen Bruchenergie folgt, dass mehr Energie zur Verfügung stehen muss, um die gleiche Bruchfläche zu erhalten. Eine weitere Zerteilung eines Partikels erfolgt nicht, wenn die zur Verfügung stehende Energie nicht groß genug ist.
- Bei Betonen mit gleichem Größtkorndurchmesser wurde ein Zusammenhang zwischen der spezifischen Bruchenergie und der Gesamtbruchfläche ermittelt: Betone mit größerer spezifischer Bruchenergie haben eine kleinere Gesamtbruchfläche infolge des Beschusses.

- Sinkende Größtkorndurchmesser der Betone führen zu kleineren Wirkungsbereichen der Druckwelle. Die Größe der Fragmente ist unabhängig vom Größtkorndurchmesser gleichermaßen fein verteilt. Die kleineren Wirkungsbereiche entstehen dadurch, dass die Druckwelle bei Betonen mit kleinerem Korn öfter verschiedene Komponenten (Korn / Zementsteinmatrix) mit unterschiedlichem energetischem Potenzial durchläuft. An jeder Grenzfläche von einer Komponente zur anderen wird die Welle durch Reflexionen abgeschwächt. Zusätzlich steigt der Anteil der Kontaktzone mit abnehmendem Korndurchmesser, so dass von mehr Fehl- und Schwachstellen ausgegangen werden kann. Weitere Grenzflächen (z. B.: Luftpore / Zementsteinmatrix) sind vorhanden und beeinflussen die Ausbreitung der Druckwelle. Besonders bei der Mörtelmischung ist schon im Frischbetonzustand ein hoher Luftporenanteil festgestellt worden.
- Ein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Gesamtbruchfläche kann nicht festgestellt werden.

Die berechnete Energiedifferenz aus den kinetischen Energien des Projektils vor und nach der Perforation wurde teilweise ebenso deutlich von den untersuchten Betoninflüssen wie die Gesamtbruchflächen verändert. Zusammenfassend ergeben sich folgende Feststellungen für die Energiedifferenz:

- Ältere Probekörper weisen trotz deutlicher Nacherhärtung (Druckfestigkeit > 22 % gegenüber der Referenzdruckfestigkeit) nur eine minimal größere Energiedifferenz auf. Bereits Kustermann et al. [76] stellten fest, dass keine Auswirkungen des Alters zwischen 56 d und 90 d auf den Beschusswiderstand gemessen werden können.
- Probekörper nehmen in den Fällen mehr Energie auf, in denen auch der dynamische Elastizitätsmodul der Probekörper größer wird. Der dynamische Elastizitätsmodul vereinigt die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und die Dichte eines Probekörpers. Betone mit höherer Wellenausbreitungsgeschwindigkeit und höherer Dichte sind: Betone mit wassergefüllten Poren, Betone mit kleinerem w/z-Wert und Betone mit größerem Größtkorndurchmesser.
- Erwartungsgemäß steigt die Energiedifferenz mit zunehmender Prüfgeschwindigkeit an. Dadurch, dass mehr Energie zur Verfügung steht, kann auch mehr Energie absorbiert werden.

- Ein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Energiedifferenz kann nicht festgestellt werden.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Druckfestigkeit als einziger Materialkennwert dessen Verhalten unter Beschuss nicht ausreichend ausdrückt. Einflüsse, die die Druckfestigkeit verändern, bewirken nicht zwangsläufig eine größere Energieabsorption. Des Weiteren gibt es Betone mit gleicher Druckfestigkeit, die aber unterschiedlich viel Energie absorbieren bzw. unterschiedlich geschädigt werden.

Infolge dessen wurde eine Energiebilanz zur Beschreibung des Belastungsfalls Beschuss aufgestellt, die einerseits die Belastung durch das Projektil als kinetische Energie berücksichtigt und andererseits die Schädigung des Probekörpers als Bruchenergie beinhaltet. Folgende Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflüssen und diesen Energieformen wurden ermittelt:

- Mit steigender Eintrittsenergie des Projektils steigt die Austrittsenergie an. Hierbei konnte die notwendige Eintrittsgeschwindigkeit des genutzten Projektils zur Perforation eines 5 cm-dicken Probekörpers des Referenzbetons zu ca. 455 m/s ermittelt werden. Bei geringeren Geschwindigkeiten sollte das verwendete Projektil den Probekörper nicht perforieren.
- Wesentliche Auswirkungen des Alters auf die Austritts- und Bruchenergie konnten nicht gefunden werden.
- Der bekannte Umrechnungsfaktor 0,92 zur Berücksichtigung der Lagerungsbedingungen nach DIN 1045 bei der Berechnung der Druckfestigkeit kann auch für die Berechnung der Austritts- und Bruchenergie genutzt werden.
- Mit steigendem w/z -Wert steigt tendenziell die Austrittsenergie und sinkt die Bruchenergie. Für diesen Einfluss sind auf Grund der Streuungen der Ergebnisse keine eindeutigen Zusammenhänge zu den Energieformen herstellbar.
- Im Gegensatz dazu, ist der Zusammenhang zwischen Austritts- und Bruchenergie einerseits und dem Größtkorndurchmesser andererseits eindeutig. Je größer der maximale Korndurchmesser ist, desto kleiner wird die Austrittsenergie. Die Bruchenergie steigt durch einen größeren maximalen Korndurchmesser. Beide Zusammenhänge sind linear.

Zu weiteren Energieformen wie der kinetischen Energie der Fragmente können mit den bisherigen Messmethoden noch keine Aussagen getroffen werden.

6.2 Ausblick

Zukünftige Arbeiten können auf die in dieser Arbeit entwickelte Methodik und Beurteilung des Beschusswiderstandes zurückgreifen, um weitere Betonzusammensetzungen und Einflussfaktoren auf das Betonverhalten zu untersuchen. Nachdem in dieser Arbeit die Grundlagen zur Beurteilung von Normalbeton gelegt wurden, können in einem weiteren Schritt auch Sonderbetone mit erhöhter Festigkeit und Betonzusammensetzungen mit Zusatzstoffen oder Fasern bewertet werden.

Dringend notwendig ist außerdem die Bestimmung weiterer Energieformen, die bisher vernachlässigt werden mussten. Durch geänderte Versuchsaufbauten und die Weiterentwicklung bestehender Methoden sollte die kinetische Energie der Fragmente oder die Verformungsenergie des Projektils erfasst werden. Vorstellbar sind beispielsweise Einzelaufnahmen der Fragmentwolke in verschiedenen Zeitabschnitten, deren Schwerpunkte dann ähnlich dem Abstand der Projektilspitzen vermessen werden.

Außerdem sollten weitere Überlegungen über bisher nicht betrachtete Energieformen wie Schall- oder Wärmeenergie angestellt werden, um eine ausführliche Energiebilanz aufzustellen.

Schließlich wären Untersuchungen mit Geschwindigkeiten unterhalb der Perforationsgeschwindigkeit interessant, um ein Gesamtbild des Materialverhaltens zu bekommen. Bei sehr geringen Prüfgeschwindigkeiten ist vorstellbar, dass nur elastisches Verhalten auftritt; eine Steigerung der Geschwindigkeiten sollte dann dazu führen, dass erste Abplatzungen an der Vorderseite bemerkbar werden. Eine weitere Erhöhung der Prüfgeschwindigkeit könnte dann dazu führen, dass sich ein Durchdringungskanal im Zielobjekt einstellt, in dem das Projektil stecken bleiben könnte.

Literaturverzeichnis

- [1] Aulia, T. B.: Ein Beitrag zur Bruchmechanik von unbewehrtem hochfesten Beton. Dissertation Universität Leipzig, Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, 2004
- [2] Bachmann, H.: Die Massenträgheit in einem Pseudo-Stoffgesetz für Beton bei schneller Zugbeanspruchung. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1993
- [3] Backman, M. und Goldsmith, W: The mechanics of penetration of projectiles into targets. International Journal of Engineering Science, Band 16, Nr. 1, S. 1-99, 1978
- [4] Barr, P.: Guidelines for the design and assessment of concrete structures subjected to impact. SRD R 439, Safety and Reliability Directorate United Kingdom Atomic Energy Authority, Culcheth, Warrington, ISBN: 9780853563037, 1988
- [5] Bažant, Z. P. und Kazemi, M.: Determination of fracture energy, process zone length and brittleness number from size effect, with application to rock and concrete. International Journal of Fracture, Band 44, Nr. 2, S. 111-131, 1990
- [6] Bažant, Z. P. und Oh, B. H.: Crack band theory for fracture of concrete. Materials and Structures, Band 16, Nr. 3, S. 155-177, 1983
- [7] Bažant, Z. P. und Pfeiffer, P. A.: Shear fracture tests of concrete. Materials and Structures, Band 19, Nr. 2, S. 111-121, 1986
- [8] Blaschke, F.: Zugtragverhalten von Beton. Dissertation Gesamthochschule Kassel, 1993
- [9] Bludau, C.: Untersuchung zur hochdynamischen Belastung von Beton, 45. Forschungskolloquium des DAfStb, Beton- und Stahlbetonbau, Band 100, Nr. 2, S. 17-20, 2005
- [10] Bludau, C., Kustermann, A., Keuser, M. und Thienel, K.-C.: Schutzplatten aus hochfestem Beton. Berichte aus dem konstruktiven Ingenieurbau, Heft 06/2, ISSN: 1431-5122
- [11] Børvik, T., Gjørsv, O. E. und Langseth, M.: Ballistic perforation resistance of high-strength concrete slabs. Concrete International, Band 29, Nr. 6, S. 45-50, 2007
- [12] Brameshuber, W.: Bruchmechanische Eigenschaften von jungem Beton. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1988

- [13] Brandt, A. M. und Prokopski, G.: On the fractal dimension of fracture surfaces of concrete elements. *Journal of Materials Science*, Band 28, Nr. 17, S. 4762-4766, 1993
- [14] Brara, A. und Klepaczko, J.: Fracture energy of concrete at high loading rates in tension. *International Journal of Impact Engineering*, Band 34, Nr. 3, S. 424-435, 2007
- [15] Breitenbücher, R.: Online-Messung der Korngrößenverteilung von Sand. *Beton*, Band 55, Nr. 9, S. 436-443, 2005
- [16] Brown, C., Charles, P., Johnsen, W. und Chesters, S.: Fractal analysis of topographic data by the patchwork method. *Wear*, Band 161, Nr. 1-2, S. 61-67, 1993
- [17] Bucke, M.: Ermittlung von Materialkennwerten von Zementstein, -mörtel und Gestein unter hochdynamischer, dynamischer und statischer Belastung. Diplomarbeit Universität der Bundeswehr, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2007
- [18] Budnik, J.: Bruch- und Verformungsverhalten harzmodifizierter und faserverstärkter Betone bei einachsiger Zugbeanspruchung. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1985
- [19] Carpinteri, A.: Fractal nature of material microstructure and size effects on apparent mechanical properties. *Mechanics of Materials*, Band 18, Nr. 2, S. 89-101, 1994
- [20] Carpinteri, A.: Three-dimensional fractal analysis of concrete fracture at the meso-level. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Band 31, Nr. 3, S. 163-172, 1999
- [21] Carpinteri, A. und Chiaia, B.: Multifractal nature of concrete fracture surfaces and size effects on nominal fracture energy. *Materials and Structures*, Band 28, Nr. 8, S. 435-443, 1995
- [22] Carpinteri, A. und Invernizzi, S.: Influence of damage on the fractal properties of concrete subjected to pure tension. *Materials and Structures*, Band 34, Nr. 10, S. 605-611, 2001
- [23] Cherepanov, G. P.: Crack propagation in continuous media. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, Band 31, Nr. 3, S. 503-512, 1967
- [24] Chiaia, B., van Mier, J. und Vervuurt, A.: Crack growth mechanisms in four different concretes: Microscopic observations and fractal analysis. *Cement and Concrete Research*, Band 28, Nr. 1, S. 103-114, 1998

- [25] Comité Euro-International du Béton: CEB-FIP Model Code 1990. ISBN: 9780727735430, Lausanne, 1993
- [26] Corbett, G.: Impact loading of plates and shells by free-flying projectiles: A review. International Journal of Impact Engineering, Band 18, Nr. 2, S. 141-230, 1996
- [27] Curbach, M.: Festigkeitssteigerung von Beton bei hohen Belastungsgeschwindigkeiten. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1987
- [28] Dancygier, A. N.: Rear face damage of normal and high-strength concrete elements caused by hard projectile impact. ACI Structural Journal, Band 95, Nr. 3, S. 291-304, 1998
- [29] Dancygier, A. N.: Scaling of non-proportional non-deforming projectiles impacting reinforced concrete barriers. International Journal of Impact Engineering, Band 24, Nr. 1, S. 33-55, 2000
- [30] Dancygier, A. N., Yankelevsky, D. A. und Baum, H.: Behavior of reinforced concrete walls with interior plaster coating under exterior hard projectile impact. ACI Materials Journal, Band 96, Nr. 1, S. 116-125, 1999
- [31] Dancygier, A. N., Yankelevsky, D. Z. und Jaegermann, C.: Response of high performance concrete plates to impact of non-deforming projectiles. International Journal of Impact Engineering, Band 34, Nr. 11, S. 1768-1779, 2007
- [32] Fa. David Vision Systems GmbH: David Wiki, Benutzeranleitung. <http://www.david-laserscanner.com/wiki/>, abgerufen am 1.12.10
- [33] Norm DIN ISO 565: Analysensiebe - Metalldrahtgewebe, Lochplatten und elektrogelagerte Siebfolien - Nennöffnungsweiten. 1998
- [34] Norm DIN EN 206-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. 2001
- [35] Norm E DIN ISO 9276-6: Darstellung der Ergebnisse von Partikelgrößenanalysen - Teil 6: Die Beschreibung und Quantifizierung von Partikelform und Morphologie. 2010
- [36] Norm DIN EN 12504: Prüfung von Beton in Bauwerken. 2000
- [37] Norm DIN EN 12350: Prüfung von Frischbeton. 2009
- [38] Norm DIN 1048: Prüfverfahren für Beton. 1991
- [39] Norm DIN 4760: Gestaltabweichungen - Begriffe, Ordnungssystem. 1982
- [40] Norm DIN 1045: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton. 2008

