

**IGF-Vorhaben Nr.:** 18439 N  
**Bewilligungszeitraum:** 01.01.2015 - 30.06.2017  
**Forschungsthema:** Schädigungsmechanismen von Beton unter Frosteinwirkung: Einfluss von Zementhauptbestandteilen auf die innere Gefügeschädigung

## 1 Einleitung

Ausgangspunkt des Forschungsvorhabens waren Erkenntnisse aus früheren Untersuchungen, in denen die Gefügeschädigung während einer Frostbeanspruchung im CIF-Test gemäß [CEN/TR 15177] oder [BAW MFB] bei Vorhandensein von Silicastaub deutlich ausgeprägt war. Der starke Abfall des relativen dynamischen E-Moduls während der Frostbeanspruchung wurde mit einer Gelbildung des Silicastaubs über Alkalisilicate begründet. Diese Gelbildung führte früh zu hohen Sättigungsgraden.

## 2 Durchgeführte Untersuchungen

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, die Bindung des Wassers bei Verwendung verschiedener Zementarten zu charakterisieren und den Einfluss auf Gefügeschädigungen während der Frostbeanspruchung zu ermitteln. Hierzu wurde als Frostprüfverfahren der CIF-Test gemäß [CEN/TR 15177] bzw. [BAW MFB] verwendet. Die Bindung des Wassers im Zementstein und das Porengefüge des Zementsteins wurden über Wasserdampfsorptionsisothermen, simultane Thermoanalyse mit angeschlossener Massenspektrometrie und Quecksilberdruckporosimetrie charakterisiert. Die Zementsteine lagerten bis zur Prüfung konserviert in PE-Flaschen, sodass sowohl ein Wasserverlust durch Austrocknung als auch Carbonatisierung verhindert wurden. Während der Desorption wurden Zementsteinproben relativen Luftfeuchten zwischen 96 % und 0 % ausgesetzt.

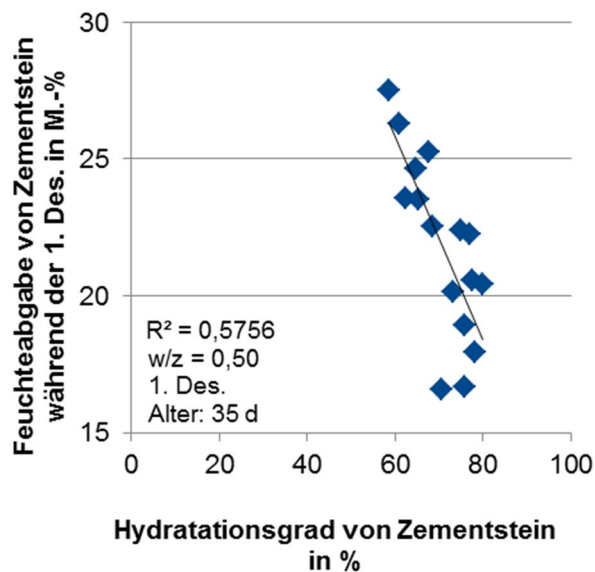
Bei den Zementstein- und Betonuntersuchungen kamen Laborzemente mit den Hauptbestandteilen Klinker, Hüttensand, Kalkstein, Flugasche und Silicastaub zum Einsatz.

## 3 Erzielte Ergebnisse

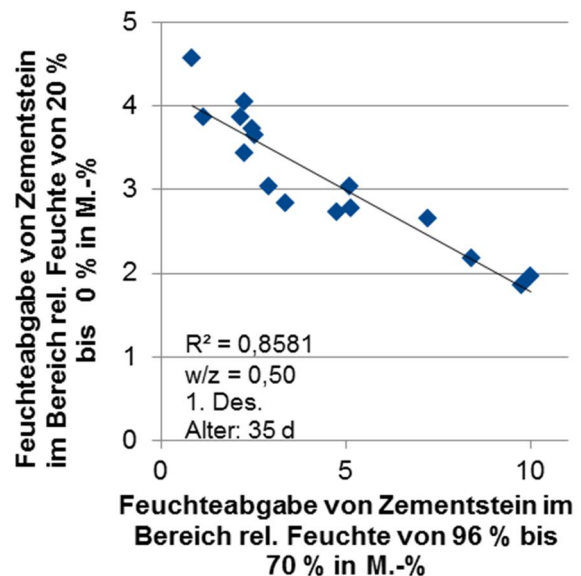
Über den Gehalt an chemisch gebundenem, also nicht verdampfbarem Wasser wurde der Hydratationsgrad bestimmt. Während der Desorption wird lediglich physikalisch gebundenes, also verdampfbares Wasser der Zementsteinprobe abgegeben. Mit zunehmendem Hydratationsgrad der Zementsteine wurde weniger Feuchte während der ersten Desorption abgegeben (siehe **Bild 1**). Hierüber wurde bestätigt, dass der Gehalt an physikalisch gebundenem Wasser über Sorptionsisothermen bestimmt werden kann.

