

IGF-Vorhaben Nr.: 19822 N  
Bewilligungszeitraum: 01.01.2018 bis 30.04.2021  
Forschungsthema: Trocknung von Zementestrich/Abplatzen von Beton

## **1. Forschungsthema**

Einfluss der chemischen und physikalischen Eigenschaften von Zementstein auf das Trocknungsverhalten von Zementestrich und das Abplatzverhalten von Beton im Brandfall

## **2. Allgemeines**

Mit dem Forschungsvorhaben „Trocknung von Zementestrich/Abplatzen von Beton“ (IGF 19822 N) wurden Fragestellungen aus dem Vorläufervorhaben „Feuchte in Beton und Zementestrich“ (IGF-Vorhaben Nr. 17928 N) aufgegriffen und der dort definierte Forschungsbedarf in einen neuen Arbeitsplan umgesetzt.

Das Forschungsvorhaben umfasst die beiden Arbeitspakete

- Arbeitspaket 1 „Trocknung von Zementestrich“ (Abschnitt 3)
- Arbeitspaket 2 „Abplatzen von Beton“ (Abschnitt 4).

## **3. Arbeitspaket 1 „Trocknung von Zementestrich“**

### **3.1. Problemstellung**

Die Zementindustrie in Deutschland hat in den letzten Jahren den Anteil von Portlandzementen an der Gesamtproduktion deutlich reduziert und größere Anteile von CEM II-Zementen und CEM III-Zementen hergestellt. Dadurch, dass bei diesen Zementen der Portlandzementklinker durch andere Hauptbestandteile wie Hüttensand, Kalkstein oder Flugasche ersetzt wird, ist ihre Herstellung weniger energie- bzw. CO<sub>2</sub>-intensiv und somit umweltfreundlicher.

Im Sinne eines zügigen Baufortschritts haben Bauherren und bauausführende Firmen ein Interesse daran, dass Estriche möglichst bald nach ihrer Verlegung soweit getrocknet sind, dass ihre Belegreife erreicht ist. Unsicherheiten bezüglich des Trocknungsverhaltens von Estrichen mit CEM II- und CEM III-Zementen veranlassen Estrichleger derzeit häufig dazu, auf Estriche mit Portlandzement (CEM I) zurückzugreifen. Bei einer stärker klimapolitischen Bepreisung von Umweltfolgen kann dies neben den ökologischen Folgen auch wirtschaftliche Nachteile für Estrichleger und Bauherren nach sich ziehen.

Mit der Neufassung der DIN 18560-1 [1] im November 2015 wurde normativ festgelegt, dass die Messung des Feuchtegehalts eines Estrichs zur Bestimmung der Belegreife über die Calciumcarbid-Methode (CM-Methode) erfolgt. Im Vorläufervorhaben wurde gezeigt, dass der Feuchtegehalt im Zementestrich, ausgedrückt in CM- bzw. Masse-% nur indirekt einen Rückschluss darüber zulässt, wie groß der Masseverlust des Estrichs in Zukunft noch sein wird. Hierzu ist das Wissen um den Einfluss der Estrichrezeptur auf Porengrößenverteilung und Sorptionsisotherme des Zementsteins notwendig. Über die Festlegung von Maximalwerten für die CM-Feuchte, die anhand des Trocknungsverhaltens von Estrichen mit Portlandzement definiert wurden, werden z. B. Estriche mit hüttensandhaltigen Zementen erst deutlich später als belegreif erachtet.

Die Ergebnisse des Vorläufervorhabens (IGF 17928N) haben gezeigt, dass Estriche mit hütensandhaltigen Zementen bei üblichen Umgebungsbedingungen

- langsamer Feuchte an die Umgebung abgeben und
- höhere Gleichgewichtsfeuchten (in M.-%) aufweisen können als Estriche mit Portlandzement.