- [41] Norm DIN EN 12390: Prüfung von Festbeton. 2009
- [42] Dinovitzer, A.: Fragmentation of targets during ballistic penetration events. International Journal of Impact Engineering, Band 21, Nr. 4, S. 237-244, 1998
- [43] Dougan, L.: Estimating the cut-off in the fractal scaling of fractured concrete. Cement and Concrete Research, Band 31, Nr. 7, S. 1043-1048, 2001
- [44] Duda, H.: Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter monotoner und zyklischer Zugbeanspruchung. DAfStb Heft 419, 1991
- [45] Dugdale, D.: Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, Band 8, Nr. 2, S. 100-104, 1960
- [46] Eibl, S. J.: Schockwellenbeanspruchung von Stahlbetonwänden durch Kontakt-Detonationen. Dissertation TU München, Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau 1/95, 1995
- [47] Elfgren, L.(Hrsg.): Fracture mechanics of concrete structures – From theory to applications, Report of the technical committee 90-FMA Fracture Mechanics of Concrete – Applications RILEM, Chapman & Hall Ltd., New York, ISBN: 0412306808, 1989
- [48] Elices, M.: Fracture mechanics parameters of concrete: An overview. Advanced Cement Based Materials, Band 4, Nr. 3-4, S. 116-127, 1996
- [49] Feder, J.: Fractals (Physics of solids and liquids). Plenum Pr, New York, NY, ISBN: 0306428512, 1988
- [50] Forrestal, M.: Penetration of grout and concrete targets with ogive-nose steel projectiles. International Journal of Impact Engineering, Band 18, Nr. 5, S. 465-476, 1996
- [51] Forrestal, M.: Penetration of concrete targets with deceleration-time measurements. International Journal of Impact Engineering, Band 28, Nr. 5, S. 479-497, 2003
- [52] Frew, D., Forrestal, M. und Cargile, J.: The effect of concrete target diameter on projectile deceleration and penetration depth. International Journal of Impact Engineering, Band 32, Nr. 10, S. 1584-1594, 2006
- [53] Frew, D., Hanchak, S., Green, M. und Forrestal, M.: Penetration of concrete targets with ogive-nose steel rods. International Journal of Impact Engineering, Band 21, Nr. 6, S. 489-497, 1998

- [54] Gjørsv, O., Sørensen, S. und Arnesen, A.: Notch sensitivity and fracture toughness of concrete. *Cement and Concrete Research*, Band 7, Nr. 3, S. 333-344, 1977
- [55] Griffith, A. A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Band 221, Nr. 582-593, S. 163–198, 1921
- [56] Gross, D. und Seelig, T.: *Bruchmechanik. Mit einer Einführung in die Mikromechanik*, 4. Auflage, ISBN: 9783540371137, 2006
- [57] Großmann, F.: *Spannungen und bruchmechanische Vorgänge im Normalbeton unter Zugbeanspruchung*. Dissertation TU Braunschweig, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, Braunschweig, 1987
- [58] Fa. Haver & Boker: Haver CPA-Messprinzip.
<http://www.weavingideas.com/de/anwendungen-produkte/partikelanalyse-photooptisch/mehr-ueber-haver-cpa/cpa-messprinzip.html>, abgerufen am 9.11.10.
- [59] Fa. Haver & Boker: *Photooptische Partikelanalyse - Firmenprospekt*, 2009
- [60] Fa. Haver & Boker: *Haver CPA 2-1 GigE. Betriebsanleitung V0.9.7**, 2010
- [61] Herrmann, N.: *Experimentelle Erfassung des Betonverhaltens unter Schockwellen*. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 2002
- [62] Hillemeier, B.: *Bruchmechanische Untersuchungen des Rissfortschritts in zementgebundenen Werkstoffen*. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1976.
- [63] Hillerborg, A.: *Analysis of one single crack*. *Fracture mechanics of concrete*, Hrsg.: F. H. Wittmann, ISBN: 0444421998, 1983
- [64] Hillerborg, A., Modeer, M. und Petersson, P. E.: *Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements*. *Cement and Concrete Research*, Band 6, Nr. 6, S. 773-781, 1976
- [65] Hilsdorf, H. K. und Ziegelsdorf, S.: *Fracture Energy of Concrete*. *NATO Conference Series VI: Material Science*, Band 4, S. 101-124, 1981
- [66] Hordijk, D. A.: *Local approach to fatigue of concrete*. Dissertation TU Delft, 1991
- [67] Irwin, G. R.: *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate*. *Journal of Applied Mechanics*, Band 24, Nr. 361-364, 1957

- [68] Issa, M. A.: Fractal dimension - a measure of fracture roughness and toughness of concrete. *Engineering Fracture Mechanics*, Band 70, Nr. 1, S. 125-137, 2003
- [69] Issa, M. A., Hammad, A. M. und Chudnovsky, A.: Correlation between crack tortuosity and fracture toughness in cementitious material. *International Journal of Fracture*, Band 60, Nr. 2, S. 97-105, 1993
- [70] Jenq, Y. und Shah, S. P.: Two parameter fracture model for concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Band 111, Nr. 10, S. 1227, 1985
- [71] Kadhim El-Tornachi, M.: Rauheit von Betonoberflächen. 3D-Laser-Messung und Beschreibung der Rauheit von Betonoberflächen; Reibung und Kraftübertragung unter nicht ruhender Belastung. Dissertation TU Dortmund, 2003
- [72] Kaplan, M.: Crack Propagation and the fracture of concrete. *ACI Journal Proceedings*, Band 58, Nr. 11, S. 591-610, 1961
- [73] Kennedy, R. P.: A review of procedures for the analysis and design of concrete structures to resist missile impact effects. *Nuclear Engineering and Design*, Band 37, Nr. 2, S. 183-203, 1976
- [74] Keuser, W.: Bruchmechanisches Verhalten von Beton unter Mixed-Mode Beanspruchung. Dissertation TH Darmstadt, 1989
- [75] Krass, K. und Trogisch, H.: Gezielte Herstellung von Brechsand zur Verwendung im Asphalt- und Betonbau - Teil 1. *DNI Die Naturstein-Industrie*, Band 39, Nr. 7, S. 14-20, 2003
- [76] Kustermann, A., Zimbelmann, R. K., Keuser, M. und Grimm, R.: Hochfeste Bindemittel und Zuschlagstoffe für hochfeste Betone unterschiedlicher Güte für Schutzanlagen der militärischen Sonderinfrastruktur. Forschungsbericht Universität der Bundeswehr; Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Neubiberg, 2005
- [77] Lange, D. A., Jennings, H. M. und Shah, S. P.: Relationship between fracture surface roughness and fracture behavior of cement paste and mortar. *Journal of the American Ceramic Society*, Band 76, Nr. 3, S. 589-597, 1993
- [78] Lee, Y., Carr, J., Barr, D. und Haas, C.: The fractal dimension as a measure of the roughness of rock discontinuity profiles. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, Band 27, Nr. 6, S. 453-464, 1990

- [79] Li, Q., Reid, S., Wen, H. und Telford, A.: Local impact effects of hard missiles on concrete targets. International Journal of Impact Engineering, Band 32, Nr. 1-4, S. 224-284, 2005
- [80] Liu, H.: Nichtlineare bruchmechanische Untersuchungen an Beton und Stahlbeton. Dissertation Universität Gesamthochschule Essen, 1996
- [81] Lückmann, H.: Auswirkung der Probekörpergröße auf das Verhalten von hochdynamisch belasteten Beton. Bachelorarbeit Universität der Bundeswehr, Institut für Werkstoffe des Bauwesens, 2011
- [82] Mandelbrot, B. B.: Die fraktale Geometrie der Natur. ISBN: 9783764317713, 1987
- [83] Mandelbrot, B. B., Passoja, D. E., and Paullay, A. J.: Fractal character of fracture surfaces of metals. Nature, Band 308, Nr. 5961, S. 721-722, 1984
- [84] Mechtcherine, V.: Bruchmechanische und fraktologische Untersuchungen zur Rissausbreitung in Beton. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 2000
- [85] Meyers: Meyers großes Konversationslexikon.
<http://www.openlibrary.info/index.php/list/3-meyers-grosses-konversations-lexikon/4,W,I,.xhtml>, abgerufen am 14.12.2011
- [86] Michon, G. P.: Final answers, surface area of an ellipsoid,
<http://www.numericana.com/answer/ellipsoid.htm>, abgerufen am 5.5.2010
- [87] Middel, M. M.: Zentrische Zuguntersuchungen zur Bestimmung lastabhängiger und lastunabhängiger Rissbildungen von Betonen. Dissertation Ruhr-Universität Bochum, 1995
- [88] Ockert, J.: Ein Stoffgesetz für die Schockwellenausbreitung in Beton. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1997
- [89] Ortlepp, S.: Zur Beurteilung der Festigkeitssteigerung von hochfestem Beton unter hohen Dehngeschwindigkeiten. Dissertation TU Dresden, 2007
- [90] Petersson, P.-E.: Crack growth and development of fracture zones in plain concrete and similar materials. Dissertation Universität Lund, Report. TVBM 1006, 1981
- [91] Polizeitechnisches Institut (PTI) der Deutschen Hochschule der Polizei (DHPol): Technische Richtlinie (TR) Ballistische Schutzwesten (2009).

- http://www.pfa.nrw.de/PTI_Internet/pti-intern.dhpol.local/WG/Regelungen/Schutzweste/SchutzwesteTR_03-08_Revisionen-10-08_09-09.pdf.html, abgerufen am 23.3.11.
- [92] Prokopski, G.: Effect of water/cement ratio and silica fume addition on the fracture toughness and morphology of fractured surfaces of gravel concretes. Cement and Concrete Research, Band 30, Nr. 9, S. 1427-1433, 2000
- [93] Rama Chandra Murthy, A., Palani, G. S. und Iyer, N. R.: Impact analysis of concrete structural components. Defense Science Journal, Band 60, Nr. 3, S. 307-319, 2010
- [94] Reinecke, R.: Haftverbund und Rissverzahnung in unbewehrten Betonschubfugen. Dissertation TU München, 2004
- [95] Reinecke, R.: Die Rolle der Oberflächenrauheit in der Altbetonsanierung. Massivbau in ganzer Breite - Festschrift zum 60. Geburtstag von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Konrad Zilch, Hrsg.: R. Niedermeier und R. Reinecke, ISBN: 9783540225416, S. 475-483, 2005
- [96] Reinhardt, H. W.: Concrete under impact loading tensile strength and bond. Heron Delft University of Technology, Band 27, Nr. 3, S. 1-48, 1982
- [97] Reinhardt, H. W.: VIII Beton. Beton-Kalender (2005), Hrsg.: K. Bergmeister and J. D. Wörner, ISBN: 9783433017289, S. 63 ff., 2005
- [98] Reinhardt, H. W. und Weerheijm, J.: Tensile fracture of concrete at high loading rates taking account of inertia and crack velocity effects. International Journal of Fracture, Band 51, Nr. 1, S. 31-42, 1991
- [99] Rimmel, G.: Zum Zug- und Schubtragverhalten von Bauteilen aus hochfestem Beton. DAfStb Heft 444. 1994
- [100] Rice, J. R.: A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks. Journal of Applied Mechanics, Band 35, S. 379-386, 1968
- [101] Riedel, W.: Beton unter dynamischen Lasten. Meso- und makromechanische Modelle und ihre Parameter. EMI-Bericht, Hrsg.: Fraunhofer Ernst-Mach-Institut, ISBN: 9783816763406, 2000
- [102] RILEM: Determination of the fracture energy of mortar and concrete by means of three-point bend tests on notched beams (50-FMC draft recommendation). Materials and Structures, Band 18, Nr. 4, S. 287-290, 1985

- [103] Saouma, V. E. und Barton, C. C.: Fractals, Fractures, and Size Effects in Concrete. *Journal of Engineering Mechanics*, Band 120, Nr. 4, S. 835, 1994
- [104] Schäfer, F.: Hochgeschwindigkeitsimpakt auf Gasdruckbehälter in Raumfahrtanwendungen. Dissertation TU München, 2001
- [105] Schäfer, F.: An engineering fragmentation model for the impact of spherical projectiles on thin metallic plates. *International Journal of Impact Engineering*, Band 33, Nr. 1-12, S. 745–762, 2006
- [106] Schäfer, H. G., Block, K. und Drell, R.: Oberflächenrauheit und Haftverbund. DAFStb Heft 456, ISBN: 9783410656562, 1996
- [107] Scheidler, D.: Experimentelle und analytische Untersuchungen zur wirklichkeitsnahen Bestimmung der Bruchschnittgrößen unbewehrter Betonbauteile unter Zugbeanspruchung. DAFStb Heft 379, 1987
- [108] Schuler, H., Mayrhofer, C. und Thoma, K.: Spall experiments for the measurement of the tensile strength and fracture energy of concrete at high strain rates. *International Journal of Impact Engineering*, Band 32, Nr. 10, S. 1635-1650, 2006
- [109] Shah, S. P.: Determination of fracture parameters (K_{Ics} and $CTOD_c$) of plain concrete using three-point bend tests. *Materials and Structures*, Band 23, Nr. 6, S. 457-460, 1990
- [110] Shah, S. P.: Size-effect method for determining fracture energy and process zone size of concrete. *Materials and Structures*, Band 23, Nr. 6, S. 461-465, 1990
- [111] Shah, S. P. und McGarry, F. J.: Griffith fracture criterion and concrete. *Journal of the Engineering Mechanics Division*, Band 97, Nr. 6, S. 1663-1676, 1971
- [112] Slowik, V.: Beiträge zur experimentellen Bestimmung bruchmechanischer Materialparameter von Betonen. Postdoktorandenbericht, ISBN: 9783905088106, 1995
- [113] Sneddon, I. N.: The distribution of stress in the neighbourhood of a crack in an elastic solid. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, Band 187, Nr. 1009, S. 229-260, 1946
- [114] Fa. Softelec: Softwaretool VPstudio für AutoCAD. <http://www.softelec.de/>, abgerufen am 24.3.2011