Wurde bei Zementsteinen eine hohe Feuchteabgabe während der Desorption im Bereich hoher relativer Luftfeuchte zwischen 96 % und 70 % beobachtet, wurde nur eine geringe Feuchteabgabe im Bereich niedriger relativer Luftfeuchte zwischen 20 % und 0 % ermittelt. Bei Zementsteinen mit niedriger Feuchteabgabe im Bereich relativer Luftfeuchten zwischen 96 % und 70 % wurde wiederum eine hohe Feuchteabgabe im Bereich relativer Luftfeuchten zwischen 20 % und 0 % beobachtet. Diesen Zusammenhang zeigt **Bild 2**.

Gemäß der Kelvingleichung desorbiert im Bereich rel. Luftfeuchte zwischen 96 % und 70 % insbesondere kapillarkondensiertes, jedoch auch mehrschichtadsorbiertes Wasser aus Poren mit einem Radius zwischen etwa 26,5 nm und 3,0 nm. Im Bereich relativer Luftfeuchte von maximal 20 % liegt das Wasser chemi- oder physisorbiert vor. Es konnte damit indirekt gezeigt werden, dass unter Verwendung von Zementsteinen mit unterschiedlichen chemisch-mineralogischen sowie granulometrischen Zementzusammensetzungen Wasser in der Zementsteinmatrix in unterschiedlichen Porengrößenbereichen der Zementsteinmatrix über verschiedene Bindungsarten gebunden wird.

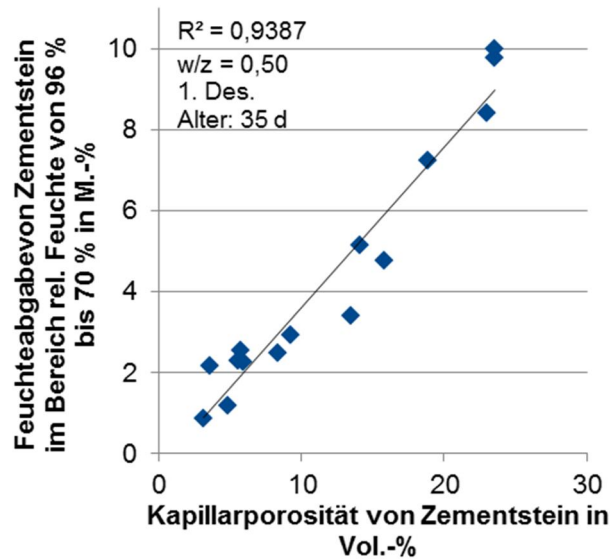


**Bild 1** Zusammenhang zwischen dem Hydratationsgrad von Zementstein und der Feuchteabgabe von Zementstein während der 1. Desorption



**Bild 2** Zusammenhang zwischen der Feuchteabgabe von Zementstein im Bereich relativer Feuchte von 96 % bis 70 % und der Feuchteabgabe von Zementstein im Bereich rel. Feuchte von 20 % bis 0 %

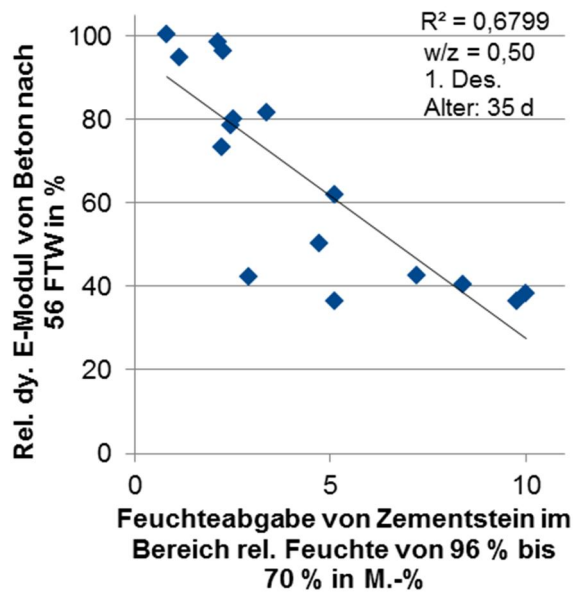
Ergebnisse aus der Quecksilberdruckporosimetrie der Zementsteine wurden den Wasserdampfsorptionsisothermen dieser Zementsteine gegenübergestellt. Bei Zementen mit einer hohen Kapillarporosität (Radien  $r \geq 0,01 \mu\text{m}$ ) wurde während der Desorption eine hohe Feuchteabgabe im Bereich relativer Luftfeuchte zwischen 96 % und 70 % beobachtet (siehe **Bild 3**).



