

Bewertung der Innenhydrophobierung von Fahrbahndeckenbetonen als neuartige AKR-Vermeidungsstrategie

FA 8.233

Forschungsstelle: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin

Bearbeiter: Weise, F. / Fladt, M. / Meyer, I.

Auftraggeber: Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur, Bonn

Abschluss: März 2020

1 Aufgabenstellung

Zur Nutzbarmachung grenzwertig alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen für Betonfahrbahndecken wurde basierend auf einer umfassenden Literaturrecherche im Rahmen dieses Forschungsvorhabens die Eignung der Innenhydrophobierung als neuartige AKR-Vermeidungsstrategie in zwei Bearbeitungsstufen untersucht. Gegenstand der Bearbeitungsstufe A war die Überprüfung der Eignung eines auf einem Kalziumstearat (HM-A) und eines auf einem Silan-Siloxan-Gemisch (HM-B) basierenden Innenhydrophobierungsmittels. Darauf aufbauend wurde in der Bearbeitungsstufe B mit einem modifizierten Prüfprogramm die Eignung eines weiteren Innenhydrophobierungsmittels (HM-C) mit einem der Vertraulichkeit unterliegenden Wirkstoff ergänzend untersucht.

2 Untersuchungsmethodik

Die Basis für die anwendungsbezogenen Eignungsuntersuchungen bildeten die im ARS 04/2013 [1] vorgegebenen pessimalen Betonrezepturen für Betonfahrbahndecken. So wurde in der Bearbeitungsstufe A die Eignung der beiden Hydrophobierungsmittel HM-A und HM-B in der vorgegebenen Ober- und Unterbetonrezeptur OB (D>8)/UB untersucht. In der Bearbeitungsstufe B wurden die Eignungsuntersuchungen mit dem Hydrophobierungsmittel HM-C um die vorgegebene Waschbetonrezeptur OB 0/8 erweitert. Als Gesteinskörnung fand bei beiden Betonarten in der Sandfraktion der WS-Prüfsand und in den groben Kornfraktionen ein alkaliempfindlicher Grauwackesplitt zur besseren Einschätzung des AKR-vermeidenden Einflusses des jeweiligen Hydrophobierungsmittels Anwendung. Als Bindemittel wurde der WS-Prüfzement in den betonartspezifisch vorgegebenen Mengen eingesetzt. So betrug der Zementgehalt in der Ober- und Unterbetonrezeptur 360 kg/m^3 und in der Waschbetonrezeptur 430 kg/m^3 . Bei beiden Betonarten wurde ein w/z-Wert von 0,45 eingestellt. Die jeweils auf den Zementgehalt bezogene Zugabemenge des Innenhydrophobierungsmittels betrug beim HM-A 0,5 M.-%, beim HM-B 0,4 M.-% sowie beim HM-C bei beiden Betonarten 2,0 M.-%. Zur Sicherstellung eines hinreichenden Frost-Tausalz-Widerstands wurde bei beiden Betonarten der gleiche, auf einem Wurzelharz basierende LP-Bildner eingesetzt. Aufgrund der unterschiedlichen Wechselwirkung zwischen dem LP-Bildner und den verschiedenartigen Hydrophobierungsmitteln wurde seine Dosie-

rung gegenüber dem jeweiligen Referenzbeton beim HM-A reduziert sowie beim HM-B geringfügig und beim HM-C um ein Vielfaches erhöht.

Bereits bei der Optimierung der Frischbetoneigenschaften zeigte sich, dass die Zugabe des auf dem Kalziumstearat basierenden Hydrophobierungsmittels HM-A zu einer signifikanten Erhöhung des Verdichtungsmaßes und damit zu einer drastischen Verschlechterung der Verarbeitbarkeit führt. Auch durch eine vertretbare Zugabemenge eines Fließmittels konnte dies nicht hinreichend kompensiert werden.