- [115] Stark, U.: Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen – schnelle und effektive Methode zur Beurteilung. Ratgeber Abbruch & Recycling, S. 78-84, 2004
- [116] Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1. ISBN: 9783540325512, 2009
- [117] Trunk, B.: Einfluß der Bauteilgröße auf die Bruchenergie von Beton. Dissertation ETH Zürich, 1999
- [118] Unland, G. und Folgner, T.: Automatische Kornformbestimmung durch photooptische Partikelanalyse. DNI Die Naturstein-Industrie, Band 33, Nr. 5, S. 20-28, 1997
- [119] VDZ: Zement-Taschenbuch. Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke. ISBN: 9783764004279, 2002
- [120] Vegt, I., Weerheijm, J. und van Breugel, K.: The rate dependency of concrete under tensile impact loading. Fracture energy and fracture characteristics. Proceedings of the 13th ISIEMS, Brühl 11.-15. Mai 2009
- [121] Vossoughi, F., Ostertag, C., Monteiro, P. und Johnson, G.: Resistance of concrete protected by fabric to projectile impact. Cement and Concrete Research, Band 37, Nr. 1, S. 96-106, 2007
- [122] Weerheijm, J.: Concrete under impact tensile loading and lateral compression. Dissertation TU Delft, 1992
- [123] Weerheijm, J. und van Doormaal, J.: Tensile failure of concrete at high loading rates: New test data on strength and fracture energy from instrumented spalling tests. International Journal of Impact Engineering, Band 34, Nr. 3, S. 609-626, 2007
- [124] Werner, S., Neumann, I., Thienel, K.-Chr. und Heunecke, O.: A fractal-based approach for the determination of concrete surfaces using laser scanning techniques: a comparison of two different measuring systems. Materials & Structures, DOI 10.1617/s11527-012-9898-y, 2012
- [125] Wilhelm, T.: Ein experimentell begründetes mikromechanisches Modell zur Beschreibung von Bruchvorgängen in Beton bei äußerer Krafteinwirkung. Dissertation TU Darmstadt, 2006
- [126] Wille, K., Dehn, F. und Tue, N.: Bruchmechanische Kenngrößen hochfester Leichtbetone. Bauingenieur, Band 80, Nr. 6, S. 327-333, 2005

- [127] Winkelbach, S., Molkenstruck, S. und Wahl, F.: Low-cost laser range scanner and fast surface registration approach. Pattern recognition. 28th DAGM Symposium, Berlin, 12.-14. September 2006; proceedings, Hrsg.: Franke, K., Müller, K.-R., Nickolay, B. und Schäfer, R., Lecture notes in computer science 4174, ISBN: 3540444122, S. 718-728, 2006
- [128] Wittmann, F. H.: Grundlagen eines Modells zur Beschreibung charakteristischer Eigenschaften des Betons. DAFStb Heft 290, 1977
- [129] Wittmann, F. H.: Structure of concrete with respect to crack formation. Fracture mechanics of concrete, Hrsg.: F. H. Wittmann, ISBN: 0444421998, 1983
- [130] Wittmann, F. H., Roelfstra, P. E., Mihashi, H., Huang, Y.-Y., Zhang, X.-H. und Nomura, N.: Influence of age of loading, water-cement ratio and rate of loading on fracture energy of concrete. Materials and Structures, Band 20, Nr. 2, S. 103-110, 1987
- [131] Wu, C., Nurwidayati, R. und Oehlers, D. J.: Fragmentation from spallation of RC slabs due to airblast loads. International Journal of Impact Engineering, Band 36, Nr. 12, S. 1371-1376, 2009
- [132] Wu, K.: Reconstruction and analysis of 3-D profile of fracture surface of concrete. Cement and Concrete Research, Band 30, Nr. 6, S. 981-987, 2000
- [133] Xu, S. und Reinhardt, H. W.: Determination of double-K criterion for crack propagation in quasi-brittle fracture Part I: experimental investigation of crack propagation. International Journal of Fracture, Band 98, Nr. 2, S. 111-149, 1999
- [134] Yan, A., Wu, K.-R., Zhang, D. und Yao, W.: Effect of fracture path on the fracture energy of high-strength concrete. Cement and Concrete Research, Band 31, Nr. 11, S. 1601-1606, 2001
- [135] Yankelevsky, D. Z.: Local response of concrete slabs to low velocity missile impact. International Journal of Impact Engineering, Band 19, Nr. 4, S. 331-343, 1997
- [136] Zampini, D., Jennings, H. M. und Shah, S. P.: Characterization of the paste-aggregate interfacial transition zone surface roughness and its relationship to the fracture toughness of concrete. Journal of Materials Science, Band 30, Nr. 12, S. 3149-3154, 1995
- [137] Zhang, M., Shim, V., Lu, G. und Chew, C.: Resistance of high-strength concrete to projectile impact. International Journal of Impact Engineering, Band 31, Nr. 7, S. 825-841, 2005

- [138] Zhang, X., Ruiz, G., Yu, R. und Tarifa, M.: Fracture behaviour of high-strength concrete at a wide range of loading rates. *International Journal of Impact Engineering*, Band 36, Nr. 10-11, S. 1204–1209, 2009
- [139] Zheng, S.: Beton bei variierender Dehngeschwindigkeit untersucht mit einer neuen modifizierten Split-Hopkinson-Bar-Technik. Dissertation Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, 1996
- [140] Zielinski, A. J.: Fracture of concrete and mortar under uniaxial impact tensile loading. Dissertation TU Delft, 1982
- [141] Zilch, K. und Mainz, J.: Schubtragfähigkeit von Betonergänzungen an nachträglich aufgerauten Betonoberflächen bei Sanierungs- und Ertüchtigungsmaßnahmen. DAFStb Heft 528, 2002
- [142] Zimbelmann, R. K. und Junggunst, J.: Entwicklung eines hochfesten Betons für Schutzbauten mit hohem Beschusswiderstand. Forschungsbericht für Bundesamt für Wehrtechnik und Beschaffung, Neubiberg, 1997
- [143] Zlatev, M.: Beitrag zur quantitativen Kornformcharakterisierung unter besonderer Berücksichtigung der digitalen Bildaufnahmetechnik. Dissertation TU Bergakademie Freiberg, 2005
- [144] Hrsg. Zukas, J. A.: High velocity impact dynamics. ISBN: 9780471514442, 1990

Anhang

Anhang 1: Frisch- und Festbetoneigenschaften

Tabelle 1: Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß, Luftporengehalt, Frischbetonrohddichte)

Bruchmechanische Untersuchung				Ballistische Untersuchung			
Bez.	d _A [mm]	A _c [Vol.-%]	ρ _{Fr} [kg/m ³]	Bez.	d _A [mm]	A _c [Vol.-%]	ρ _{Fr} [kg/m ³]
1.1.a	430	0,5	2,450	3.1.a	390	0,5	2,448
1.2.a	360	0,8	2,449	3.2.a	400	0,4	2,450
1.3.a	390	0,5	2,448	3.3.a	360	0,7	2,446
1.5.a	-*	1,2	2,478	3.5.a	320	1,0	2,477
1.5.b	340	1,1	2,496	3.5.b	-*	0,4	2,510
1.6.a	-*	1,2	2,428	3.6.a	370	0,4	2,424
1.6.b	450	7,0	2,202	3.6.b	330	9,0	2,193
1.6.c	-*	0,1	1,749	3.6.c	-*	0,2	1,737
1.7.a	440	0,5	2,452	3.7.a	410	0,6	2,444
1.7.b	440	0,8	2,449	3.7.b	380	0,5	2,488
1.7.c	410	0,8	2,436				

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 2: Festbetoneigenschaften der Begleitkörper zu den bruchmechanischen Untersuchungen (Zylinderdruck-, Biegezug-, Spaltzugfestigkeit, statischer und dynamischer E-Modul, Festbetonrohddichte)

Bez.	Zylinderdruck-	Biegezug-*	Spaltzug-	Statischer E-Modul	Dynamischer E-Modul	Rohddichte ρ
	-festigkeit [N/mm ²]			[GPa]	[GPa]	[kg/m ³]
1.1.a	43,4	4,9	5,1	31,9	59,9	2,484
1.2.a	53,6	5,8	6,1	37,7	64,5	2,464
1.3.a	53,3	6,0	6,2	35,3	55,2	2,442
1.5.a	57,3	5,7	6,1	37,4	58,3	2,456
1.5.b	69,9	6,3	6,9	38,8	62,5	2,495
1.6.a	51,0	4,8	5,0	31,7	59,4	2,443
1.6.b	28,5	4,4	3,9	25,7	49,5	2,310
1.6.c	35,4	2,7	1,9	14,2	31,9	1,914
1.7.a	49,8	5,4	5,3	33,5	63,1	2,501
1.7.b	45,7	4,0	5,7	32,2	65,8	2,491
1.7.c	47,0	6,1	5,0	32,9	62,1	2,483

*: Biegezugfestigkeit aus den bruchmechanischen Untersuchungen

Tabelle 3: Festbetoneigenschaften der Begleitkörper zu den ballistischen Untersuchungen (Zylinderdruck-, Biegezug-, Spaltzugfestigkeit, statischer und dynamischer E-Modul, Festbetonrohddichte)

Bez.	Zylinderdruck-	Biegezug-	Spaltzug-	Statischer	Dynamischer	Rohddichte ρ [kg/m ³]
				E-Modul [GPa]	E-Modul [GPa]	
-festigkeit [N/mm ²]						
3.1.a	46,7	6,1	4,4	32,6	57,9	2,489
3.2.a	57,0	7,9	5,9	40,6	61,0	2,488
3.3.a	53,5	6,8	5,4	36,1	53,8	2,443
3.5.a	57,8	7,8	6,4	36,7	58,5	2,485
3.5.b	75,6	10,2	7,4	39,8	66,2	2,523
3.6.a	48,8	7,3	5,7	29,6	52,5	2,404
3.6.b	49,4	7,9	5,7	27,2	47,1	2,277
3.6.c	32,5	2,9	3,2	13,3	21,6	1,891
3.7.a	49,1	7,2	5,4	31,8	56,6	2,470
3.7.b	49,5	7,2	5,2	31,8	56,3	2,465

Anhang 2: Referenzbeton

Tabelle 4: Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Querschnittsfläche, dreidimensionale Bruchfläche, minimale Rauheit, fraktale Dimension)

Bez.	A_Q [mm ²]	A_{3D} [mm ²]	R_{min} [l]	D_{GS} [l]
1.1.a-1	4905,4	5660,8	1,154	2,035
1.1.a-2	5046,5	5839,8	1,157	2,038
1.1.a-3	5288,2	6119,2	1,157	2,031
1.1.a-4	5243,1	6085,4	1,161	2,031
1.1.a-5	5024,3	5734,8	1,141	2,031
1.1.a-6	4942,4	5605,6	1,134	2,039
1.1.a-7	5001,6	5584,5	1,117	2,030
1.1.a-8	4869,4	5469,1	1,123	2,025
1.1.a-9	5113,1	5628,5	1,101	2,026
1.1.a-10	5187,4	5826,7	1,123	2,031
1.1.a-11	4989,5	5483,1	1,099	2,029
1.1.a-12	5047,9	5595,2	1,108	2,030

Tabelle 5: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung (Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft)

Bez.	δ_0 [mm]	F_{max} [N]	$f_{ct,fl}$ [N/mm ²]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,max}$ [mm]
1.1.a-1	1,038	976	4,8	0,238	0,010
1.1.a-2	0,606	1097	5,1	*	0,011
1.1.a-3	1,054	1128	4,9	0,279	0,011
1.1.a-4	1,076	1170	5,1	*	0,013
1.1.a-5	1,066	934	4,4	0,236	0,009
1.1.a-6	0,749	938	4,5	0,170	0,013
1.1.a-7	0,673	1053	5,0	0,138	0,010
1.1.a-8	0,788	1046	5,3	0,170	0,013
1.1.a-9	0,721	1100	5,0	0,158	0,010
1.1.a-10	1,101	1031	4,6	0,250	0,011
1.1.a-11	0,931	1114	5,3	0,199	0,011
1.1.a-12	0,835	1017	4,7	0,187	0,013

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 6: Bruchenergiekennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Arbeit, korrigierte Arbeit, spezifische Bruchenergie nach RILEM, neue spezifische Bruchenergie)