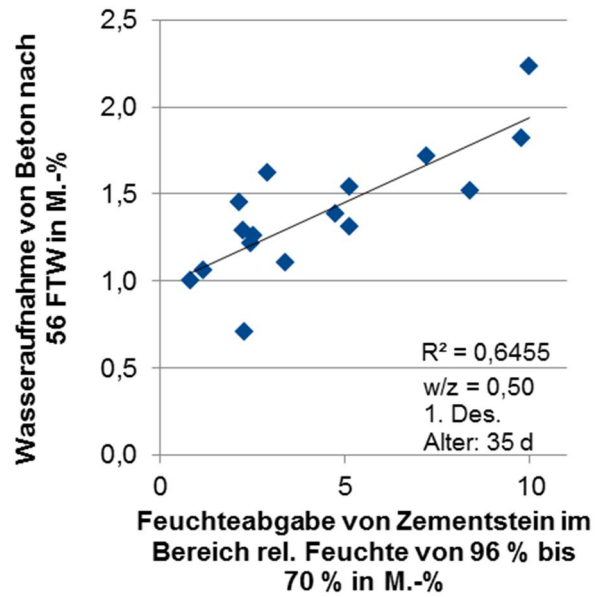
**Bild 3** Zusammenhang zwischen dem Kapillarporenanteil von Zementstein und der Feuchteabgabe von Zementstein während der 1. Desorption zwischen 96 % und 70 %

Bei Zementsteinen mit hoher Kapillarporosität findet demnach gemäß der Kelvingleichung die Wasserbindung überwiegend über Kapillarkondensation statt.

Die Wasserdampfsorptionsisothermen der Zementsteine wurden zudem den Ergebnissen aus der CIF-Prüfung gegenübergestellt. Je höher die Feuchteabgabe im Bereich relativer Luftfeuchte zwischen 96 % und 70 % war, desto stärker war der Abfall des relativen dynamischen E-Moduls nach 56 Frost-Tau-Wechseln im CIF-Test (siehe **Bild 4**). Die Feuchteabgabe erfolgte hier im Wesentlichen aus den Zementsteinporen mit einem Radius zwischen 26,5 nm und 3 nm. Gleichzeitig wurde an Betonen, deren Wasserdampfsorptionsisothermen am Zementstein eine hohe Feuchteabgabe aus Poren dieser Größenordnung aufwiesen, eine hohe Wasseraufnahme im CIF-Test beobachtet. Dieser Zusammenhang ist in **Bild 5** dargestellt. Wasser, das hauptsächlich über Kapillarkondensation in Poren mit Radien im Bereich mehrerer Nanometer gebunden wird, gefriert aufgrund der Radius-Gefrierpunkt-Beziehung bei einer Temperatur von -20 °C. Diese Temperatur wird während der Frostbeanspruchung des CIF-Tests erreicht. Über die hohe Wasseraufnahme wurde früh die kritische Sättigung des Betons erreicht, welche zur Gefügeschädigung führte.



**Bild 4** Zusammenhang zwischen der Feuchteabgabe von Zementstein im Bereich rel. Feuchte von 96 % bis 70 % und dem rel. dyn. E-Modul von Beton nach 56 FTW



**Bild 5** Zusammenhang zwischen der Feuchteabgabe von Zementstein im Bereich rel. Feuchte von 96 % bis 70 % und der Wasseraufnahme von Beton nach 56 FTW

Es zeigte sich somit, dass die Bindung des Wassers in verschiedenen Porenbereichen die Gefügeschädigung während der Frostbeanspruchung beeinflusst. Die Wasserbindung in verschiedenen Porenbereichen ist wiederum beeinflusst vom verwendeten Zement. Die die Bindung des Wassers im Zementstein korreliert zudem mit Porengrößenkennwerten. Die Ergebnisse helfen, ein differenzierteres Verständnis sowohl für die Bindung des Wassers in der Zementsteinmatrix, als auch für die Frostschädigung im CIF-Test zu erlangen.

Das Ziel des Forschungsvorhabens wurde erreicht.

**Das IGF-Vorhaben 18439 N der Forschungsvereinigung VDZ gemeinnützige GmbH - VDZ gGmbH, Tannenstraße 2, 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:



Bundesministerium  
für Wirtschaft  
und Energie

aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages