

## CEM II/B-S Zementsysteme im Betonstraßenbau

FA 8.183

Forschungsstelle: Bauhaus-Universität Weimar, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde (FIB) (Prof. Dr.-Ing. habil. J. Stark)

Bearbeiter: Ehrhardt, D.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, Bonn

Abschluss: Februar 2009

### 1 Aufgabenstellung

Die Verwendung von gemahlenem Hüttensand zur Herstellung von Zumahlstoffzementen weist eine lange Geschichte auf. Durch eine stetige Weiterentwicklung in der Herstellung von Zumahlstoffzementen, aber vor allem auch aus ökonomischen Gründen erhöht sich der Anteil dieser Zemente seit mehreren Jahren stetig. Für die Herstellung von Betonfahrbahndecken wird allerdings in erster Linie reiner Portlandzement (CEM I) eingesetzt. Begründet wurde und wird der bevorzugte Einsatz von Portlandzement mit der seit vielen Jahrzehnten gewachsenen Erfahrung bei der Anwendung dieses Zements. Zu einer zusätzlichen Verunsicherung bezüglich der Einsatzmöglichkeiten von Zementen mit Zumahlstoffen führten Schadensfälle auf zwei Autobahnabschnitten in Thüringen aus dem Jahr 2003 und 2004. Auf diesen Autobahnabschnitten, die unter Verwendung von Portlandhüttenzement (CEM II/B-S 32,5 R) hergestellt wurden, traten bereits nach einem Winter starke Abwitterungserscheinungen aufgrund eines zu geringen Frost-Taumittel-Widerstandes auf. Die Ursache für den zu geringen Frost-Taumittel-Widerstand wurde kontrovers diskutiert. Um eine verlässliche Aussage darüber zu gewährleisten, ob der Einsatz hüttensandhaltiger Zemente im Betonfahrbahndeckenbau generell als kritisch zu bewerten ist, wurde dieses Forschungsprojekt initiiert.

### 2 Untersuchungsmethodik

In dem vorgestellten Projekt sollte die Anwendbarkeit von Portlandhüttenzement (CEM II/B-S) im Vergleich zum CEM I im Betonstraßenbau kritisch untersucht werden. Im Zentrum der Untersuchungen stand der Frost-Tausalz-Widerstand von Beton mit Portland- und Portlandhüttenzement.

Für die Hauptuntersuchungen wurden ein Portlandzement (CEM I 42,5 N) und ein Portlandhüttenzement (CEM II/B-S 42,5 N, 30 % Hüttensand) des gleichen Herstellers (gleicher Klinker) verwendet. Um den Einfluss des Hüttensands und der Frühfestigkeit genauer zu untersuchen, wurden zwei weitere Zemente in die Untersuchungen aufgenommen.

Dabei handelt es sich um einen weiteren Portlandhüttenzement (CEM II/B-S 42,5 N ~ 32 % Hüttensand) mit einer sehr hohen spezifischen Oberfläche (ca. 5 500 cm<sup>2</sup>/g) und einen Modellzement, der anstatt 30 % Hüttensand nur inertes Quarzmehl gleicher Feinheit enthielt. Aufgrund unterschiedlicher Meinungen zur Ursache eines bereits eingetretenen Schadensfalls wurde auch der Einfluss eines bestimmten Sands auf den Frost-Tausalz-Widerstand bei hüttensandhaltigem Beton untersucht.

Es wurden Probekörper mit texturierter Oberflächenmörtelschicht hergestellt, die auf verschiedene Weise nachbehandelt und gelagert wurden. Es kamen 4 verschiedene Nachbehandlungsvarianten zum Einsatz (keine Nachbehandlung, Auftrag von flüssigen Nachbehandlungsmitteln zu einem frühen Zeitpunkt bzw. auf die mattfuchte Betonoberfläche sowie 5-tägiges Beschichten mit feuchtem Sand). Neben der Laborlagerung wurden auch Versuche bei Freilagerung im Sommer und Herbst durchgeführt, wobei in der Regel eine Feuchtigkeitsaufnahme durch Regen verhindert wurde.