Bez.	W_0 [Nmm]	W [J]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
1.1.a-1	301,2	0,5067	103,3	89,5
1.1.a-2	303,7	0,4224	83,7	72,3
1.1.a-3	388,7	0,6055	114,5	98,9
1.1.a-4	419,4	0,6402	122,1	105,2
1.1.a-5	318,3	0,5305	105,6	92,5
1.1.a-6	253,7	0,4027	81,5	71,8
1.1.a-7	260,4	0,3943	78,8	70,6
1.1.a-8	305,3	0,4660	95,7	85,2
1.1.a-9	291,5	0,4351	85,1	77,3
1.1.a-10	328,2	0,5530	106,6	94,9
1.1.a-11	327,2	0,5125	102,7	93,5
1.1.a-12	285,4	0,4520	89,6	80,8

Tabelle 7: Gemessene Massen der ballistischen Untersuchung (Gesamtmasse des Probekörpers vor und nach der Perforation, Plattenmasse, Fragmentmasse und Massenverlust)

Bez.	m_v [g]	m_{PI} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.1.a-1	11130	10670	432	11102	28
3.1.a-2	11320	11040	252	11292	28
3.1.a-3	11180	10710	445	11155	25
3.1.a-4	11070	10780	271	11051	19
3.1.a-5	11300	10970	260	11280	20
3.1.a-6	11010	10590	356	10990	20
3.1.a-7	11080	10850	221	11071	9
3.1.a-8	11010	10650	340	10990	20
3.1.a-9	11250	11010	231	11241	9
3.1.a-10	11280	10810	470	11280	0
3.1.a-11	11210	10870	328	11198	12

Tabelle 8: Getrocknete Massen und Anzahl der Fragmente aufgeteilt nach den genutzten Methoden CPA bzw. SV

Bez.	m_{CPA} [g]	N_{CPA} [l]	m_{SV} [g]	N_{SV} [l]
3.1.a-1	332	3756229	87	2
3.1.a-2	244	4343062	0	0
3.1.a-3	260	4223799	182	4
3.1.a-4	224	5150833	44	2
3.1.a-5	230	4043631	30	1
3.1.a-6	255	4365080	97	5
3.1.a-7	204	3792548	17	1
3.1.a-8	320	4231996	15	1
3.1.a-9	198	4092703	29	2
3.1.a-10	287	3846441	167	6
3.1.a-11	267	4123056	54	4

Tabelle 9: Einzelne Bruchflächen der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Gesamtbruchfläche

Bez.	A_{CPA} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]	A_{GB} [cm ²]
3.1.a-1	4742	153	76	196	65	186	4917
3.1.a-2	4809	0	80	109	68	94	4835
3.1.a-3	4506	304	66	198	68	175	4832
3.1.a-4	5342	94	56	131	51	128	5444
3.1.a-5	4615	60	68	111	58	100	4697
3.1.a-6	4867	196	68	185	64	138	5114
3.1.a-7	3978	29	69	101	67	86	4024
3.1.a-8	5200	38	74	151	68	140	5254
3.1.a-9	4278	78	64	107	56	100	4371
3.1.a-10	4820	351	48	184	43	198	5162
3.1.a-11	5004	131	73	142	63	135	5152

Tabelle 10: Gemessene und berechnete Werte der Energie (Eintrittsenergie, Energiedifferenz, Austrittsenergie, Bruchenergie)

Bez.	$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$ [J]	ΔE [J]	$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$ [J]	$E_{V,T,Fragmente}/k_{\text{dyn}}$ [J]
3.1.a-1	3638	1789	1850	42,3
3.1.a-2	3636	1275	2361	41,6
3.1.a-3	3653	1443	2209	41,6
3.1.a-4	3571	1698	1873	46,9
3.1.a-5	3667	1279	2388	40,4
3.1.a-6	3608	1840	1767	44,0
3.1.a-7	3640	1457	2183	34,7
3.1.a-8	3674	*	*	45,2
3.1.a-9	3656	1453	2203	37,6
3.1.a-10	3695	1421	2275	44,4
3.1.a-11	3663	1724	1940	44,4

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Anhang 3: Alter

Tabelle 11: Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Querschnittsfläche, dreidimensionale Bruchfläche, minimale Rauheit, fraktale Dimension)

Bez.	A_Q [mm ²]	A_{3D} [mm ²]	R_{min} [λ]	D_{GS} [λ]
1.2.a-1	5369,8	5941,8	1,107	2,029
1.2.a-2	5070,2	5537,2	1,092	2,024
1.2.a-3	5191,8	5767,5	1,111	2,023
1.2.a-4	5049,7	5471,0	1,083	2,020
1.2.a-5	5019,9	5390,6	1,074	2,018
1.2.a-6	5253,1	5727,9	1,090	2,022
1.2.a-7	5256,9	5704,4	1,085	2,023
1.2.a-8	5135,9	5617,2	1,094	2,026
1.2.a-9	4980,0	5376,8	1,080	2,022
1.2.a-10	5221,9	5701,7	1,092	2,030
1.2.a-11	4989,4	5394,4	1,081	2,020
1.2.a-12	5263,2	5876,1	1,116	2,025

Tabelle 12: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung (Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft)

Bez.	δ_0 [mm]	F_{max} [N]	$f_{ct,fl}$ [N/mm ²]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,max}$ [mm]
1.2.a-1	0,756	1379	5,8	0,184	0,008
1.2.a-2	0,809	1288	6,0	0,180	0,008
1.2.a-3	0,861	1246	5,6	0,190	0,010
1.2.a-4	0,660	1252	6,0	0,140	0,008
1.2.a-5	0,645	1171	5,6	0,140	0,009
1.2.a-6	0,824	1246	5,6	0,197	0,014
1.2.a-7	0,844	1378	6,0	0,195	0,011
1.2.a-8	0,616	1336	6,2	0,134	0,009
1.2.a-9	0,577	1101	5,3	0,120	0,009
1.2.a-10	0,616	1282	5,7	0,152	0,011
1.2.a-11	0,721	1209	5,9	0,166	0,009
1.2.a-12	0,710	1251	5,5	0,163	0,010

Tabelle 13: Bruchenergiekennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Arbeit, korrigierte Arbeit, spezifische Bruchenergie nach RILEM, neue spezifische Bruchenergie)

Bez.	W_0 [Nmm]	W [J]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
1.2.a-1	347,8	0,4998	93,1	84,1
1.2.a-2	347,7	0,5081	100,2	91,8
1.2.a-3	344,6	0,5149	99,2	89,3
1.2.a-4	319,1	0,4511	89,3	82,4
1.2.a-5	275,5	0,3997	79,6	74,1
1.2.a-6	379,9	0,5461	104,0	95,3
1.2.a-7	361,0	0,5276	100,4	92,5
1.2.a-8	287,7	0,4104	79,9	73,1
1.2.a-9	274,0	0,3843	77,2	71,5
1.2.a-10	297,0	0,4199	80,4	73,6
1.2.a-11	363,9	0,5045	101,1	93,5
1.2.a-12	307,8	0,4486	85,2	76,3

Tabelle 14: Gemessene Massen der ballistischen Untersuchung (Gesamtmasse des Probekörpers vor und nach der Perforation, Plattenmasse, Fragmentmasse und Massenverlust)

Bez.	m_v [g]	m_{PI} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.2.a-1	11370	10835	541	11376	-6
3.2.a-2	11050	10675	362	11037	13
3.2.a-3	10665	10295	346	10641	24
3.2.a-4	11315	10865*	430	11295	20
3.2.a-5	11005	10670	317	10987	18
3.2.a-6	10995	10635	338	10973	22
3.2.a-7	11150	10740	375	11115	35
3.2.a-8	10900	10515	390	10905	-5
3.2.a-9	11455	10895*	515	11410	45
3.2.a-10	11310	10865	450	11315	-5
3.2.a-11	11175	10685	451	11136	39

*: Platte gebrochen, Summe der 4 Einzelteile der Platte

Tabelle 15: Getrocknete Massen und Anzahl der Fragmente aufgeteilt nach den genutzten Methoden CPA bzw. SV

Bez.	m_{CPA} [g]	N_{CPA} [l]	m_{SV} [g]	N_{SV} [l]
3.2.a-1	320	5646822	206	10
3.2.a-2	271	4060732	83	5
3.2.a-3	271	3490420	67	4
3.2.a-4	295	2800642	128	7
3.2.a-5	292	3718348	17	1
3.2.a-6	256	3750332	75	4
3.2.a-7	310	4038901	59	4
3.2.a-8	266	3572644	96	3
3.2.a-9	351	3121036	157	6
3.2.a-10	361	2809642	82	6
3.2.a-11	312	3760234	132	8

Tabelle 16: Einzelne Bruchflächen der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Gesamtbruchfläche

Bez.	A_{CPA} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]	A_{FV} [cm ²]	A_{GB} [cm ²]
3.2.a-1	5736	439	135	167	130	145	-	6201
3.2.a-2	4597	179	66	148	53	134	-	4804
3.2.a-3	4202	145	93	131	76	122	-	4374
3.2.a-4	4099	272	-	-	-	-	441	4811
3.2.a-5	4796	32	99	112	82	94	-	4862
3.2.a-6	4372	162	92	132	81	108	-	4570
3.2.a-7	5097	140	96	152	76	131	-	5279
3.2.a-8	4841	189	85	169	76	145	-	5061
3.2.a-9	*	303	-	-	-	-	476	*
3.2.a-10	4502	206	76	172	78	137	-	4741
3.2.a-11	4827	291	79	167	74	163	-	5127

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 17: Gemessene und berechnete Werte der Energie (Eintrittsenergie, Energiedifferenz, Austrittsenergie, Bruchenergie)

Bez.	$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$ [J]	ΔE [J]	$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$ [J]	$E_{V,T,Fragmente}/k_{\text{dyn}}$ [J]
3.2.a-1	3583	1704	1879	51,5
3.2.a-2	3559	1420	2139	39,9
3.2.a-3	3544	1296	2248	36,3
3.2.a-4	3593	1684	1909	40,0
3.2.a-5	3671	1539	2132	40,4
3.2.a-6	3621	1327	2294	38,0
3.2.a-7	3588	1581	2007	43,9
3.2.a-8	3633	1741	1891	42,1
3.2.a-9	3580	*	*	*
3.2.a-10	3598	1784	1814	39,4
3.2.a-11	3604	1922	1682	42,6

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Anhang 4: Lagerung

Tabelle 18: Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Querschnittsfläche, dreidimensionale Bruchfläche, minimale Rauheit, fraktale Dimension)

Bez.	A_Q [mm ²]	A_{3D} [mm ²]	R_{min} [λ]	D_{GS} [λ]
1.3.a-1	5355,3	5955,0	1,112	2,022
1.3.a-2	5355,0	5856,1	1,094	2,025
1.3.a-3	5278,6	5776,6	1,094	2,022
1.3.a-4	5291,6	5731,3	1,083	2,023
1.3.a-5	5371,2	6090,3	1,134	2,030
1.3.a-6	5376,7	5755,3	1,070	2,025
1.3.a-7	5415,8	6068,0	1,120	2,027
1.3.a-8	5152,7	5667,1	1,100	2,021
1.3.a-9	5329,4	5814,3	1,091	2,025
1.3.a-10	5175,6	5714,0	1,104	2,027
1.3.a-11	5360,3	5959,7	1,112	2,026
1.3.a-12	5386,2	5841,1	1,084	2,027

Tabelle 19: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung (Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft)

Bez.	δ_0 [mm]	F_{max} [N]	$f_{ct,fl}$ [N/mm ²]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,max}$ [mm]
1.3.a-1	0,984	1141	4,9	*	0,017
1.3.a-2	1,152	1377	5,9	*	0,008
1.3.a-3	1,019	1389	6,1	0,241	0,009
1.3.a-4	0,716	1457	6,4	0,160	0,009
1.3.a-5	1,279	1417	6,1	0,276	0,007
1.3.a-6	0,730	1349	5,8	0,175	0,009
1.3.a-7	1,097	1369	5,7	0,220	0,010
1.3.a-8	0,955	1478	6,7	0,182	0,013
1.3.a-9	0,896	1494	6,4	0,209	0,012
1.3.a-10	0,860	1511	7,0	0,189	0,010
1.3.a-11	0,795	1361	5,8	0,188	0,011
1.3.a-12	0,841	1315	5,6	0,181	0,009

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 20: Bruchenergiekennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Arbeit, korrigierte Arbeit, spezifische Bruchenergie nach RILEM, neue spezifische Bruchenergie)

Bez.	W_0 [Nmm]	W [J]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
1.3.a-1	341,6	0,5470	102,1	91,9
1.3.a-2	378,6	0,6128	114,4	104,6
1.3.a-3	437,4	0,6421	121,7	111,2
1.3.a-4	360,2	0,5073	95,9	88,5
1.3.a-5	547,4	0,8085	150,5	132,8
1.3.a-6	343,4	0,4946	92,0	85,9
1.3.a-7	442,2	0,6589	121,7	108,6
1.3.a-8	494,1	0,6798	131,9	120,0
1.3.a-9	437,4	0,6189	116,1	106,4
1.3.a-10	410,7	0,5840	112,8	102,2
1.3.a-11	358,4	0,5199	97,0	87,2
1.3.a-12	387,1	0,5575	103,5	95,4

Tabelle 21: Gemessene Massen der ballistischen Untersuchung (Gesamtmasse des Probekörpers vor und nach der Perforation, Plattenmasse, Fragmentmasse und Massenverlust)

Bez.	m_v [g]	m_{PI} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.3.a-1	11175	10870	286	11156	19
3.3.a-2	10845	10485	338	10823	22
3.3.a-3	11085	10795	281	11076	9
3.3.a-4	11205	10935	255	11190	15
3.3.a-5	11090	10805	258	11063	27
3.3.a-6	10900	10625	259	10884	17
3.3.a-7	10975	10650	310	10960	15
3.3.a-8	11240	10950	273	11223	17
3.3.a-9	10865	10550	284	10834	31
3.3.a-10	10965	10630	308	10938	27
3.3.a-11	10900	10345	516	10861	40