Gleichzeitig wurde dargelegt, dass eine höhere Gleichgewichtsfeuchte keine Einschränkung der Anwendung solcher Estriche bedeutet, da sie nicht impliziert, dass die Estriche beim Trocknen größere Feuchtemengen an die Umgebung abgeben, was Schäden an Fußbodenkonstruktionen nach sich ziehen könnte. Die Messung der relativen Baustofffeuchte und die Festlegung entsprechender Grenzwerte wäre eine Möglichkeit, die Belegreife unabhängig von der Porenverteilung und Sorptionsisotherme des Estrichs zu definieren.

### 3.2. Forschungsziel und durchgeführte Untersuchungen

Im Vorhaben IFG 19822N sollte untersucht werden, welche hygrometrischen Verfahren zur Feuchtebestimmung von Estrichen sinnvoll zum Einsatz kommen können.

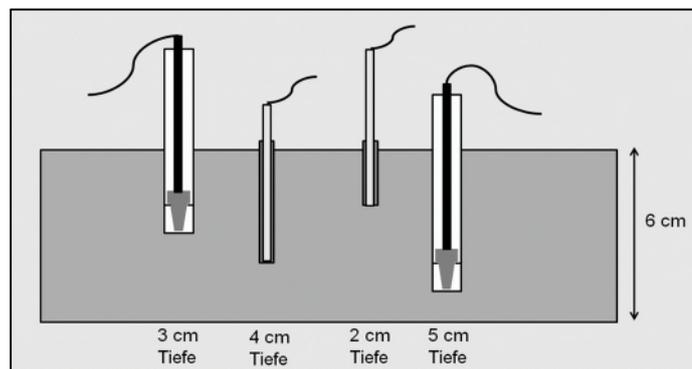
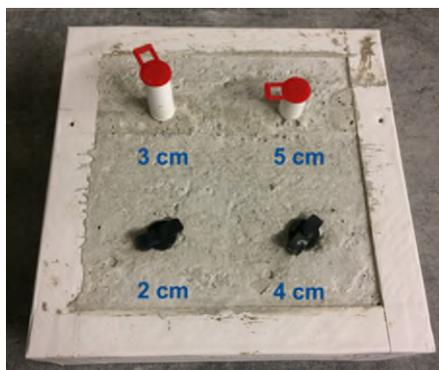
Es sollte überprüft werden, ob eine Messung und Bewertung der relativen Baustofffeuchte in Zementestrichen zu einer Beurteilung der Belegreife führt, die den Charakteristika verschiedener Zementarten hinsichtlich ihres Porengefüges und ihrer Sorptionsisothermen besser Rechnung trägt als der Feuchtegehalt im Zementestrich, ausgedrückt in CM- oder Masse-%.

### 3.3. Forschungsergebnisse

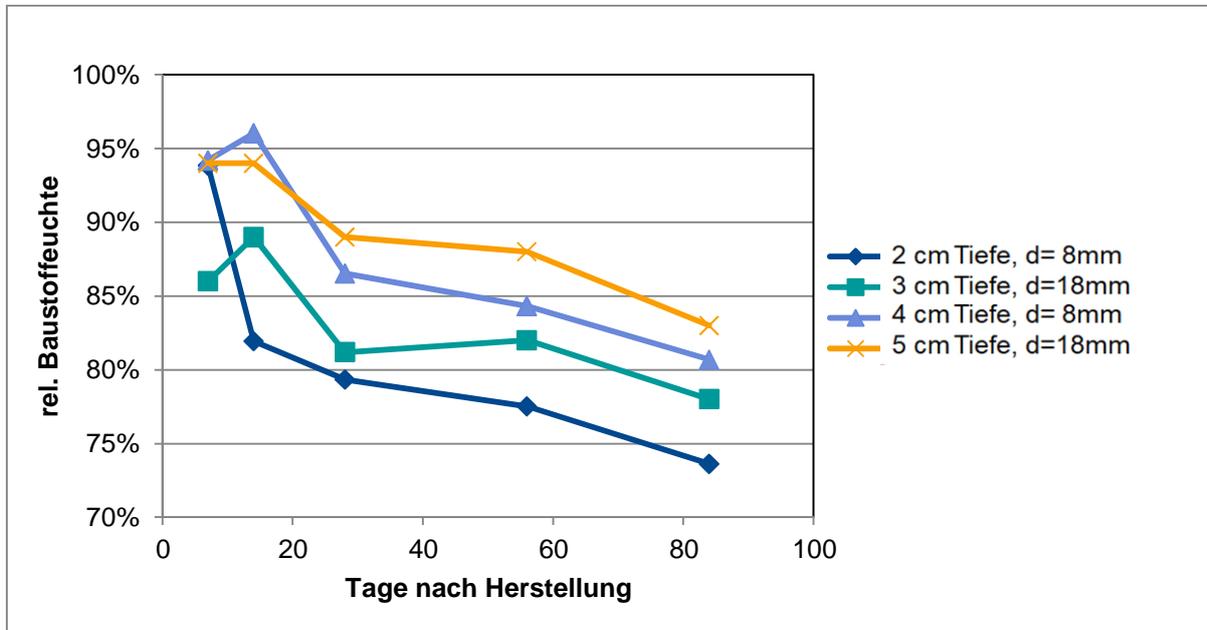
Neben der Calciumcarbid-Methode (CM-Prüfung) und der gravimetrischen Feuchtemessung (Darrtrocknung) kamen verschiedene Methoden zur Bestimmung der relativen Baustofffeuchte zur Anwendung, um den Trocknungsverlauf von Zementestrichen zu beurteilen:

- Bestimmung der relativen Feuchte im Stemmgut
- Bestimmung der relativen Feuchte an der Estrichoberfläche
- Bestimmung der relativen Feuchte über in den Estrich eingebrachte Messhülsen

Es zeigte sich, dass die Messung der relativen Feuchte von Estrichen gut geeignet ist, um die Trocknung eines Zementestrichs zu verfolgen und zu beurteilen, ob seine Belegreife erreicht ist. Insbesondere die Ermittlung der relativen Baustofffeuchte über Messhülsen, die in Bohrlöcher im Estrich eingebracht werden (**Bild 1**), erwies sich als praktikabel und lieferte plausible und reproduzierbare Ergebnisse. Als Beispiel ist in **Bild 2** die Entwicklung der relativen Feuchte eines trocknenden Estrichs dargestellt (Lagerung nach der Herstellung im Klima 20°C/65% rel. Feuchte).



**Bild 1** Beispiel eines Estrichprobekörpers mit Darstellung der Messhülsen (zwei verschiedene Bohrlöcher-/Messhülsendurchmesser 8mm und 18 mm)



**Bild 2** Entwicklung der über Messhülsen in Bohrlöchern ermittelten relativen Feuchte über am Beispiel eines Estrichs (Hochofenzement 330 kg/m<sup>3</sup>, w/z = 0,55, Fließmittel, Rheinkiessand B8);

**Fehler! Ungültiger Eigenverweis auf Textmarke.** stellt die Durchführung der CM-Prüfung und der Messung der relativen Feuchte in Messhülsen vergleichend gegenüber.

**Tabelle 1** Gegenüberstellung der CM-Messung und der Messung der relativen Baustofffeuchte über in den Estrich eingebrachte Messhülsen

CM-Prüfung	rel. Feuchte (Messhülsen)
relativ aufwändige Probenahme und Versuchsdurchführung; die Gewinnung einer nicht repräsentativen Probe verfälscht das Versuchsergebnis	Aus baupraktischer Sicht ist die Herstellung von Bohrlöchern wesentlich einfacher als die Probenahme für CM- oder Darrprüfung.
ein Messwert pro Probenahme	Am gleichen Bohrloch kann die Feuchte mehrfach zu verschiedenen Zeitpunkten gemessen werden.
Geeignet, um die mittlere Feuchte eines Estrichs zu bestimmen.	Aussage über <u>Feuchteverteilung</u> über die Höhe des Estrichs möglich.
	Messergebnis berücksichtigt unterschiedliche Sorptionsisothermen/Gleichgewichtsfeuchten verschiedener Estrichzusammensetzungen besser
Regelmäßige Überprüfung des Manometers (z. B. mit Referenzmaterial)	Überprüfung der Sonden in kurzen Zeitintervallen erforderlich!
Weitgehend temperaturunabhängig	Berücksichtigung der Temperatur bei der Auswertung erforderlich