3 Untersuchungsergebnisse

Die prinzipielle Wirksamkeit aller drei Hydrophobierungsmittel im Festbeton wurde durch eine signifikant reduzierte Aufnahme von Wasser beziehungsweise NaCl-Lösung nachgewiesen. Bei der mechanischen Kennwertbestimmung zeigte sich allerdings, dass der Einsatz der Hydrophobierungsmittel zu einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften führt. Besonders stark ausgeprägt ist dies bei der Verwendung des auf dem Kalziumstearat basierenden Hydrophobierungsmittels HM-A. Der so hergestellte hydrophobierte Ober- und Unterbeton unterschreitet unter anderem den normativ festgelegten 28-d-Mindestwert für Druckfestigkeit von 37 N/mm^2 um ca. 14 % und den für die Biegezugfestigkeit von $4,5 \text{ N/mm}^2$ um ca. 27 %. Demgegenüber unterschreiten die mit dem Hydrophobierungsmitteln HM-B und HM-C hergestellten Ober- und Unterbetone die geforderten Mindestfestigkeitswerte nur geringfügig. Bei dem in der Bearbeitungsstufe B zusätzlich hergestellten Waschbeton mit dem Hydrophobierungsmittel HM-C liegt der Festigkeitsabfall zwischen den beiden vorstehend geschilderten Extremfällen der verschiedenartig hydrophobierten Ober- und Unterbetone. Vergleichend an den Fahrbahndeckenbetonen ohne und mit dem jeweiligen Hydrophobierungsmittel durchgeführte Druckfestigkeitsprüfungen im Betonalter von 28 und 180 d zeigen nur relativ geringe Festigkeitszuwächse im betrachteten Zeitraum. Das lässt den Schluss zu, dass der hydrophobierte Unter- und Oberbeton lediglich eine moderate Nachhydratation erfährt. Im Gegensatz dazu besitzt der Waschbeton mit dem Hydrophobierungsmittel HM-C einen Festigkeitszuwachs um 24 % und damit eine beachtliche Nachhydratation. Weiterhin ist erwähnenswert, dass sich neben den Festigkeitskennwerten auch der statische E-Modul der Betone durch die Zugabe der Hydrophobierungsmittel signifikant verringert. So erfährt dieser beispielsweise bei den Ober- und Unterbetonen mit dem Hydrophobierungsmittel HM-B beziehungsweise HM-C eine Verringerung um 12 beziehungsweise 29 %.

Aber nicht nur die Festigkeits- und Verformungsparameter, sondern auch der Frost-Tausalz-Widerstand der Fahrbahndeckenbetone vermindert sich beim Einsatz der Innenhydropho-

bierungsmittel. Trotz der Einhaltung der normativ geforderten Luftporenkennwerte (Abstandsfaktor AF und Mikroluftporengehalt A_{900}) erhöht sich die Abwitterung der Fahrbahndeckenbetone bei der Zugabe der Hydrophobierungsmittel im CDF-Test um ein Vielfaches. So erfährt die Abwitterung im CDF-Test bei den Ober- und Unterbetonen beim Einsatz des Hydrophobierungsmittels HM-A eine Verdopplung auf 535 g/m^2 und bei der Verwendung des HM-C eine Vervielfachung um 5,5 auf $1\,242 \text{ g/m}^2$. Damit wird das Vorhaltemaß zum normativ zulässigen Maximalwert von $1\,500 \text{ g/m}^2$ deutlich herabgesetzt. Die Ursache für diese Erscheinung konnte im Rahmen dieses Projekts nicht grundhaft geklärt werden. Es wird unter anderem vermutet, dass dies im Zusammenhang mit der Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Betone bei der Verwendung von Hydrophobierungsmitteln steht.

Die sich an die Rezepturoptimierung anschließende Robustheitsuntersuchung der Ober- und Unterbetonrezeptur in der Bearbeitungsstufe A erfolgte ausschließlich ohne und mit dem auf dem Silan-Siloxan-Gemisch basierenden Hydrophobierungsmittel HM-B. Der Ausschluss des Hydrophobierungsmittels HM-A bei den weiteren Untersuchungen geschah vor dem Hintergrund, dass seine Zugabe zu einer signifikanten Verschlechterung der Verarbeitbarkeit und der Festigkeitskennwerte des Ober- und Unterbetons führte.

Bei den Robustheitsuntersuchungen wurde festgestellt, dass sowohl die Erhöhung des w/z-Werts von 0,45 auf 0,48 als auch die Absenkung der Herstelltemperatur des Betons von 20°C auf 5°C zu einer signifikanten Erhöhung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten führen und so die Wirksamkeit des Innenhydrophobierungsmittels vermindern. Weiterhin sei angemerkt, dass die alleinige Erhöhung der Herstelltemperatur des Betons von 20 auf 30°C zwar nur zu einer geringen Erhöhung des kapillaren Wasseraufnahmekoeffizienten führt, aber eine signifikante Verschlechterung der Frischbetoneigenschaften und der mechanischen Parameter zur Folge hat. Bemerkenswert ist weiterhin, dass die Absenkung des w/z-Werts von 0,45 auf 0,42 trotz der damit verbundenen Verminderung des Kapillarporenraums beim hydrophobierten Beton zu keiner weiteren Verringerung des Wasseraufnahmekoeffizienten führt. Das lässt den Schluss zu, dass die Menge des eingesetzten Hydrophobierungsmittels gut auf die Größe des Kapillarporenraums abgestimmt ist.

Im Anschluss an die Robustheitsuntersuchungen wurde in der Bearbeitungsstufe A die Dauerhaftigkeit des Ober- und Unterbetons mit dem Hydrophobierungsmittel HM-B realitätsnah untersucht und anschließend bewertet. Die Basis für diese Untersuchungen bildeten großformatig hergestellte Betonbalken mit den Abmessungen $300 \times 50 \times 27 \text{ cm}^3$. Zur Verifizierung des Einflusses der Einwirkungen aus Klima und Verkehr wurden Trocken- und Nassschwingversuche mit begleitendem Schadensmonitoring sowie Einwalkversuche durchgeführt.

Es zeigte sich bei allen Trockenschwingversuchen, dass die Balkensegmente beider Betonarten (ohne und mit Innenhydrophobierung) die ersten beiden Phasen der ermüdungsinduzierten Schadensevolution durchlaufen. So ist die erste, abklingende Phase durch einen starken Abfall des dynamischen E-Moduls, eine starke Zunahme der Stauchung auf der Balkenunterseite und eine hohe Schallemissionsaktivität geprägt. Es finden hier vor allem Lastumlagerungen und Belastungsausgleichs statt. Die zweite sich anschließende Phase (stabile Phase) ist sowohl durch einen moderaten, stetigen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls als auch durch eine moderate, stetige Zunahme der Stauchung auf der Balkenunterseite bei relativ geringer Schallemissionsaktivität gekennzeichnet. All dies sind Indikatoren für ein kontinuierliches Mikrorisswachstum. Der bei den hydrophobierten Schwingbalken trotz geringerer Beanspruchung im Vergleich zum Referenzbalken über die 5 Millionen Lastwechsel erkennbare stärkere Abfall des dynamischen E-Moduls in der zugbeanspruchten Betonrandzone lässt auf eine höhere Betondegradation schließen. Die gleichzeitig auftretende höhere Stauchung der Balkenunterseite ist einerseits auf diese erhöhte Degradation und andererseits auf den verminderten statischen E-Modul durch die Hydrophobierung zurückzuführen.

Bei den Nassschwingversuchen ist erkennbar, dass sich durch das unterschiedliche Eindringen der aufstehenden Prüflösung in den nicht hydrophobierten und hydrophobierten Beton der Verformungs- und damit auch Spannungszustand im Schwingbalken signifikant verändert. Zyklisch durchgeführte Feuchtemessungen mit TDR-Technik zeigen, dass die maximale Eindringtiefe der Prüflösung beim hydrophobierten Nassschwinger 35 mm und bei dem ohne Hydrophobierung mehr als 80 mm beträgt. Dies findet auch seinen Niederschlag in der Tausalzeindringtiefe. Darüberhinausgehend wurde festgestellt, dass die ermüdungsinduzierte Degradation durch die trockene zyklische Vorschädigung bei beiden Betonarten keinen signifikant erhöhten Feuchte- und Tausalzeintrag beim Einwalk- und Nassschwingversuch zur Folge hat. Ursächlich hierfür ist mit hoher Wahrscheinlichkeit das Quellen des Zementsteins beim Zutritt der Prüflösung, was zum partiellen beziehungsweise vollständigen Schließen der ermüdungsinduzierten Mikrorisse führt.

Zur Verifizierung der Auswirkungen der Hydrophobierung des Ober- und Unterbetons unter Berücksichtigung der zyklischen Vorschädigung und des interagierenden Tausalzeintrags wurden aus den auf maximal auf Biegezug beanspruchten Bereichen der Nass- und Trockenschwinger sowie aus den dazugehörigen zyklisch unbeanspruchten Balkensegmenten Prismen gewonnen. Diese wurden verschiedenartigen AKR-provozierenden Lagerungen unterzogen.

4 Schlussfolgerungen

Resümierend ist festzuhalten, dass auch das auf dem Silan-Siloxan-Gemisch basierende Hydrophobierungsmittel HM-B

aufgrund der bei der Klimawechsellaagerung mit NaCl-Lösung festgestellten Überschreitung des Dehnungsgrenzwerts und der damit einhergehenden sehr starken Abwitterung der Prüf-fläche keine Verwendung bei Betonfahrbahndecken finden kann. Vor diesem Hintergrund gewinnt die Analyse der Auswirkungen des Einsatzes des Hydrophobierungsmittels HM-C im Unter- und Oberbeton sowie im Waschbeton auf die schädigende AKR weiter an Bedeutung.

Der 60-°C-Betonversuch mit externer Alkalizufuhr der separat im Labor hergestellten Prismen ohne und mit dem Hydrophobierungsmittel HM-C hatte eine signifikante Reduzierung der Dehnung der Betonprismen über die 10 Zyklen zur Folge. So nehmen diese sogar generell negative Werte an. Ursächlich hierfür ist primär das Trocknungsschwinden der Prüfkörper, was durch zyklische gravimetrische Feuchtemessungen belegt wird. Auch bei der für den innenhydrophobierten Beton kritischeren Klimawechsellaagerung mit NaCl-Lösung wurde selbst beim hydrophobierten Waschbeton die schädigende AKR nachhaltig vermindert.

Die mit LIBS an Prismen nach der KWL mit NaCl-Lösung ermittelten Natrium- und Chloridprofile zeigen beim Vergleich der beiden Hydrophobierungsmittel eine Zunahme der Natrium-beziehungsweise Chlorideindringtiefen in folgender Reihung: HM-C < HM-B < Referenz.

Abschließend kann festgestellt werden, dass bei einer geeigneten Wirkstoffauswahl mit der Innenhydrophobierung der AKR-Schädigungsprozess in Betonfahrbahndecken drastisch vermindert werden kann. Dies lässt den Schluss zu, dass diese neue AKR-Vermeidungsstrategie durchaus das Potenzial für die Nutzbarmachung grenzwertiger alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen besitzt. Nachteilig ist jedoch beim Einsatz des Hydrophobierungsmittels, dass dadurch die mechanischen Eigenschaften und der Frost-Tausalz-Widerstand des Fahrbahndeckenbetons eine Verschlechterung erfahren. Es gilt nun unter anderem mittels weiterer Untersuchungen abzuklären, mit welchen betontechnologischen Maßnahmen diese Nachteile vermindert werden können. Für eine Überführung in die Praxis ist allerdings eine ganzheitliche Optimierung der Baustoffperformance unerlässlich. Diese sollte neben der Performance des Hydrophobierungsmittels und des interagierenden Luftporenbildner, der Auswahl der Zemente und der Gesteinskörnung, die Misch- und Einbautechnologie, die mechanische Performance und die AKR-Performance einschließen.

5 Literaturverzeichnis

- [1] ARS 04/2013, "Allgemeines Rundschreiben Straßenbau Nr. 04/2013: Vermeidung von Schäden an Fahrbahndecken aus Beton in Folge von Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR)", Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 2013.