Tabelle 22: Getrocknete Massen und Anzahl der Fragmente aufgeteilt nach den genutzten Methoden CPA bzw. SV

Bez.	m_{CPA} [g]	N_{CPA} [l]	m_{SV} [g]	N_{SV} [l]
3.3.a-1	269	4664620	10	1
3.3.a-2	290	4058846	41	3
3.3.a-3	253	3828567	20	2
3.3.a-4	209	3860967	37	4
3.3.a-5	250	3568635	0	0
3.3.a-6	237	3850983	12	1
3.3.a-7	276	3420814	18	2
3.3.a-8	169	3539448	97	4
3.3.a-9	251	3727162	23	2
3.3.a-10	260	3553584	39	4
3.3.a-11	321	4463126	185	10

Tabelle 23: Einzelne Bruchflächen der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Gesamtbruchfläche

Bez.	A_{CPA} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]	A_{GB} [cm ²]
3.3.a-1	4871	28	79	118	69	97	4930
3.3.a-2	4814	109	118	105	115	87	4943
3.3.a-3	4487	57	78	110	70	98	4565
3.3.a-4	3781	111	79	103	73	88	3912
3.3.a-5	3919	0	65	93	58	87	3932
3.3.a-6	4387	30	64	109	55	90	4445
3.3.a-7	4061	50	90	95	84	78	4134
3.3.a-8	*	193	48	116	49	112	*
3.3.a-9	4083	64	71	109	66	97	4164
3.3.a-10	4102	119	67	131	64	120	4234
3.3.a-11	5254	406	107	167	99	163	5672

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 24: Gemessene und berechnete Werte der Energie (Eintrittsenergie, Energiedifferenz, Austrittsenergie, Bruchenergie)

Bez.	$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$ [J]	ΔE [J]	$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$ [J]	$E_{\text{V,T,Fragmente}}/k_{\text{dyn}}$ [J]
3.3.a-1	3590	1527	2063	50,7
3.3.a-2	3571	1425	2145	50,9
3.3.a-3	3551	1230	2321	47,0
3.3.a-4	3648	1313	2334	40,3
3.3.a-5	3573	1312	2261	40,5
3.3.a-6	3574	1718	1855	45,7
3.3.a-7	3630	1336	2294	42,5
3.3.a-8	3573	*	*	*
3.3.a-9	3583	1017	2566	42,8
3.3.a-10	3553	1357	2196	43,6
3.3.a-11	3583	1412	2171	58,4

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Anhang 5: Prüfgeschwindigkeit

Tabelle 25: Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Querschnittsfläche, dreidimensionale Bruchfläche, minimale Rauheit, fraktale Dimension)

Bez.	A _Q [mm ²]	A _{3D} [mm ²]	R _{min} [°]	D _{GS} [°]
1.7.a-1	5455,9	6015,5	1,103	2,026
1.7.a-2	4950,1	5461,5	1,103	2,028
1.7.a-3	5317,4	5924,4	1,114	2,026
1.7.a-4	5110,5	5750,7	1,125	2,031
1.7.a-5	5113,1	5497,9	1,075	2,026
1.7.a-6	5419,0	6133,7	1,132	2,040
1.7.a-7	5276,7	5758,8	1,091	2,026
1.7.a-8	5261,0	5878,6	1,117	2,031
1.7.a-9	5028,6	5613,3	1,116	2,033
1.7.a-10	5080,0	5804,3	1,143	2,030
1.7.a-11	5186,6	5775,0	1,113	2,025
1.7.a-12	5455,9	6015,5	1,103	2,026
1.7.b-1	5450,6	6147,6	1,128	2,027
1.7.b-2	5242,7	6001,0	1,145	2,025
1.7.b-3	5335,4	5878,0	1,102	2,026
1.7.b-4	5273,4	6094,1	1,156	2,032
1.7.b-5	5339,6	6092,3	1,141	2,028
1.7.b-6	5278,4	5814,8	1,102	2,026
1.7.b-7	5262,1	5893,6	1,120	2,027
1.7.b-8	5288,9	5847,3	1,106	2,026
1.7.b-9	5483,0	6042,0	1,102	2,023
1.7.b-10	5528,2	6318,5	1,143	2,030
1.7.c-1	5504,5	6391,5	1,161	2,028
1.7.c-2	5422,8	5973,1	1,101	2,026
1.7.c-3	5540,4	6111,4	1,103	2,026
1.7.c-4	5483,8	6058,2	1,105	2,024
1.7.c-5	5604,5	6163,9	1,100	2,029
1.7.c-6	5544,0	6175,2	1,114	2,030
1.7.c-7	5569,9	6417,0	1,152	2,027
1.7.c-8	5528,4	6050,1	1,094	2,023
1.7.c-9	5390,8	6217,0	1,153	2,041
1.7.c-10	5390,0	5884,6	1,092	2,028
1.7.c-11	5511,5	6020,1	1,092	2,022

Tabelle 26: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung (Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft)

Bez.	δ_0 [mm]	F_{\max} [N]	$f_{ct,fl}$ [N/mm ²]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,\max}$ [mm]
1.7.a-1	0,963	1277	5,2	0,249	0,010
1.7.a-2	0,880	1186	5,8	0,170	0,010
1.7.a-3	1,100	1228	5,3	0,240	0,015
1.7.a-4	1,222	1350	6,2	0,263	0,013
1.7.a-5	0,694	1203	5,5	0,145	0,013
1.7.a-6	1,196	1250	5,2	0,283	0,010
1.7.a-7	0,702	1196	5,2	0,154	0,013
1.7.a-8	0,671	1205	5,2	0,146	0,009
1.7.a-9	0,791	1114	5,2	0,163	0,009
1.7.a-10	1,239	1061	5,0	0,268	0,010
1.7.a-11	0,990	1277	5,8	0,232	0,009
1.7.a-12	0,963	1277	5,2	0,249	0,010
1.7.b-1	1,845	963	3,9	0,439	0,013
1.7.b-2	0,787	994	4,5	0,084	0,004
1.7.b-3	0,790	1001	4,4	0,192	0,011
1.7.b-4	1,075	896	3,9	0,247	0,011
1.7.b-5	0,819	951	4,1	0,179	0,011
1.7.b-6	0,708	894	3,9	0,159	0,012
1.7.b-7	0,811	766	3,4	0,188	0,013
1.7.b-8	0,810	949	4,2	0,196	0,016
1.7.b-9	0,937	943	3,8	0,228	0,013
1.7.b-10	1,476	954	4,0	0,373	0,014
1.7.c-1	1,488	1596	6,4	*	0,015
1.7.c-2	1,181	1694	7,1	0,267	0,015
1.7.c-3	1,079	1387	5,6	0,257	0,010
1.7.c-4	1,023	1524	6,2	*	0,015
1.7.c-5	1,120	1574	6,1	0,255	0,010
1.7.c-6	1,285	1374	5,5	0,338	0,011
1.7.c-7	2,404	1609	6,4	*	0,014
1.7.c-8	0,908	1603	6,4	0,231	0,011
1.7.c-9	1,524	1368	5,7	*	0,012
1.7.c-10	1,106	1448	6,0	0,273	0,012
1.7.c-11	0,867	1495	6,0	0,208	0,012

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 27: Bruchenergiekennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Arbeit, korrigierte Arbeit, spezifische Bruchenergie nach RILEM, neue spezifische Bruchenergie)

Bez.	W_0 [Nmm]	W [J]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
1.7.a-1	419,4	0,6199	113,6	103,1
1.7.a-2	358,3	0,5335	107,8	97,7
1.7.a-3	447,0	0,6702	126,0	113,1
1.7.a-4	464,8	0,7140	139,7	124,2
1.7.a-5	344,2	0,4843	94,7	88,1
1.7.a-6	373,8	0,6211	114,6	101,3
1.7.a-7	321,3	0,4662	88,3	80,9
1.7.a-8	326,2	0,4637	88,1	78,9
1.7.a-9	304,7	0,4614	91,8	82,2
1.7.a-10	343,0	0,5956	117,2	102,6
1.7.a-11	373,2	0,5759	111,0	99,7
1.7.a-12	419,4	0,6199	113,6	103,1
1.7.b-1	429,7	0,8080	148,2	131,4
1.7.b-2	267,5	0,4326	82,5	72,1
1.7.b-3	284,6	0,4504	84,4	76,6
1.7.b-4	286,6	0,5104	96,8	83,8
1.7.b-5	284,3	0,4532	84,9	74,4
1.7.b-6	238,9	0,3868	73,3	66,5
1.7.b-7	219,6	0,3873	73,6	65,7
1.7.b-8	275,0	0,4446	84,1	76,0
1.7.b-9	264,9	0,4589	83,7	76,0
1.7.b-10	352,3	0,6637	120,1	105,0
1.7.c-1	667,7	0,9750	177,1	152,5
1.7.c-2	647,9	0,8953	165,1	149,9
1.7.c-3	521,4	0,7431	134,1	121,6
1.7.c-4	571,1	0,7822	142,6	129,1
1.7.c-5	624,3	0,8546	152,5	138,7
1.7.c-6	527,1	0,7913	142,7	128,1
1.7.c-7	875,0	1,3765	247,1	214,5
1.7.c-8	515,0	0,7036	127,3	116,3
1.7.c-9	564,2	0,8709	161,5	140,1
1.7.c-10	487,2	0,7067	131,1	120,1
1.7.c-11	482,2	0,6608	119,9	109,8

Tabelle 28: Gemessene Massen der ballistischen Untersuchung (Gesamtmasse des Probekörpers vor und nach der Perforation, Plattenmasse, Fragmentmasse und Massenverlust)

Bez.	m_v [g]	m_{Pl} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.7.a-1	11235	10945	286	11231	4
3.7.a-2	11000	10810	178	10988	12
3.7.a-3	11370	11145	212	11357	13
3.7.a-4	11140	10925	196	11121	19
3.7.a-5	11125	10860	248	11108	17
3.7.a-6	11000	10775	202	10977	23
3.7.a-7	10880	10645	209	10854	26
3.7.a-8	11155	10905	234	11139	16
3.7.a-9	11195	10800	375	11175	20
3.7.a-10	10865	10675	154	10829	36
3.7.a-11	11245	10960	252	11212	33
3.7.b-1	11280	11040	245	11285	-5
3.7.b-2	11015	10705	296	11001	14
3.7.b-3	10900	10640	237	10877	23
3.7.b-4	11385	11010	367	11377	8
3.7.b-5	10940	10715	215	10930	10
3.7.b-6	10990	10825	150	10975	15
3.7.b-7	11030	10775	235	11010	20
3.7.b-8	11055	10860	170	11030	25
3.7.b-9	11575	11375	181	11556	19
3.7.b-10	11810	11590	209	11799	11
3.7.b-11	11205	10970	206	11176	29

Tabelle 29: Getrocknete Massen und Anzahl der Fragmente aufgeteilt nach den genutzten Methoden CPA bzw. SV

Bez.	m_{CPA} [g]	N_{CPA} [l]	m_{SV} [g]	N_{SV} [l]
3.7.a-1	212	3987442	66	4
3.7.a-2	158	3067842	12	1
3.7.a-3	174	2440656	31	3
3.7.a-4	168	2658835	18	2
3.7.a-5	182	2409912	57	3
3.7.a-6	183	3291363	22	1
3.7.a-7	175	2945298	27	2
3.7.a-8	189	2878723	39	3
3.7.a-9	216	2698737	153	6
3.7.a-10	148	3034796	0	0
3.7.a-11	214	2897364	39	4
3.7.b-1	164	2103186	74	4
3.7.b-2	217	1945672	71	4
3.7.b-3	201	2476859	29	1
3.7.b-4	216	2152973	146	4
3.7.b-5	149	2077791	60	4
3.7.b-6	141	1961411	0	0
3.7.b-7	172	2307143	71	3
3.7.b-8	154	2285752	10	1
3.7.b-9	175	1952636	0	0
3.7.b-10	141	1904114	62	3
3.7.b-11	190	2128709	9	1

Tabelle 30: Einzelne Bruchflächen der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Gesamtbruchfläche

Bez.	A_{CPA} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]	A_{GB} [cm ²]
3.7.a-1	3687	159	72	119	68	107	3862
3.7.a-2	*	29	53	86	48	77	*
3.7.a-3	2739	50	80	81	69	69	2812
3.7.a-4	2778	53	62	76	66	63	2841
3.7.a-5	2678	113	74	98	70	95	2800
3.7.a-6	3215	47	50	91	41	79	3283
3.7.a-7	3141	68	56	97	47	87	3229
3.7.a-8	3109	99	62	101	51	99	3221
3.7.a-9	3354	281	56	173	47	150	3667
3.7.a-10	2863	0	43	74	35	61	2884
3.7.a-11	3332	107	88	101	74	84	3471
3.7.b-1	2564	164	46	136	42	123	2746
3.7.b-2	2845	167	57	141	47	125	3038
3.7.b-3	2909	48	82	103	74	86	2981
3.7.b-4	2696	242	51	191	47	164	2968
3.7.b-5	2410	150	74	82	69	74	2572
3.7.b-6	2274	0	53	73	44	63	2293
3.7.b-7	2793	134	44	129	38	113	2948
3.7.b-8	2657	28	52	80	48	67	2702
3.7.b-9	2320	0	54	80	50	71	2332
3.7.b-10	2088	138	38	113	38	109	2230
3.7.b-11	2564	30	64	91	69	81	2599