Während der Lagerung wurden die Wasserabgabe des Betons ermittelt und wichtige Klimadaten erfasst. In einem Alter von 28 Tagen wurden die Proben auf ihren Frost-Tausalz-Widerstand

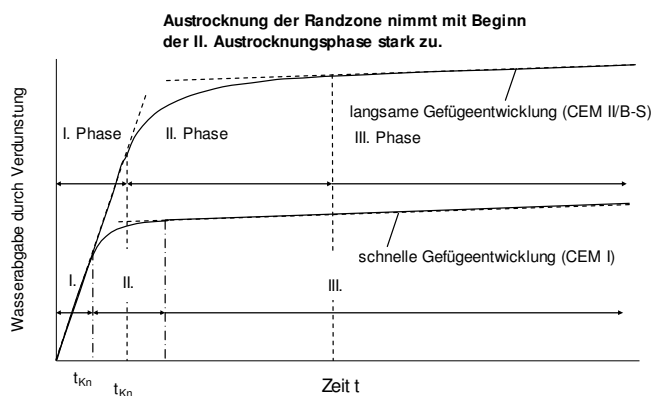
untersucht, sowie die Karbonatisierungstiefe bestimmt. Um sich abzeichnende Zusammenhänge zur Austrocknung der Randzone zu untermauern, wurden Messungen zum elektrischen Widerstand in der Betonrandzone durchgeführt. Dazu wurde eine neu entwickelte Elektrode verwendet, mit der die Vorgänge in der äußersten Betonrandzone besser als mit den ebenfalls verwendeten Multiringelektroden erfasst werden können. Um Kenntnisse zur Gefügeentwicklung in der Betonrandzone zu gewinnen, wurden Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie durchgeführt.

Zur Auswertung der aufgenommenen Bilder wurde unter anderem auf die digitale Bildanalyse zurückgegriffen. Da während der Bearbeitung des Projekts die Texturierung mittels nachgezogenem Jutetuch als bisherige Standardbauweise durch die Texturierung der Fahrbahn durch Ausbürsten des Oberflächenmörtels (Waschbeton) abgelöst wurde, ergaben sich zusätzliche Fragestellungen. Deshalb wurde im Oktober 2007 der Neubau der Bundesstraße B 6 durch Baustellen- und Laborversuche begleitet. Bei dieser Baumaßnahme wurde ein CEM III/A 42,5 N eingesetzt und die Oberfläche in Waschbetonbauweise ausgeführt.

## 3 Untersuchungsergebnisse

### 3.1 Austrocknung der Randzone

Anhand der Untersuchungen zur Wasserabgabe und dem elektrischen Widerstand in der Betonrandzone konnte geschlossen werden, dass eine relevante Austrocknung der Randzone nicht mit sofortigem Beginn der Wasserabgabe stattfindet. Vielmehr existiert ein Zeitpunkt, ab dem der Wasserverlust an der Oberfläche nicht mehr durch Wassernachlieferung aus dem Inneren ausgeglichen werden kann. Ab diesem Zeitpunkt (Abknickzeitpunkt  $t_{Kn}$ ) nimmt die Austrocknung der Randzone stark zu, wodurch eine weitere Reaktion des Zements in diesem Bereich immer mehr verhindert wird. Nach welcher Zeitspanne das starke Austrocknen der Randzone eintritt, ist in erster Linie von der Reaktionsfähigkeit des verwendeten Zements und der anstehenden potenziellen Verdunstung abhängig.



