

IGF-Vorhaben:	15213 N
Bewilligungszeitraum:	01.06.2007 - 30.05.2010
Forschungsthema:	<b>Verbundforschungsvorhaben Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unter Berücksichtigung der verwendeten Gesteinskörnungen</b> <b>Teilprojekt: Prüfung von Gesteinkörnung im Beton</b>

## 1 Einleitung und Forschungsziel

In diesem IGF-Vorhaben untersuchten das Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) und die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) den Einfluss der Gesteinskörnungen auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Frost-Laborprüfung. Ausgangspunkt des IGF-Vorhabens war die Feststellung, dass die Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Gesteinskörnungen mit Laborprüfungen an der Gesteinskörnung und im Beton je nach verwendetem Prüfverfahren und Grenzwerten zu einer unterschiedlichen Klassifizierung führen kann. Bisher kann bei keiner Form der Prüfung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes an der Gesteinskörnung ausgeschlossen werden, dass die Gesteinskörnung in dieser Prüfung ein anderes Verhalten aufweist als später im Bauwerk im einbetonierten Zustand.

Ziel des IGF-Vorhabens war es, den Erkenntnisstand zum Verhalten einer Gesteinskörnung hinsichtlich ihres Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands im Beton in Laborprüfung zu erweitern. Hierbei wurde insbesondere durch Gefügeuntersuchungen nachgewiesen, welchen Beitrag die Gesteinskörnung auf das Ergebnis bei der Prüfung im Beton hat. Gleichzeitig wurden mit systematischen Untersuchungen betontechnologische Anforderungen hergeleitet, mit denen ein Beton die Anforderungen in Frostlaborprüfungen erfüllt, auch wenn die Gesteinskörnung nicht die Kriterien der Gesteinskörnungsprüfung erfüllt.

## 2 Ergebnisse und Bewertung

Für die Einschätzung und Beurteilung des Frostverhaltens von Beton in Abhängigkeit der verwendeten Gesteinskörnungen wurden systematische Laborprüfungen durchgeführt. Verschiedene Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Kenngrößen zum Gefüge und zum Feuchtegehalt in Abhängigkeit der Gesteinskörnung wurden ermittelt. In der Regel wurden Betone mit einer gleichartigen Betonzusammensetzung, bei denen lediglich die Gesteinskörnung ausgetauscht wurde, verwendet. Obwohl die untersuchten Gesteinskörnungen sich als z. T. unterschiedlich in ihren Eigenschaften erwiesen, konnten keine eindeutigen Korrelationen mit den Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit der Gesteinskörnung festgestellt werden.

Der Frostwiderstand der Betone wurde bei reiner Frost- und bei Frost-Tausalz-Beanspruchung mit verschiedenen Prüfverfahren und an geschalteten und gesägten Prüfflächen geprüft.

Die Abwitterungsmengen im CIF-Test wurden nicht maßgeblich von der Art der Prüffläche beeinflusst. Gesteinskörnungen mit hohen FTW-Werten (Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit Wasser nach DIN EN 1367-1) in der Gesteinskörnungsprüfung zeigten vergleichsweise hö-

here Abwitterungen bei den damit hergestellten Betonen. Die Abwitterungen und der rel. dyn. E-Modul korrelierten nicht eindeutig mit den Festbetonkennwerten und den Kenngrößen zum Gefüge und zum Feuchtegehalt. Folgende Festbetonkennwerte wurden bestimmt: Rohdichte, Druck- und Biegezugfestigkeit sowie Spaltzugfestigkeit und Carbonatissierungstiefe. Als Kenngrößen zum Gefüge wurden die Luftporenkennwerte, die Wasseraufnahme, und die Porosität mittels Quecksilberporosimetrie bestimmt. Somit konnten mit den jeweiligen Kenngrößen die Unterschiede im Frostwiderstand in Abhängigkeit der Gesteinskörnung nicht beschrieben werden.