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 31: Gemessene und berechnete Werte der Energie (Eintrittsenergie, Energiedifferenz, Austrittsenergie, Bruchenergie)

Bez.	$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$ [J]	ΔE [J]	$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$ [J]	$E_{V,T,Fragmente}/k_{\text{dyn}}$ [J]
3.7.a-1	2409	1310	1099	33,3
3.7.a-2	2397	*	*	*
3.7.a-3	2357	1212	1145	24,2
3.7.a-4	2424	1227	1197	24,5
3.7.a-5	2399	1520	878	24,1
3.7.a-6	2430	1389	1040	28,3
3.7.a-7	2358	1241	1117	27,8
3.7.a-8	2384	1153	1231	27,7
3.7.a-9	2373	1209	1164	31,6
3.7.a-10	2422	1191	1231	24,8
3.7.a-11	2408	1336	1072	29,9
3.7.b-1	1742	1231	511	23,6
3.7.b-2	1750	1174	575	26,2
3.7.b-3	1756	993	764	25,7
3.7.b-4	1731	1309	422	25,6
3.7.b-5	1739	960	779	22,1
3.7.b-6	1700	1192	508	19,7
3.7.b-7	1739	1170	569	25,4
3.7.b-8	1758	1080	679	23,3
3.7.b-9	1738	1159	579	20,1
3.7.b-10	1742	1317	425	19,2
3.7.b-11	1746	1134	612	22,4

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Anhang 6: w/z-Wert

Tabelle 32: Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Querschnittsfläche, dreidimensionale Bruchfläche, minimale Rauheit, fraktale Dimension)

Bez.	A_Q [mm ²]	A_{3D} [mm ²]	R_{min} [/]	D_{GS} [/]
1.5.a-1	5317,0	5890,8	1,108	2,021
1.5.a-2	5247,1	5760,1	1,098	2,030
1.5.a-3	5171,4	5667,2	1,096	2,031
1.5.a-4	5145,8	5693,0	1,106	2,032
1.5.a-5	5020,0	5505,1	1,097	2,025
1.5.a-6	5151,0	5782,6	1,123	2,035
1.5.a-7	5115,2	5593,3	1,093	2,032
1.5.a-8	5166,2	5690,4	1,101	2,029
1.5.a-9	5159,7	5627,0	1,091	2,025
1.5.a-10	5075,3	5528,8	1,089	2,030
1.5.a-11	5242,4	5764,4	1,100	2,025
1.5.a-12	5110,6	5486,8	1,074	2,026
1.5.b-1	5499,4	6053,1	1,101	2,024
1.5.b-2	5368,9	5816,8	1,083	2,028
1.5.b-3	5381,3	5951,1	1,106	2,031
1.5.b-4	5232,5	5718,3	1,093	2,026
1.5.b-5	5634,1	6082,7	1,080	2,031
1.5.b-6	5130,0	5517,7	1,076	2,026
1.5.b-7	5033,9	5525,5	1,098	2,024
1.5.b-8	5292,0	5831,6	1,102	2,033
1.5.b-9	5379,0	5943,4	1,105	2,027
1.5.b-10	5092,7	5517,9	1,083	2,028
1.5.b-11	4880,6	5479,0	1,123	2,024
1.5.b-12	5115,5	5706,8	1,116	2,028

Tabelle 33: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung (Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft)

Bez.	δ_0 [mm]	F_{\max} [N]	$f_{ct,fl}$ [N/mm ²]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,\max}$ [mm]
1.5.a-1	0,690	1249	5,3	0,354	0,008
1.5.a-2	0,693	1312	5,8	0,153	0,008
1.5.a-3	0,754	1266	5,8	0,172	0,008
1.5.a-4	0,615	1228	5,6	0,132	0,010
1.5.a-5	1,115	1214	5,8	0,253	0,013
1.5.a-6	0,918	1381	6,4	0,208	0,010
1.5.a-7	0,750	1246	5,8	0,172	0,014
1.5.a-8	1,127	1078	4,9	0,272	0,009
1.5.a-9	0,845	1174	5,5	0,187	0,011
1.5.a-10	0,725	1272	6,0	0,150	0,013
1.5.a-11	1,002	1286	5,7	0,232	0,007
1.5.a-12	0,699	1294	6,0	0,148	0,010
1.5.b-1	1,067	1327	5,4	0,181	0,009
1.5.b-2	1,011	1515	6,4	0,198	0,009
1.5.b-3	0,961	1517	6,4	0,223	0,008
1.5.b-4	0,781	1367	6,1	0,169	0,008
1.5.b-5	0,714	1548	6,0	0,143	0,008
1.5.b-6	0,591	1193	5,6	0,123	0,007
1.5.b-7	0,786	1216	5,9	0,180	0,012
1.5.b-8	0,788	1439	6,2	0,180	0,011
1.5.b-9	0,881	1392	5,8	0,197	0,010
1.5.b-10	0,603	1335	6,4	0,139	0,012
1.5.b-11	1,176	1543	7,7	0,241	0,010
1.5.b-12	0,770	1497	7,0	0,180	0,012

Tabelle 34: Bruchenergiekennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Arbeit, korrigierte Arbeit, spezifische Bruchenergie nach RILEM, neue spezifische Bruchenergie)

Bez.	W_0 [Nmm]	W [J]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
1.5.a-1	294,7	0,4379	82,4	74,3
1.5.a-2	352,0	0,4949	94,3	85,9
1.5.a-3	313,2	0,4698	90,9	82,9
1.5.a-4	310,7	0,4374	85,0	76,8
1.5.a-5	369,8	0,5927	118,1	107,7
1.5.a-6	378,1	0,5695	110,6	98,5
1.5.a-7	344,2	0,5008	97,9	89,5
1.5.a-8	354,6	0,5913	114,5	103,9
1.5.a-9	371,4	0,5472	106,0	97,2
1.5.a-10	356,2	0,5029	99,1	91,0
1.5.a-11	373,0	0,5826	111,1	101,1
1.5.a-12	316,9	0,4598	90,0	83,8
1.5.b-1	559,5	0,7838	142,5	129,5
1.5.b-2	573,1	0,7857	146,4	135,1
1.5.b-3	413,1	0,6166	114,6	103,6
1.5.b-4	384,4	0,5475	104,6	95,7
1.5.b-5	453,7	0,6051	107,4	99,5
1.5.b-6	298,9	0,4225	82,4	76,6
1.5.b-7	343,6	0,5068	100,7	91,7
1.5.b-8	454,6	0,6191	117,0	106,2
1.5.b-9	415,0	0,6004	111,6	101,0
1.5.b-10	345,3	0,4680	91,9	84,8
1.5.b-11	543,3	0,7814	160,1	142,6
1.5.b-12	414,0	0,5738	112,2	100,5

Tabelle 35: Gemessene Massen der ballistischen Untersuchung (Gesamtmasse des Probekörpers vor und nach der Perforation, Plattenmasse, Fragmentmasse und Massenverlust)

Bez.	m_v [g]	m_{Pl} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.5.a-1	11015	10580	424	11004	11
3.5.a-2	11330	10910	401	11311	19
3.5.a-3	11050	10600	428	11028	22
3.5.a-4	10940	10590	356	10946	-5
3.5.a-5	11810	11330	465	11795	15
3.5.a-6	11420	11040	385	11425	-4
3.5.a-7	11530	11140	370	11510	20
3.5.a-8	11600	11110	478	11588	12
3.5.a-9	10770	10280	468	10748	23
3.5.a-10	11700	11180	496	11676	24
3.5.b-1	11275	10845	419	11264	11
3.5.b-2	11385	10845	496	11341	44
3.5.b-3	11075	10780	296	11076	-1
3.5.b-4	11715	11325	370	11695	20
3.5.b-5	11175	10790	376	11166	10
3.5.b-6	11155	10655	493	11148	7
3.5.b-7	11035	10655	380	11035	1
3.5.b-8	11465	11085	374	11459	6
3.5.b-9	11915	11465	434	11899	16
3.5.b-10	11465	10990	465	11455	10
3.5.b-11	11475	10810	629	11439	36

Tabelle 36: Getrocknete Massen und Anzahl der Fragmente aufgeteilt nach den genutzten Methoden CPA bzw. SV

Bez.	m_{CPA} [g]	N_{CPA} [l]	m_{SV} [g]	N_{SV} [l]
3.5.a-1	254	6166911	160	16
3.5.a-2	235	3619760	157	11
3.5.a-3	206	2293564	206	16
3.5.a-4	228	5556946	112	11
3.5.a-5	255	2881743	199	16
3.5.a-6	245	5339540	125	11
3.5.a-7	241	4337643	113	12
3.5.a-8	289	4272256	174	20
3.5.a-9	284	3780769	168	18
3.5.a-10	245	4822117	234	14
3.5.b-1	272	5093116	133	10
3.5.b-2	282	4447717	198	8
3.5.b-3	254	3337193	26	4
3.5.b-4	237	3480941	117	10
3.5.b-5	229	4306989	130	11
3.5.b-6	233	3702436	230	15
3.5.b-7	278	4195694	84	10
3.5.b-8	263	4274193	97	6
3.5.b-9	259	2892980	161	13
3.5.b-10	336	3786400	112	12
3.5.b-11	325	3677936	289	20

Tabelle 37: Einzelne Bruchflächen der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Gesamtbruchfläche

Bez.	A_{CPA} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]	A_{GB} [cm ²]
3.5.a-1	4890	398	100	167	88	132	5335
3.5.a-2	4022	356	121	125	106	109	4409
3.5.a-3	2385	455	97	161	86	146	2867
3.5.a-4	4602	273	93	127	84	101	4909
3.5.a-5	3222	443	122	150	71	127	3738
3.5.a-6	4757	312	96	146	82	118	5111
3.5.a-7	4043	288	118	146	81	117	4396
3.5.a-8	4514	466	106	164	72	164	5014
3.5.a-9	4123	393	99	177	83	151	4558
3.5.a-10	4538	496	89	210	85	168	5079
3.5.b-1	4558	309	71	190	52	173	4903
3.5.b-2	*	337	90	204	73	177	*
3.5.b-3	3460	74	77	125	62	120	3554
3.5.b-4	3805	284	83	161	73	135	4125
3.5.b-5	3860	331	63	180	49	161	4224
3.5.b-6	4160	519	111	189	58	191	4731
3.5.b-7	4185	226	136	208	80	126	4548
3.5.b-8	3902	223	95	169	77	136	4176
3.5.b-9	3288	377	102	203	85	168	3717
3.5.b-10	4027	291	83	186	79	166	4343
3.5.b-11	4631	646	145	192	125	194	5295

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 38: Gemessene und berechnete Werte der Energie (Eintrittsenergie, Energiedifferenz, Austrittsenergie, Bruchenergie)

Bez.	$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$ [J]	ΔE [J]	$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$ [J]	$E_{V,T,Fragmente}/k_{\text{dyn}}$ [J]
3.5.a-1	3529	1680	1850	48,6
3.5.a-2	3606	1599	2007	40,2
3.5.a-3	3591	1759	1832	26,1
3.5.a-4	3561	1480	2082	44,7
3.5.a-5	3647	1495	2151	34,1
3.5.a-6	3609	1829	1779	46,6
3.5.a-7	3569	1654	1915	40,1
3.5.a-8	3601	1418	2183	45,7
3.5.a-9	3539	1381	2158	41,5
3.5.a-10	3609	1657	1952	46,3
3.5.b-1	3569	1568	2001	51,8
3.5.b-2	3547	*	*	*
3.5.b-3	3599	1523	2075	37,5
3.5.b-4	3573	1554	2019	43,6
3.5.b-5	3554	1639	1915	44,6
3.5.b-6	3604	1712	1891	50,0
3.5.b-7	3630	1691	1940	48,0
3.5.b-8	3594	1826	1767	44,1
3.5.b-9	3589	1963	1626	39,2
3.5.b-10	3564	1726	1838	45,9
3.5.b-11	3564	1848	1716	55,9

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Anhang 7: Größtkorndurchmesser

Tabelle 39: Oberflächenkennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Querschnittsfläche, dreidimensionale Bruchfläche, minimale Rauheit, fraktale Dimension)

Bez.	A_Q [mm ²]	A_{3D} [mm ²]	R_{min} [°]	D_{GS} [°]
1.6.a-1	5549,5	6047,6	1,090	2,027
1.6.a-2	5667,5	6148,0	1,085	2,029
1.6.a-3	5625,7	6087,9	1,082	2,029
1.6.a-4	5492,4	5953,2	1,084	2,026
1.6.a-5	5639,7	6060,0	1,075	2,025
1.6.a-6	5645,9	6129,2	1,086	2,028
1.6.a-7	5656,0	6149,5	1,087	2,028
1.6.a-8	5709,3	6164,8	1,080	2,023
1.6.a-9	5579,4	6021,0	1,079	2,025
1.6.a-10	5665,0	6078,6	1,073	2,026
1.6.a-11	5479,6	5934,1	1,083	2,027
1.6.a-12	5527,5	5995,4	1,085	2,027
1.6.b-1	5251,3	5645,4	1,075	2,027
1.6.b-2	5298,3	5595,6	1,056	2,023
1.6.b-3	5359,6	5718,1	1,067	2,023
1.6.b-4	5155,8	5513,1	1,069	2,019
1.6.b-5	5130,6	5437,1	1,060	2,022
1.6.b-6	5326,5	5777,6	1,085	2,022
1.6.b-7	5125,5	5511,8	1,075	2,028
1.6.b-8	5441,5	5764,4	1,059	2,022
1.6.b-9	5313,0	5711,4	1,075	2,015
1.6.b-10	5216,8	5564,3	1,067	2,015
1.6.b-11	5301,6	5679,8	1,071	2,018
1.6.c-1	5181,6	5222,8	1,008	2,003
1.6.c-2	4801,5	4940,2	1,029	2,004
1.6.c-3	5247,7	5290,1	1,008	2,003
1.6.c-4	5268,4	5326,5	1,011	2,002
1.6.c-5	4913,1	4951,5	1,008	2,003
1.6.c-6	4924,9	4960,5	1,007	2,003
1.6.c-7	5140,9	5234,6	1,018	2,004
1.6.c-8	5154,5	5239,3	1,016	2,003
1.6.c-9	5080,0	5190,0	1,022	2,004
1.6.c-10	4930,1	4976,1	1,009	2,003
1.6.c-11	5070,0	5276,9	1,041	2,004