Es konnte gezeigt werden, dass die relative Baustofffeuchte von Estrichen mit hüttensandhaltigen Zementen nach gleichen Trocknungszeiträumen ähnlich hoch oder sogar etwas geringer war als die von Estrichen mit Portlandzement oder Portlandkalksteinzementen. Dies belegt, dass keine Notwendigkeit besteht, die Anwendung solcher Estriche einzuschränken.

Geeignete Werte der relativen Baustofffeuchte sind als Grenzwerte für die Belegreife von Zementestrichen festzulegen. Die durchgeführten Vergleiche von Ergebnissen von CM-Messungen mit Messungen der relativen Baustofffeuchte deuten darauf hin, dass die bisher von der Technischen Kommission Bauklebstoffe (TKB) im Industrieverband Klebstoffe e.V. Düsseldorf vorgeschlagenen Werte ([2], [3]) zu konservativ sind.

## **4. Arbeitspaket 2 „Abplatzen von Beton“**

### **4.1. Problemstellung**

Wenn Betonbauteile im Brandfall hohen Temperaturen ausgesetzt sind, kann es unter ungünstigen Bedingungen zu explosiven Abplatzungen kommen, bei denen sich Betonstücke schlagartig von den betroffenen Bauteilen lösen und mit lauten, explosionsartigen Geräuschen fortgeschleudert werden. Dies kann zum Versagen der Bauteile führen. Während das Abplatzen im Brandfall in der Literatur häufig beschrieben wurde, wird der Mechanismus, der das Abplatzen auslöst, unter Wissenschaftlern weiterhin diskutiert.

Im Vorläufervorhaben (IGF 19822N) wurde gezeigt, dass es nicht nur bei hochfesten Betonen mit Silikastaub, sondern auch bei normalfesten Betonen mit Hochofenzement und Portlandflugaschezement bei den gewählten Versuchsbedingungen zum Abplatzen im Beton kam. Weiterhin wurde gezeigt, dass Porendruck im erhitzten Beton nicht, wie von einigen Wissenschaftlern vermutet, die Hauptursache für das Abplatzen sein kann. Auf dieser Grundlage wurden drei Hypothesen zur Frage formuliert, aus welchen Gründen bei den betroffenen Betonen Abplatzen auftrat. Diese Hypothesen wurden im vorliegenden Forschungsvorhaben überprüft.

### **4.2. Forschungsziel und durchgeführte Untersuchungen**

#### **4.2.1. Brandprüfungen an großformatigen Probekörpern**

Im Vorläufervorhaben wurden Versuche zum Abplatzen an relativ kleinen Probekörpern mit Abmessungen 300 mm x 300 mm x 120 mm sowie Elektroheizstrahlern durchgeführt. Bei üblichen Brandversuchen wird das Brandverhalten an größeren Probekörpern mit gasbefeuerter Öfen getestet. Es sollte überprüft werden, ob sich die Ergebnisse der kleinen Probekörper auf einen größeren Maßstab übertragen lassen. Hierzu wurden Brandprüfungen mit Einheitstemperaturkurve [4] an 14 Probekörpern mit den Abmessungen 800 mm x 700 mm x 240 mm an einer Brandprüfstelle durchgeführt.

#### **4.2.2. Überprüfung von drei Hypothesen zu den Ursachen des Abplatzens**

**Tabelle 2** fasst die drei Hypothesen zur Frage, warum es bei den in Abschnitt 4.1 genannten Betonen zum Abplatzen kam, sowie die zu ihrer Überprüfung durchgeführten Untersuchungen zusammen.

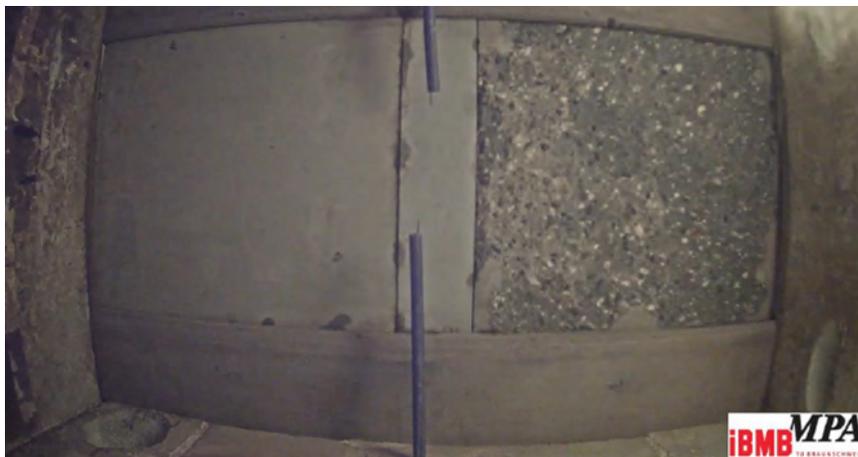
**Tabelle 2** Übersicht der drei überprüften Hypothesen zu den Ursachen des Abplatzens

Hypothese	Überprüfung durch
<p><b>Hypothese 1 (“moisture weakening”):</b> Ein höherer Feuchtegehalt wirkt sich ungünstig auf die mechanischen Eigenschaften des Betons beim Erhitzen aus. Der damit verbundene geringere Widerstand des Betons gegenüber den durch die hohen Temperaturen hervorgerufenen Einwirkungen ist für das Auftreten von explosivem Abplatzen verantwortlich oder trägt dazu bei.</p>	<p>Prüfung der Biegezug- und Druckfestigkeiten von erhitzten Betonprismen mit verschiedenen Feuchtegehalten.</p>
<p><b>Hypothese 2 (“Verhältnis der Hydratationsprodukte im Zementstein”):</b> Ein höherer Anteil an Calciumsilikathydraten im Zementstein führt im Temperaturbereich, in dem Abplatzen auftritt (&lt; 300 °C), zu stärkeren Unterschieden der thermischen Dehnungen in Abhängigkeit vom Abstand von der erhitzten Oberfläche. Diese Dehnungsunterschiede sind für das Auftreten von explosivem Abplatzen verantwortlich oder tragen dazu bei.</p>	<p>Messung der Temperaturentwicklung und der Dehnung von belasteten und unbelasteten, rohrförmigen Probekörpern</p>
<p><b>Hypothese 3 (“thermische Inkompatibilität, Übergangszone”):</b> Bei Betonen mit schwach ausgeprägter Übergangszone (ITZ), das heißt einem guten Verbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein-/Mörtelmatrix, führen die Unterschiede zwischen der thermischen Dehnung der Gesteinskörnung und des Zementsteins beim Erhitzen des Betons zu relevanten Zugspannungen im Zementstein. Diese Zugspannungen sind für das Auftreten von explosivem Abplatzen verantwortlich oder tragen dazu bei.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Untersuchung von Dünnschliffen</li> <li>– visuelle Beurteilung von Betonproben nach dem Erhitzen</li> <li>– exemplarische Bewertung des Spannungs-Verformungs-Verhältnisses von gekerbten Probekörpern unter Biegebeanspruchung</li> </ul>

### 4.3. Forschungsergebnisse

#### 4.3.1. Brandversuche an großformatigen Probekörpern

Bild 3 zeigt beispielhaft die erhitzten Oberflächen zweier Probekörper nach dem Brandversuch. Während der Beton links kein Abplatzen aufweist, ist die Oberfläche des Probekörpers rechts großflächig abgeplatzt.



**Bild 3** Erhitzte Oberflächen zweier Probekörper (350 kg/m<sup>3</sup> CEM I, w/z = 0,5, Kiessand B16 links) und (350 kg/m<sup>3</sup> CEM III/A; w/z = 0,5, Kiessand B16, rechts), nach dem Versuch

Die Versuchsergebnisse stimmten sehr gut mit den Ergebnissen an den kleinformatischen Probekörpern überein:

- Bei Betonen mit Hochofenzement CEM III/A und Portlandflugaschezement CEM II/B-V ohne Zugabe von Silikastaub sowie bei Betonen mit Silikastaub kam es zu großflächigen Abplatzungen.
- Bei Betonen mit Portlandzement CEM I und Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL ohne Zugabe von Silikastaub kam es zu keinen oder nur lokal begrenzten Abplatzungen.
- Die Verwendung von Polypropylen-Fasern verhinderte zuverlässig maßgebliche Abplatzungen.

Die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf den größeren Maßstab ist damit nachgewiesen.

#### 4.3.2. Bewertung der drei Hypothesen zu den Ursachen der Abplatzens

**Tabelle 3** fasst die Bewertung der drei Hypothesen zu den Ursachen des Betonabplatzens im Brandfall, zusammen, die sich nach der Auswertung der durchgeführten Versuche ergibt.

**Tabelle 3** Bewertung der drei Hypothesen zu den Ursachen des Betonabplatzens im Brandfall

Hypothese	Bewertung
<p>Hypothese 1 („moisture weakening“):</p> <p>Ein höherer Feuchtegehalt wirkt sich negativ auf die mechanischen Eigenschaften des Betons beim Erhitzen aus, insbesondere auf die (Biege-)Zugfestigkeit. Der damit verbundene geringere Widerstand des Betons gegenüber den durch hohe Temperaturen hervorgerufenen Einwirkungen ist für das Auftreten von explosivem Abplatzen verantwortlich oder trägt dazu bei.</p>	<p>Hypothese 1 wird durch die Ergebnisse der im Projekt durchgeführten Prüfungen gestützt.</p> <p>Die Versuchsergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Feuchte insbesondere in den Grenzflächen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein wirksam wird (-&gt; Verbindung zu Hypothese 3).</p>
<p>Hypothese 2 („Verhältnis der Hydrationsprodukte im Zementstein“):</p> <p>Ein höherer Anteil an Calciumsilikathydraten im Zementstein führt im Temperaturbereich, in dem Abplatzen auftritt (&lt; 300 °C), zu stärkeren Unterschieden zwischen den thermischen Dehnungen von Betonschichten mit verschiedenen Abständen von der erhitzten Oberfläche. Diese Dehnungsunterschiede sind für das Auftreten von explosivem Abplatzen verantwortlich oder tragen dazu bei.</p>	<p>Bei den durchgeführten Versuchen zeigte sich, dass die chemische Zusammensetzung des Zementsteins im Temperaturbereich, in dem Abplatzen auftritt, keinen signifikanten Einfluss auf die thermische Dehnung von Beton hat. Hypothese 2 wird daher nicht bestätigt.</p>
<p>Hypothese 3 („thermische Inkompatibilität“):</p> <p>Bei Betonen mit schwach ausgeprägter Übergangszone (ITZ), das heißt einem guten Verbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein-/Mörtelmatrix, führen die Unterschiede zwischen der thermischen Dehnung der Gesteinskörnung und des Zementsteins beim Erhitzen des Betons zu relevanten Zugspannungen im Zementstein. Diese Zugspannungen sind für das Auftreten von explosivem Abplatzen verantwortlich oder tragen dazu bei.</p>	<p>Hypothese 3 wird durch die Ergebnisse der in diesem Projekt durchgeführten Prüfungen gestützt.</p>

Folgender Versagensmechanismus lässt sich aus der Auswertung der Versuche ableiten:

Während sich der Zementstein zu Beginn des Erwärmungsprozesses zunächst ausdehnt, schwindet er zunehmend, wenn Wasser bei Temperaturen ab ca. 150 °C aus dem Zementstein verdampft. Die Unterschiede zwischen der thermischen Ausdehnung der Gesteinskörnung und dem schwindenden Zementstein verursachen bei fehlender oder nur schwach ausgebildeter poröser Übergangszone (ITZ) Zugspannungen im Zementstein, die zu einer Bildung von Mikrorissen führen. Darüber hinaus erzeugt der entstehende Wasserdampfdruck lokale Spannungen an den Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein, da die Gesteinskörner lokal das Ausströmen des Wasserdampfs an die Oberfläche verhindern.

Die

- Unterschiede zwischen der thermischen Dehnung der Gesteinskörnung und des Zementsteins

sowie

- eingeschlossene Feuchte um die Gesteinskörner

verursachen zudem eine Schwächung des Verbundes zwischen Gesteinskörnung und Zementstein. Es kommt schließlich zur Ausbildung einer Bruchebene parallel zur erhitzten Oberfläche entlang von Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein.

Mit dem Entstehen der Bruchebene wird die in der unter Druckspannungen stehenden oberflächennahen Schicht gespeicherte potenzielle Energie plötzlich freigesetzt, und die abgelöste Schicht knickt nach außen aus.

Zusammenfassend ist Abplatzen im Brandfall ein Stabilitätsversagen der oberflächennahen Betonschicht, das durch

- ausgeprägte Temperaturgradienten und
- Unterschiede zwischen der thermischen Dehnung der Gesteinskörnung und des Zementsteins

hervorgerufen wird.

Feuchte im Beton verstärkt zum einen die Temperaturgradienten, zum anderen trägt sie zu lokalen Spannungen an den Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnung und Zementstein und somit zur Entstehung einer Bruchebene bei.

Die durchgeführten Versuche bestätigten, dass sich explosive Abplatzungen von Beton zuverlässig durch die Zugabe einer ausreichenden Menge von PP-Fasern vermeiden lassen.

#### **4.3.3. Weiterer Forschungsbedarf**

Zur systematischen Untersuchung des Einflusses des Typs und des Anteils der Gesteinskörnung auf das Abplatzen von Beton im Brandfall besteht weiterer Forschungsbedarf. Insbesondere sollte hierbei auch die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung (R-Beton) untersucht werden: im Sinne der Schonung natürlicher Ressourcen wird rezyklierte Gesteinskörnung in Zukunft vermehrt zur Anwendung kommen. Bislang liegen jedoch nur sehr begrenzte Informationen zum Abplatzen von R-Beton im Brandfall vor.

Auch der Einfluss der Zementart auf das Abplatzen von Beton im Brandfall sollte weiter untersucht werden. Hier ist insbesondere interessant, in welchem Maß Betone mit den in der

neuen EN 197-5 [5] genormten klinkereffizienten Zementen CEM VI (S-L) oder CEM VI (S-LL) - Zementen zum Abplatzen im Brandfall neigen oder nicht.

## 5. Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben „Feuchte in Beton und Zementestrich“ der Forschungsvereinigung VDZ Technology gemeinnützige GmbH – VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Literatur

- [1] Norm DIN EN 18560-1 2015-11. Estriche im Bauwesen, Teil 1: Allgemeine Anforderungen, Prüfung und Ausführung
- [2] Industrieverband Klebstoffe, techn. Komm. Bauklebstoffe. Belegreife und Feuchte: Die KRL-Methode zur Bestimmung der Feuchte in Estrichen; Stand Juli 2013. Düsseldorf, 2013
- [3] Industrieverband Klebstoffe, techn. Komm. Bauklebstoffe. KRL-Methode - Messung und Beurteilung der Feuchte von mineralischen Estrichen: Stand Februar 2021. Düsseldorf, 2021 (TKB-Merkblatt 18)
- [4] Norm ISO 834-1 1999-09. Fire-resistance tests - Elements of building construction, Part 1: General requirements
- [5] Norm DIN EN 197-5:2021-07. Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche Fassung EN 197-5:2021