Da sich Gesteinskörnungen im Beton anders verhalten als bei der Prüfung direkt an der Gesteinskörnung, sieht DIN EN 206-1/DIN 1045-2 die Prüfungen der Gesteinskörnung im Beton vor, wenn die Prüfung nach dem Magnesiumsulfat-Verfahren oder nach Lagerung in einer 1 %igen NaCl-Lösung nicht bestanden wurde. In diesem Fall ist die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands an einem Standard-Luftporenbeton unter Verwendung der zu beurteilenden Gesteinskörnung vorgesehen.

Die im CDF-Test untersuchten Betone zeigten, dass die Abwitterungen am Beton von der Gesteinskörnung abhängig sein können. Hohe Werte nach dem Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit 1 %iger NaCl-Lösung (FTS-Wert) bzw. nach dem Magnesium-Sulfat-Verfahren (MS-Wert) führten zu höherem Abwitterungen der damit hergestellten Betone. Es wurde jedoch auch festgestellt, dass ähnliche FTS-Werte bei dem Gesteinskörnungsprüfung zu unterschiedlichen Abwitterungen im Betonversuch führen können. Diese Ergebnisse wurden mit dem Referenzverfahren (Slab-Test) bei Frost-Tausalzbeanspruchung bestätigt. Die Ergebnisse zeigen auch, dass eine Bewertung der Betone in Abhängigkeit von der Gesteinskörnung bei reiner Frostbeanspruchung mit dem Slab-Test keine Differenzierung ergab.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens zeigten, dass die Abnahmekriterien für die Gesteinskörnung nach der Gesteinskörnungsprüfung nicht immer mit den Ergebnissen der Gesteinskörnungsprüfung im Beton korrelieren. Aufgrund der Einstufung einer Gesteinskörnung in eine Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandskategorie durch eine routinemäßige Frost- bzw. Frost-Tausalzprüfung konnte ein direkter Zusammenhang zu dem Verhalten der Gesteinskörnung in der Laborprüfung am Beton nicht eindeutig belegt werden.

Es wurde der Nachweis erbracht, dass mit der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT innere Gefügestände in Betonen visualisiert werden können. Das gilt auch für die räumliche Visualisierbarkeit der inneren Rissbildung bei nur geringer Frostschädigung. Es wurde ferner die Korrelation zwischen den Befunden der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT und der Ultraschallmessung belegt. Zusätzlich wurden die Befunde der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT durch stichprobenartig durchgeführte mikroskopische Untersuchungen an Anschliffen bestätigt. Besonders hervorzuheben ist, dass es erstmals gelang, die Rissentwicklung während der Frostbeanspruchung durch diskontinuierliche CT-Messungen zu verfolgen. Mittels optimiertem Messregime und speziellen Auswertalgorithmen gelang es, die CT-Messzeit so zu reduzieren, dass das Prüfregime beim CIF-Verfahren nicht unterbrochen werden musste.

Zur tomografischen Ermittlung der Feuchteverteilung über eine Differenzbildung sei angemerkt, dass die aufgezeigten Ergebnisse zwar vielversprechend sind, aber noch weiterer Forschungsbedarf bezüglich der Validierung der Ergebnisse besteht.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT neue Möglichkeiten bei der Analyse frostinduzierter Schädigungsprozesse in Betonen eröffnet. So sind die vorliegenden Ergebnisse der CT-Untersuchungen bereits sehr vielversprechend. Sie zeigen aber auch den noch bestehenden Handlungsbedarf auf.

Es wurden Möglichkeiten aufgezeigt, wie unter Verwendung von Gesteinskörnungen, die nicht in die Kategorie F2 oder MS18 gemäß DIN EN 12620 eingestuft werden können, dennoch Betone hergestellt werden, die der einschlägigen Kriterien der Frost-Laborprüfung am Beton einhalten. Die vorstehenden Ergebnisse zur Betonoptimierung zeigten, dass der Frostwiderstand des XF3-Betons mit grenzwertiger Gesteinskörnung durch die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,45 signifikant erhöht werden kann. Es wurde gezeigt, dass durch eine gezielte Veränderung der Sieblinie der Expansionsraum im Beton so erhöht werden kann, dass sich der Abfall des rel. dyn. E-Modul der XF3-Betone signifikant verbessert. Vergleichend wurde die Veränderung des Expansionsraums durch den Einsatz eines Luftporenbildners betrachtet. Hier wurde ebenfalls eine signifikante Reduzierung des Abfalls des rel. dyn. E-Moduls festgestellt.

### **3 Schlussfolgerungen**

Die durchgeführten Untersuchungen lassen den Schluss zu, dass in Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfung die Abnahmekriterien in der Gesteinskörnungsprüfung nicht immer mit den Ergebnissen der Gesteinskörnungsprüfung im Beton korrelieren. Aufgrund der Einstufung einer Gesteinskörnung in eine Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandskategorie durch eine standardmäßige Frost- bzw. Frost-Tausalzprüfung wurden einige der untersuchten Gesteinskörnungen für die Anwendung im Beton als nicht geeignet eingestuft. Im Betonversuch verhielten sich die Gesteine jedoch nicht wie erwartet. Ein genereller Zusammenhang zu den Festbetonkennwerten und den Kenngrößen zum Gefüge sowie zum Feuchtegehalt war ebenfalls nicht abzuleiten. Hier wurden u. a. die Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit, die Carbonatisierungstiefe, Luftporenkennwerte, Wasseraufnahme und die Quecksilberporosimetrie untersucht.

Als Abnahmekriterium für Betone für Wasserbauwerke gilt einerseits das Kriterium für die Abwitterungen, wonach die Abwitterungen nach 28 Frost-Tauwechselzyklen geprüft im CIF-Verfahren an geschalteten Prüfflächen  $1000 \text{ g/m}^2$  nicht überschreiten dürfen [1]. Andererseits gelten als Abnahmekriterien der Betone der Abfall des relativen dynamischen E-Modul nach [1] und nach [2]. Nach [1] bzw. [2] soll der rel. dyn. E-Modul nicht kleiner als 75 % bzw. 80 % nach 28 Frost-Tauwechsel-Zyklen sein. Diese Kriterien beziehen sich auf geschaltete Prüfflächen. Die Untersuchungen ergaben, dass ein Einfluss durch die Prüffläche (geschaltete und gesägte Flächen) im CIF-Verfahren nicht festgestellt werden konnte. Die Prüfung der Betone in Abhängigkeit der Gesteinskörnung bei reiner Frostbeanspruchung mit dem Referenztest (Slab-Test) ergab keine Differenzierung.

Für Betone für die Expositionsklasse XF4 gelten folgende Abnahmekriterien:

*Kriterium für die Gesteinskörnung nach DIN 1045-2:*

MS-Wert  $\leq 18 \text{ M.-%}$  (MS18) und alternativ FTS-Wert  $\leq 8 \text{ M.-%}$  nach DIN EN 12620

*Kriterien für die Abwitterungen des Betons in Abhängigkeit des Frost-Prüfverfahrens:*

CDF-Test und geschaltete Flächen:  $\leq 1500 \text{ g/m}^2$  nach 28 Frost-Tauwechselzyklen [1]

Referenz-Test (Slab-Test) :  $\leq 1000 \text{ g/m}^2$  nach 56 Frost-Tauwechselzyklen [3] oder  $\leq 500 \text{ g/m}^2$  nach 56 Frost-Tauwechselzyklen nach DIN 1045/2, Anh. U

Die im CDF-Test untersuchten Betone zeigten, dass die Abwitterungen des Betons von der Gesteinskörnung abhängig sein können. Gesteinskörnungen mit hohem FTS-Wert nach DIN EN 1397-1 in der Gesteinskörnungsprüfung wiesen hohe Abwitterungen bei den damit hergestellten Betonen nach 28 Frost-Tauwechselzyklen auf. Diese Ergebnisse wurden mit dem Referenzverfahren (Slab-Test) bestätigt.