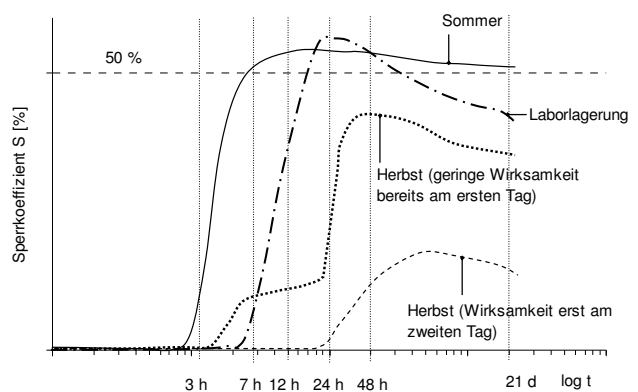
**Bild 1:** Verschiedene Phasen der Austrocknung des Betons

Der zu erwartende Frost-Tausalz-Widerstand eines Betons hängt von der bis zum Abknickzeitpunkt erreichten Gefügeentwicklung und der Qualität der Nachbehandlung in der folgenden Zeit ab. Hohe Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur fördern die Gefügeentwicklung in der Randzone und führen zu geringerer Abwitterung. Betone mit schnell reagierendem Zement (CEM I, CEM II/B-S mit einer dem CEM I vergleichbaren Frühfestigkeit) bilden bis zum Abknickzeitpunkt  $t_{Kn}$  ein dichteres Gefüge und reduzieren so im weiteren Verlauf der Austrocknung die negativen Auswirkungen. Bei Betonen mit langsam reagierendem Zement (CEM II/B-S) findet nach dem Abknick-

zeitpunkt  $t_{Kn}$  eine stärkere Austrocknung der Randzone statt, sodass dem Zement für eine weitere Gefügeverdichtung nicht genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht.

### 3.2 Auswirkung der Nachbehandlung auf den Frost-Tausalz-Widerstand

Durch die Nachbehandlung mit flüssigen Nachbehandlungsmitteln (NBM) wird sowohl die Wasserabgabe reduziert als auch eine Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes erreicht. Jedoch hängt das Ausmaß der Verbesserung sehr stark von den Witterungsbedingungen und der verwendeten Zementart ab. Es wurde erkannt, dass die Nachbehandlungsmittel die Austrocknung der Randzone nicht vollständig verhindern können, sondern nur den Beginn nach hinten verschieben und das Ausmaß der Austrocknung verringern können. Die Wirkung der Nachbehandlungsmittel auf den Frost-Tausalz-Widerstand ist in der Regel für die herbstliche Witterung am größten. Dies ist auf die geringere potenzielle Verdunstung im Herbst zurückzuführen, die dazu führt, dass die Nachbehandlungsmittel zwar zunächst eine schwächere Sperrwirkung erzielen, bei weiterer Verfilmung aber insgesamt über einen längeren Zeitraum wirken. Somit wird der Zeitpunkt, ab dem der Wachsfilm mehr Wasser durchlässt als im Gefüge nachgeliefert werden kann, deutlich verzögert.



**Bild 2:** Entwicklung des Sperrkoeffizienten bei unterschiedlichen Lagerungen. Fallende Kurven weisen auf eine höhere Wasserabgabe der mit NBM nachbehandelten Proben hin.

Der Einfluss des Auftragszeitpunkts auf den Nachbehandlungserfolg war relativ gering. Tendenziell wurde für den Auftrag auf die mattheuchte Betonoberfläche eine höhere Wirksamkeit festgestellt. Diese Tendenz trat unter herbstlichen Bedingungen am deutlichsten auf. Die Feststellung, dass trotz unterschiedlicher Auftragszeitpunkte in der Regel nur geringe Unterschiede auftreten, ändert allerdings nichts an der Notwendigkeit, dass das in den TL NBM-StB 96 angewendete Messverfahren zur Beurteilung der Sperrwirkung von Nachbehandlungsmitteln modifiziert werden musste. In den TL NBM-StB geht es um die Prüfung der Nachbehandlungsmittel, die ohne eine genaue und reproduzierbare Festlegung des Auftragszeitpunkts nicht möglich ist. Der Grund dafür ist, dass je früher der Auftrag des Nachbehandlungsmittels erfolgt, umso mehr Zeit vergeht, bis sich ein dichter Film bildet, und die Wasserabgabe reduziert werden kann. Da für eine Berechnung der Sperrwirkung immer die Wasserabgabe zwischen unbehandelten und behandelten Proben ab dem Auftrag des Mittels gegenübergestellt wird, führt aus diesem Grund ein früher Auftragszeitpunkt zu einer geringeren Sperrwirkung. Dies macht deutlich, dass eine genaue und reproduzierbare Festlegung des Auftragszeitpunkts notwendig war. Die Ergebnisse dieses Projekts bekräftigen

weiterhin den Entschluss, in den neuen TL NBM-StB den Berechnungszeitraum auf 24 Stunden zu begrenzen, da alle darüber hinaus berechneten Sperrwerte einer sehr hohen Streuung unterliegen.

Der größte Vorteil der Nachbehandlungsmittel besteht nach Auffassung des Bearbeiters in der höheren Anwendungssicherheit. Durch die Nachbehandlungsmittel kann nicht in jedem Fall eine deutliche Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes erreicht werden. Es wurde aber deutlich, dass ungünstige Bedingungen, die ohne Nachbehandlung zu kritischen Abwitterungen führen, durch die Anwendung der Nachbehandlungsmittel deutlich abgeschwächt werden können. Besonders deutlich wurde dies bei den Auslagerungsversuchen im Herbst. Hier traten aufgrund der geringen Temperaturen auch beim Portlandzementbeton hohe Abwitterungen ( $> 1\,000\text{ g/m}^2$ ) auf, wenn dieser nicht nachbehandelt wurde. Durch die Applikation flüssiger Nachbehandlungsmittel konnte die Abwitterung um über 50 % reduziert werden. Die Abwitterungsmengen von Beton mit CEM II/B-S konnte durch die Nachbehandlungsmittel im Mittel um 40 % reduziert werden. Teilweise wurde aber auch eine Reduzierung von knapp 80 % erreicht. Eine weitere Erhöhung der Wirksamkeit kann nur durch eine Feuchtnachbehandlung erreicht werden, wobei bei niedrigen Temperaturen eine längere Nachbehandlungsdauer notwendig ist.

## **4 Folgerungen für die Praxis**

### **4.1 Eignung von Portlandhüttenzement**

Bezüglich der Eignung von Portlandhüttenzement für die Herstellung von Betonfahrbahndecken kann zusammengefasst werden, dass auch mit Portlandhüttenzement (CEM II/B-S) ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand erreicht werden kann. Während jedoch mit reinem Portlandzement (CEM I) auch ohne Nachbehandlung immer ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand erreicht wird, führt dies bei einem Portlandhüttenzement zu einer kritischen Abwitterung. Es besteht also die Gefahr, dass bei unzureichender Nachbehandlung erneut Schäden in Form von hoher Abwitterungen auftreten. Die Untersuchungen haben jedoch auch gezeigt, dass mit Portlandhüttenzement hoher Frühfestigkeit eine ähnlich hohe Anwendungssicherheit erreicht werden kann. Dies konnte jedoch nur mit einem Portlandhüttenzement (CEM II/B-S) erreicht werden, der eine spezifische Oberfläche nach Blaine von knapp  $6\,000\text{ cm}^2/\text{g}$  aufwies. Die hohe Feinheit geht jedoch mit einem frühen Erstarren des Zements einher, sodass die Praxis zeigen muss, ob dies ein möglicher Weg im Betonstraßenbau ist. Der Verdacht, dass der bei einem Schadensfall angewendete Sand für den zu geringen Frost-Tausalz-Widerstand des CEM II/B-S Betons verantwortlich ist, konnte nicht bestätigt werden. Die Untersuchungen mit diesem Sand führten in keinem Fall zu einer signifikant höheren Abwitterung. Welchen Beitrag der Hüttenand überhaupt bezüglich des zu erwartenden Frost-Tausalz-Widerstandes leistet, konnte nicht abschließend geklärt werden.

Es liegen jedoch deutliche Hinweise vor, dass der Hüttenand ohne Nachbehandlung kaum zur Verdichtung der äußersten Betonrandzone beiträgt. Zum einen zeigen rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen der unmittelbaren Betonrandzone eines nicht nachbehandelten Betons, dass kaum eine Reaktion des Hüttenandkorns stattgefunden hat. In 10 mm Tiefe und bei Anwendung einer Nachbehandlung konnte dagegen ein Reaktionsraum erkannt werden. Einen weiteren Hinweis liefern die Ergebnisse mit einem Modellzement, der statt 30 % Hüttenand inertes Quarzmehl enthielt. Beton mit diesem Zement erreichte ohne Nachbehandlung einen vergleichbaren Frost-

Tausalz-Widerstand wie ein Beton mit CEM II/B-S normaler Feinheit.

Erst durch eine Nachbehandlung wurde ein Unterschied in der Abwitterung in der Form erkennbar, dass mit zunehmender Güte der Nachbehandlung die Abwitterung des Betons mit CEM II/B-S deutlicher reduziert wurde. Dies legt den Schluss nahe, dass ohne eine Nachbehandlung der Hüttenand keinen nennenswerten Beitrag zum Frost-Tausalz-Widerstand leisten kann. Hier muss in weiteren Forschungsprojekten Klarheit gewonnen werden. Dabei sollte neben der Austrocknung auch die Karbonatisierung der Randzone berücksichtigt werden, da in einem vollständig karbonatisierten Beton, aufgrund des Fehlens von  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , keine weitere Hüttenandreaktion möglich ist.

### **4.2 Bewertung der Abwitterung beim Waschbeton**

Die Untersuchungen zur Abwitterung beim Waschbeton bestätigen die bereits in einem Pilotprojekt im Rahmen der im April 2008 gebauten Erprobungsstrecke BAB A 14 festgestellte Unbrauchbarkeit eines rein massebezogenen Abwitterungsgrenzwerts zur Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Waschbetonoberflächen. Da aufgrund der besonderen Beschaffenheit einer Waschbetonoberfläche das abgewitterte Material in erster Linie aus den mit Mörtel gefüllten Bereichen zwischen den Splittkörnern stammt, werden infolge der Abwitterung die Splittkörner weiter freigelegt. Bei einem üblich zusammengesetzten Oberbeton für Waschbetonoberflächen werden bei Ansatz des Abwitterungskriteriums von  $1\,500\text{ g/m}^2$  die Splittkörner bereits so weit freigelegt, dass eine erhöhte Gefahr des Herausbrechens der Splittkörner besteht. Es ist daher zu empfehlen, die Abwitterungsmengen bei Waschbetonoberflächen über die resultierende Zunahme der Rautiefe zu bewerten.

### **4.3 Empfehlungen zur Nachbehandlung für die Praxis**

Für die Praxis könnten die neuen Erkenntnissen bezüglich des Austrocknungsverlaufs der Betonrandzone neue Möglichkeiten der Nachbehandlung mit sich bringen. Die Ergebnisse zeigen, dass für einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand in erster Linie die Wasserabgabe bzw. die Nachbehandlung ab dem Zeitpunkt relevant ist, ab dem mehr Wasser an der Oberfläche verdunstet, als vom Inneren nachgeliefert werden kann. Das zeigt, dass die frühe Nachbehandlung in erster Linie zur Verhinderung der frühen Rissbildung dient, während spätere Maßnahmen hauptsächlich den Frost-Tausalz-Widerstand beeinflussen. Dieses Wissen könnte dazu führen, dass für beide Aufgaben jeweils optimale Nachbehandlungsvarianten entwickelt werden. Im Bereich der Brückenkappen wäre beispielsweise denkbar, dass zur Verhinderung der frühen Rissbildung nach wie vor Nachbehandlungsmittel angewendet werden. Die zeitliche Verzögerung der Austrocknung der Randzone bedeutet zusätzlich einen Zeitgewinn, sodass mit der weiteren Nachbehandlung, z. B. durch feuchte Jutetücher oder Geotextilien, ein großes Anwendungsfenster vorliegt. Für den Betonstraßenbau könnte dies zu einer Renaissance der Feuchtnachbehandlung mittels Tankwagen führen.