Tabelle 40: Gemessene Werte der bruchmechanischen Untersuchung (Durchbiegung, Maximalkraft, Rissöffnung vor dem Versagen und Rissöffnung beim Erreichen der Maximalkraft)

Bez.	δ_0 [mm]	F_{\max} [N]	$f_{ct,fl}$ [N/mm ²]	$w_{\delta,0}$ [mm]	$w_{F,\max}$ [mm]
1.6.a-1	0,682	1266	5,0	0,179	0,009
1.6.a-2	0,813	1262	4,9	0,198	0,011
1.6.a-3	0,814	1202	4,6	0,185	0,010
1.6.a-4	0,727	1172	4,8	0,157	0,009
1.6.a-5	0,663	1249	4,8	0,175	0,012
1.6.a-6	0,901	1401	5,3	0,307	0,012
1.6.a-7	0,761	1155	4,5	0,176	0,010
1.6.a-8	0,829	1231	4,6	0,207	0,011
1.6.a-9	0,789	1170	4,6	0,182	0,010
1.6.a-10	0,637	1190	4,6	*	0,009
1.6.a-11	0,745	1249	5,1	0,177	0,010
1.6.a-12	0,847	1277	5,0	0,190	0,011
1.6.b-1	0,887	1056	4,6	0,270	0,015
1.6.b-2	0,818	1095	4,8	*	0,017
1.6.b-3	0,615	1081	4,6	0,175	0,015
1.6.b-4	0,721	986	4,5	0,219	0,015
1.6.b-5	0,690	943	4,2	0,153	0,009
1.6.b-6	0,759	1013	4,3	0,234	0,012
1.6.b-7	0,716	932	4,3	0,209	0,013
1.6.b-8	0,736	903	3,7	0,220	0,013
1.6.b-9	0,566	954	4,1	0,164	0,013
1.6.b-10	0,740	1033	4,6	0,205	0,009
1.6.b-11	0,761	1004	4,3	0,217	0,012
1.6.c-1	0,301	691	3,1	0,180	0,007
1.6.c-2	0,267	581	3,0	*	0,008
1.6.c-3	0,330	645	2,9	*	0,008
1.6.c-4	0,326	744	3,3	*	0,009
1.6.c-5	0,289	421	2,1	*	0,007
1.6.c-6	0,221	476	2,4	0,069	0,007
1.6.c-7	0,255	580	2,7	*	0,008
1.6.c-8	0,253	548	2,5	*	0,007
1.6.c-9	0,295	508	2,4	0,107	0,008
1.6.c-10	0,292	633	3,1	*	0,008
1.6.c-11	0,216	482	2,3	0,142	0,006

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 41: Bruchenergiekennwerte der bruchmechanischen Untersuchung (Arbeit, korrigierte Arbeit, spezifische Bruchenergie nach RILEM, neue spezifische Bruchenergie)

Bez.	W_0 [Nmm]	W [J]	$G_{F,RILEM}$ [N/m]	$G_{F,3D}$ [N/m]
1.6.a-1	313,8	0,4527	81,6	74,9
1.6.a-2	341,4	0,5062	89,3	82,3
1.6.a-3	332,4	0,4928	87,6	80,9
1.6.a-4	306,3	0,4546	82,8	76,4
1.6.a-5	323,8	0,4576	81,1	75,5
1.6.a-6	483,5	0,6671	118,1	108,8
1.6.a-7	315,3	0,4712	83,3	76,6
1.6.a-8	327,9	0,4981	87,2	80,8
1.6.a-9	315,6	0,4762	85,3	79,1
1.6.a-10	287,6	0,4163	73,5	68,5
1.6.a-11	340,1	0,4921	89,8	82,9
1.6.a-12	366,7	0,5347	96,7	89,2
1.6.b-1	343,2	0,5139	97,9	91,0
1.6.b-2	310,9	0,4744	89,5	84,8
1.6.b-3	292,2	0,4145	77,3	72,5
1.6.b-4	269,6	0,4013	77,8	72,8
1.6.b-5	285,5	0,4140	80,7	76,1
1.6.b-6	278,0	0,4268	80,1	73,9
1.6.b-7	267,9	0,4052	79,0	73,5
1.6.b-8	277,2	0,4176	76,8	72,5
1.6.b-9	237,8	0,3469	65,3	60,7
1.6.b-10	275,8	0,4226	81,0	75,9
1.6.b-11	297,9	0,4484	84,6	79,0
1.6.c-1	102,6	0,1497	28,9	28,7
1.6.c-2	78,1	0,1181	24,6	23,9
1.6.c-3	102,8	0,1550	29,5	29,3
1.6.c-4	116,2	0,1682	31,9	31,6
1.6.c-5	61,1	0,1057	21,5	21,3
1.6.c-6	54,3	0,0885	18,0	17,8
1.6.c-7	74,9	0,1152	22,4	22,0
1.6.c-8	70,8	0,1100	21,3	21,0
1.6.c-9	73,9	0,1196	23,5	23,0
1.6.c-10	92,5	0,1375	27,9	27,6
1.6.c-11	51,4	0,0854	16,8	16,2

Tabelle 42: Gemessene Massen der ballistischen Untersuchung (Gesamtmasse des Probekörpers vor und nach der Perforation, Plattenmasse, Fragmentmasse und Massenverlust)

Bez.	m_v [g]	m_{PI} [g]	m_{Fr} [g]	m_n [g]	Verlust [g]
3.6.a-1	10640	10405	219	10624	16
3.6.a-2	11060	10825	222	11047	13
3.6.a-3	10815	10535	277	10812	3
3.6.a-4	10915	10655	249	10904	11
3.6.a-5	10775	10555	204	10759	16
3.6.a-6	10665	10514	165	10805	-14
3.6.a-7	10915	10670	227	10897	18
3.6.a-8	11075	10780	278	11058	18
3.6.a-9	10745	10540	183	10723	22
3.6.a-10	10520	10315	201	10516	4
3.6.a-11	10710	10440	244	10684	26
3.6.b-1	10155	10065	95	10160	-5
3.6.b-2	10155	10040	106	10146	10
3.6.b-3	9980	9855	110	9965	15
3.6.b-4	10215	10075	149	10224	-9
3.6.b-5	10730	10595	136	10731	-1
3.6.b-6	10560	10385	191	10576	-16
3.6.b-7	10265	10060	189	10249	17
3.6.b-8	10400	10235	155	10390	11
3.6.b-9	10215	10100	129	10229	-14
3.6.b-10	10225	10120	122	10242	-16
3.6.c-1	7950	7397*	511	7908	42
3.6.c-2	7740	7116*	594	7710	30
3.6.c-3	7930	6873*	1029	7902	28
3.6.c-4	7910	7439*	445	7884	26
3.6.c-5	7810	7308*	482	7790	21
3.6.c-6	7968	7274*	701	7975	-7
3.6.c-7	7885	7198*	678	7875	10
3.6.c-8	7750	7029*	712	7741	10
3.6.c-9	7817	6827*	985	7812	5
3.6.c-10	8084	7357*	1060	8073	11

*: Platte gebrochen, Summe der Einzelteile der Platte

Tabelle 43: Getrocknete Massen und Anzahl der Fragmente aufgeteilt nach den genutzten Methoden CPA bzw. SV

Bez.	m_{CPA} [g]	N_{CPA} [l]	m_{SV} [g]	N_{SV} [l]
3.6.a-1	186	3825676	21	1
3.6.a-2	184	3729741	23	2
3.6.a-3	217	3766807	47	3
3.6.a-4	202	3675384	28	1
3.6.a-5	191	3747187	0	0
3.6.a-6	132	2152336	18	1
3.6.a-7	167	3840451	43	3
3.6.a-8	215	2610869	48	3
3.6.a-9	170	3370191	0	0
3.6.a-10	181	1750515	7	1
3.6.a-11	192	2665308	37	2
3.6.b-1	70	2433327	10	3
3.6.b-2	84	1802193	6	1
3.6.b-3	153	3401300	12	3
3.6.b-4	101	1811539	29	4
3.6.b-5	90	3105884	30	5
3.6.b-6	77	2109106	99	7
3.6.b-7	127	3122015	47	6
3.6.b-8	110	2668500	29	3
3.6.b-9	86	3001543	28	4
3.6.b-10	74	2742217	34	6
3.6.c-1	220	2046127	275	24
3.6.c-2	278	2362076	298	34
3.6.c-3	355	1915043	657	26
3.6.c-4	192	1875985	237	19
3.6.c-5	256	1638073	208	20
3.6.c-6	249	2000515	427	36
3.6.c-7	271	2096987	392	34
3.6.c-8	216	2260921	482	30
3.6.c-9	273	2134085	692	47
3.6.c-10	191	1845696	474	42

Tabelle 44: Einzelne Bruchflächen der unterschiedlichen Betrachtungsebenen und Gesamtbruchfläche

Bez.	A_{CPA} [cm ²]	A_{SV} [cm ²]	$A_{VS,3D}$ [cm ²]	$A_{RS,3D}$ [cm ²]	$A_{VS,Ori}$ [cm ²]	$A_{RS,Ori}$ [cm ²]	A_{FV} [cm ²]	A_{GB} [cm ²]
3.6.a-1	3307	43	63	98	49	71	-	3391
3.6.a-2	3183	64	79	88	63	67	-	3283
3.6.a-3	*	123	63	120	54	97	-	*
3.6.a-4	3605	61	69	102	56	84	-	3697
3.6.a-5	3711	0	60	88	53	73	-	3733
3.6.a-6	2195	49	72	64	63	48	-	2270
3.6.a-7	3280	99	80	94	67	74	-	3412
3.6.a-8	2773	113	61	123	48	110	-	2913
3.6.a-9	3319	0	60	79	46	62	-	3349
3.6.a-10	2064	24	80	82	69	62	-	2119
3.6.a-11	2860	86	70	96	67	78	-	2966
3.6.b-1	1860	42	36	54	30	36	-	1925
3.6.b-2	1469	21	39	57	35	44	-	1507
3.6.b-3	2354	49	42	58	38	45	-	2421
3.6.b-4	1738	91	37	87	30	70	-	1854
3.6.b-5	2691	106	53	69	48	51	-	2820
3.6.b-6	1699	265	39	125	32	103	-	1993
3.6.b-7	2689	154	64	91	52	73	-	2875
3.6.b-8	2125	80	54	80	45	64	-	2231
3.6.b-9	2137	94	64	51	51	38	-	2257
3.6.b-10	2085	113	37	75	33	54	-	2222
3.6.c-1	2819	761	-	-	-	-	468	4048
3.6.c-2	3466	947	-	-	-	-	404	4818
3.6.c-3	3456	1254	-	-	-	-	285	4996
3.6.c-4	2761	667	-	-	-	-	373	3801
3.6.c-5	3009	604	-	-	-	-	570	4183
3.6.c-6	3300	1118	-	-	-	-	569	4987
3.6.c-7	3374	1009	-	-	-	-	647	5030
3.6.c-8	3435	1092	-	-	-	-	436	4963
3.6.c-9	3061	1652	-	-	-	-	434	5147
3.6.c-10	2991	1256	-	-	-	-	619	4866

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Tabelle 45: Gemessene und berechnete Werte der Energie (Eintrittsenergie, Energiedifferenz, Austrittsenergie, Bruchenergie)

Bez.	$E_{\text{kin,Projektil,Eintritt}}$ [J]	ΔE [J]	$E_{\text{kin,Projektil,Austritt}}$ [J]	$E_{\text{V,T,Fragmente}}/k_{\text{dyn}}$ [J]
3.6.a-1	3484	1339	2145	27,6
3.6.a-2	3564	1216	2347	26,7
3.6.a-3	3611	*	*	*
3.6.a-4	3596	1282	2314	30,1
3.6.a-5	3569	1208	2361	30,4
3.6.a-6	3606	1279	2328	18,5
3.6.a-7	3693	1265	2428	27,7
3.6.a-8	3693	1272	2422	23,7
3.6.a-9	3671	1303	2368	27,2
3.6.a-10	3648	1081	2566	17,2
3.6.a-11	3696	988	2708	24,1
3.6.b-1	3611	1297	2314	14,6
3.6.b-2	3596	988	2608	11,4
3.6.b-3	3619	1074	2545	18,3
3.6.b-4	3566	1172	2394	14,0
3.6.b-5	3532	1124	2408	21,3
3.6.b-6	3634	1165	2469	15,1
3.6.b-7	3559	1014	2545	21,8
3.6.b-8	3589	973	2615	16,9
3.6.b-9	3594	936	2658	17,1
3.6.b-10	3632	1080	2552	16,8
3.6.c-1	3644	710	2935	9,7
3.6.c-2	3574	758	2816	11,5
3.6.c-3	3632	637	2995	11,9
3.6.c-4	3584	672	2912	9,1
3.6.c-5	3574	519	3055	10,0
3.6.c-6	3579	644	2935	11,9
3.6.c-7	3584	738	2846	12,0
3.6.c-8	3561	537	3025	11,9
3.6.c-9	3584	506	3078	12,3
3.6.c-10	3581	706	2875	11,6