Hinsichtlich des Frost-Tausalz widerstandes zeigte sich ein Einfluss durch die gesägten Prüfflächen auf die Abwitterungen, obwohl die Prüffläche kein maßgebender Einfluss auf die Wasseraufnahme während der Frostprüfung ausgeübt hatte. Die Ergebnisse zeigten, dass die Abnahmekriterien für die Gesteinskörnung nach der Gesteinskörnungsprüfung nicht immer mit den Ergebnissen der Gesteinskörnungsprüfung im Beton korrelieren.

Weiterhin wurde festgestellt, dass Betone, die mit grenzwertigen Gesteinskörnungen hergestellt wurden, durch Minimierung des w/z-Wertes und die Schaffung zusätzlichen Expansionsraumes ein verbessertes Verhalten in der Frostlaborprüfung zeigen können.

Mit den zerstörungsfreien Untersuchungen wurde der Nachweis erbracht, dass mit der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT innere Gefügestände in Betonen visualisiert werden können. Das gilt auch für die räumliche Visualisierung der inneren Rissbildung bei nur geringer Frostschädigung. Es wurde ferner eine Korrelation zwischen den Befunden der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT und Ultraschallmessung aufgezeigt. Der Einfluss einer Vorschädigung von Gesteinskörnungen auf den Schädigungsverlauf konnte bei ausgewählten Betonen dargestellt werden. Es wurde beispielsweise festgestellt, dass bei Betonen mit Kies als Grobkorn häufig Schäden in der ITZ (Interfacial Transition Zone oder Kontaktzone) erkennbar waren und bei Betonen mit Festgesteinen die Schäden vom Gesteinskorn ausgehen und sich in die Matrix fortsetzen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der Einsatz der  $\mu$ -Röntgen 3D-CT neue Möglichkeiten bei der Analyse frostinduzierter Schädigungsprozesse in Betonen eröffnet.

Zusammenfassend wurde mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben der bisherige Erkenntnisstand zur Prüfung einer Gesteinskörnung hinsichtlich ihres Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands im Beton erweitert. Dabei wurden Erkenntnisse zum Verhalten der Gesteinskörnungen im Beton bei einem Frostangriff mit und ohne Tausalz gesammelt. Hierzu wurden insbesondere Untersuchungen zum Frost- bzw. Frost-Tausalzwiderstand der Gesteinskörnung mit verschiedenen Frost-Laborprüfverfahren zur Beurteilung einer Gesteinskörnung im Beton durchgeführt. Durch Gefügeuntersuchungen wurde der Beitrag der Gesteinskörnung auf das Ergebnis im Beton visualisiert.

Auslagerungsversuche an Betonen, die im Rahmen dieses Vorhabens im Labor untersucht wurden, sind Bestandteil eines weiteren AiF-Forschungsvorhabens. Anhand der Ergebnisse der Auslagerungsversuche kann in der Zukunft die Aussagefähigkeit der Laborversuche besser beurteilt werden.

#### 4 Literatur

- [1] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ – Ausgabe Juli 2004
- [2] Setzer, M.J.; Heine, P.; Kasperek, S.; Palecki, S.; Auberg, R.; Feldrappe, V.; Siebel, Eberhard: RILEM TC 176-IDC: Internal damage of concrete due to frost action Final Recommendation. Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test - Reference method and alternative methods A and B. In: Materials and Structures 37 (2004), H. 274, S.743-753
- [3] Swedish Standar SS137244: Method for determination the frost resistance of concrete: Borås Method. Swedish national testing and research institute

Gefördert durch:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Technologie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

Das IGF-Vorhaben 15213 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.