*: Wert konnte nicht ermittelt werden

Anhang 8: Erweiterte Untersuchungen

A.8.1 Vergleich der CPA-Ergebnisse mit Ergebnissen einer herkömmlichen Siebanalyse

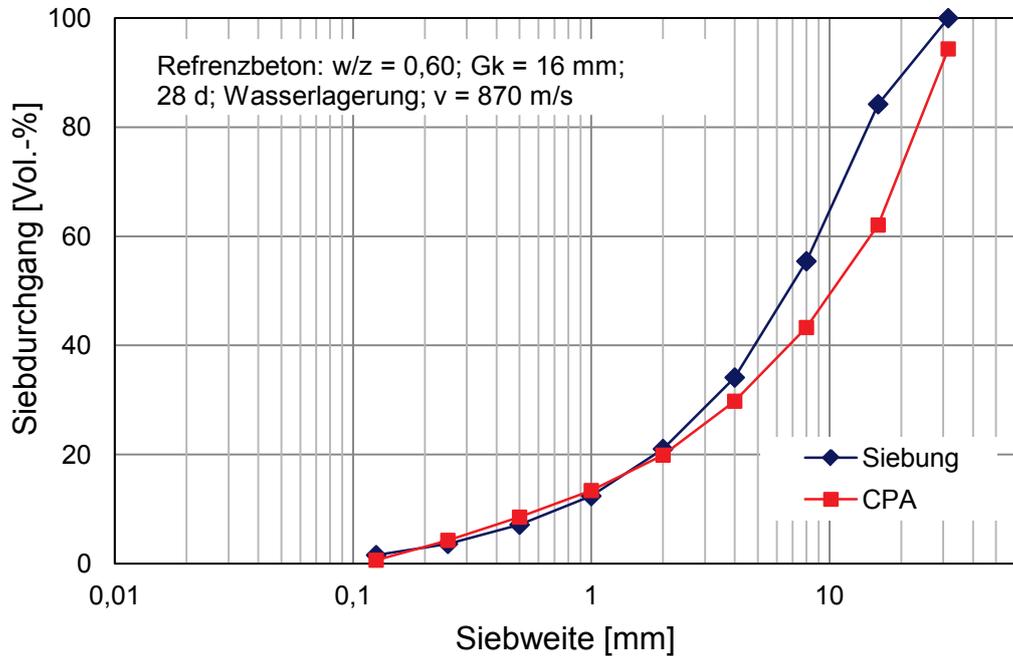


Abbildung A.1: Siebdurchgang einer herkömmlichen Siebung und der CPA

A.8.2 Reproduzierbarkeit der CPA-Ergebnisse

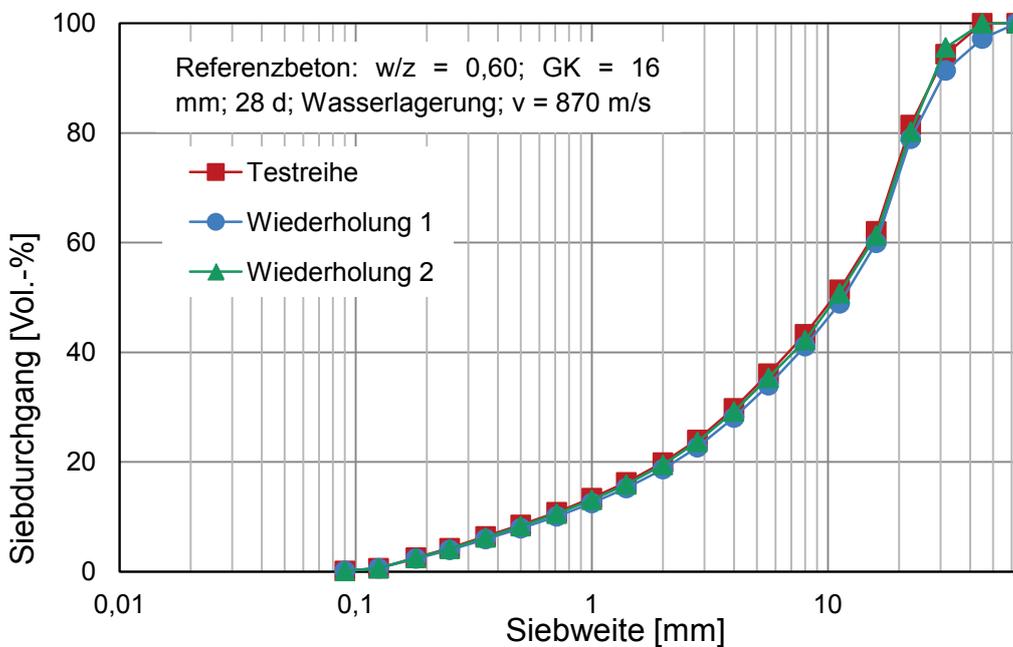


Abbildung A.2: Siebdurchgänge der Wiederholungsversuche der CPA-Untersuchung

A.8.3 Oberfläche der Fragmente unterschiedlicher Grundmodelle

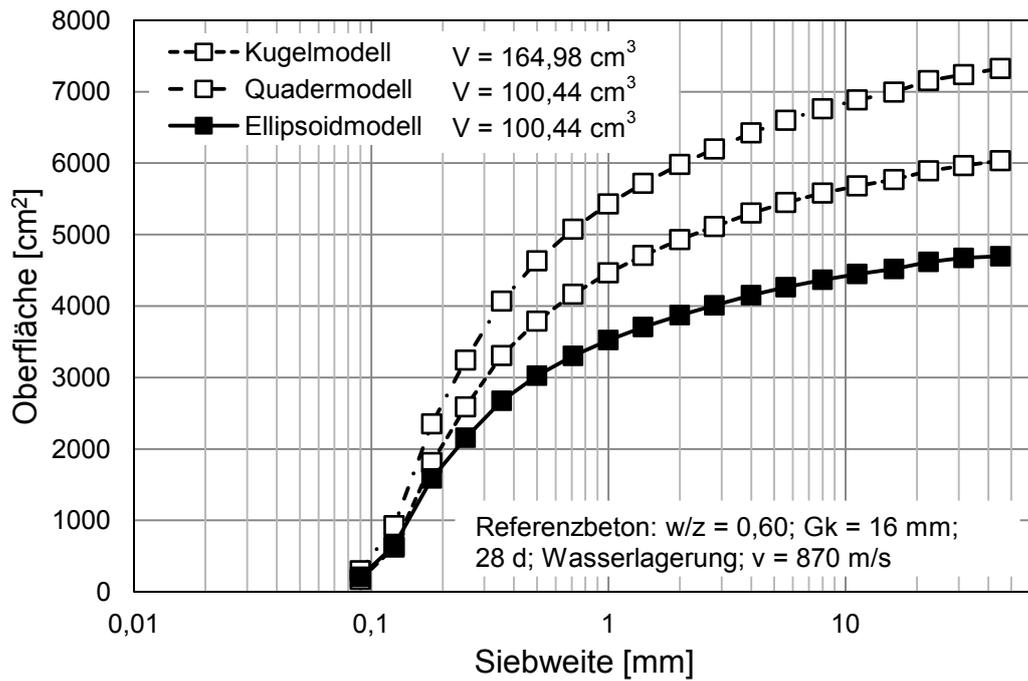


Abbildung A.3: Vergleich unterschiedlicher Fragmentmodelle

A.8.4 Mikroskopaufnahmen verschieden großer Fragmente

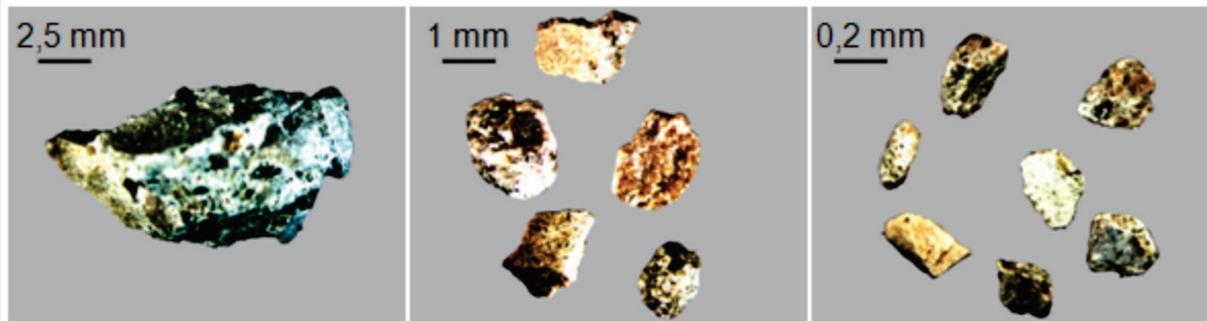


Abbildung A.4: Mikroskopaufnahmen unterschiedlich großer Partikel

A.8.5 Manuelle Prüfung der dreidimensional-aufgenommenen Ausbruchkraterfläche

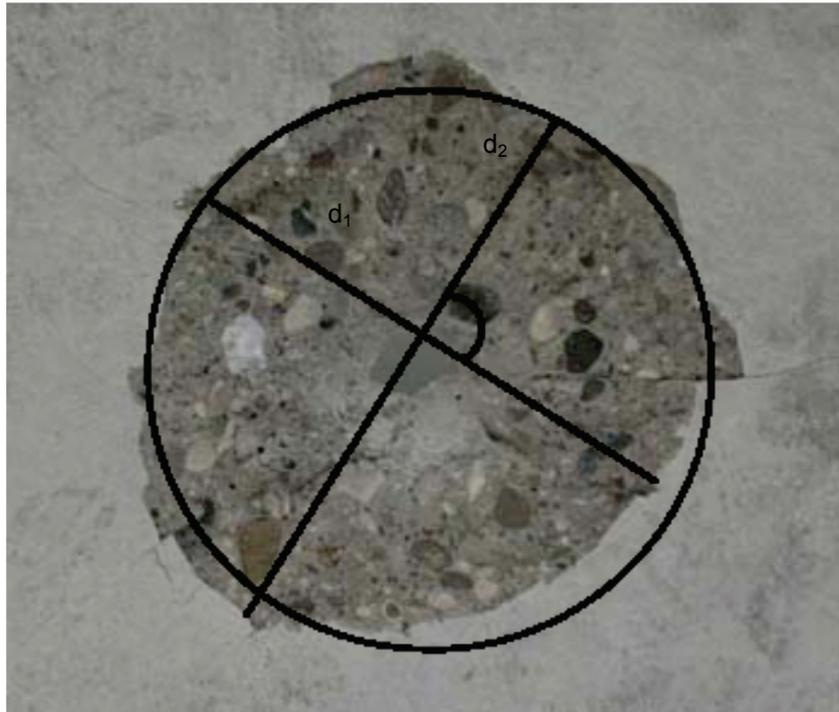


Abbildung A.5: Typischer Ausbruchkrater und Idealisierung zur Kreisgrundfläche eines Kegels durch d_1 und d_2

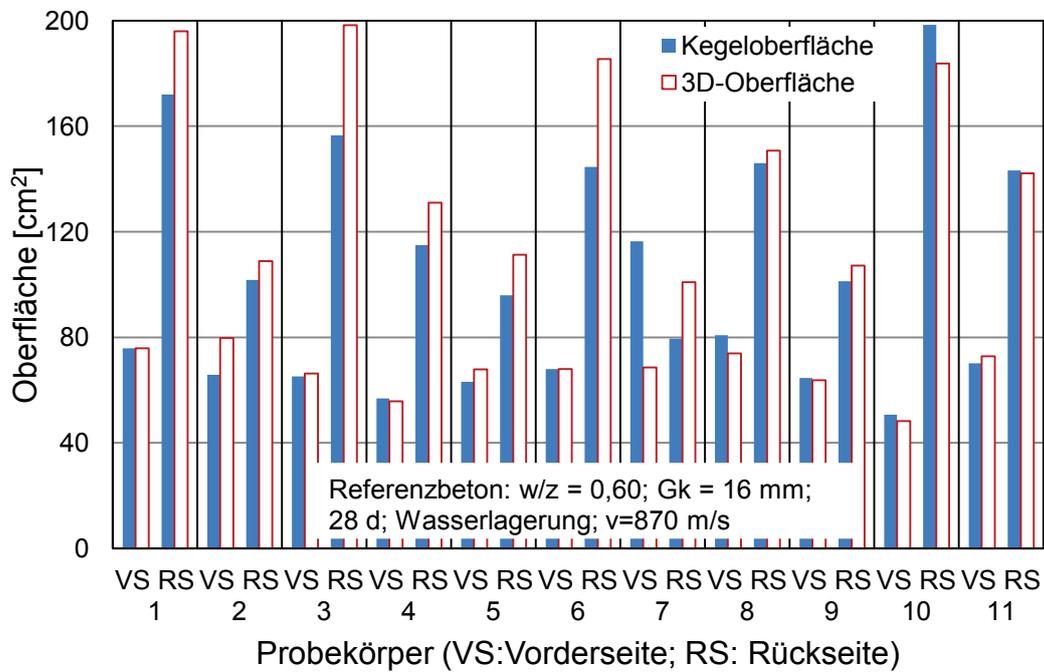


Abbildung A.6: Vergleich zwischen dreidimensionaler und Kegeloberfläche an den Ausbruchkratern der Vorder- und Rückseiten