

Müller, M.; Ludwig, H.-M.; Schulte-Schrepping, C.; Breitenbücher, R.

Dauerhafte Betonfahrbahndecken durch Verwendung unterschiedlicher Bindemittel in Ober- und Unterbeton

1 Einleitung

Für die Herstellung von Betonfahrbahndecken wird traditionell Portlandzement (CEM I) eingesetzt, da erfahrungsgemäß bei Verwendung von CEM I Betonfahrbahndecken mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand ohne erhöhten Nachbehandlungsbedarf zielsicher hergestellt werden können. Aus ökologischer und wirtschaftlicher Sicht wäre auch der Einsatz hüttensandhaltiger Zemente sinnvoll, jedoch gibt es Bedenken, ob bei Verwendung solcher Zemente ein ausreichend hoher Frost-Tausalz-Widerstand bei Betonfahrbahndecken sicher erreicht werden kann. Dies betrifft insbesondere Zemente mit Hüttensandgehalten > 30 %.

Neben den ökologischen Aspekten sind Betone mit Portlandzement auch hinsichtlich einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) als vergleichsweise ungünstig einzustufen. Bei Verwendung potentiell alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen kann durch Zemente mit einem Hüttensandanteil von ca. > 30 % [1] oder Zugabe von Flugasche [2] eine betonschädigende AKR vermieden bzw. zumindest stark verzögert werden kann. Der hinsichtlich AKR-Vermeidung positive Einfluss hüttensandhaltiger Zemente resultiert dabei aus einem dichteren Mikrogefüge des Betons, wodurch Feuchte- und Stofftransporte deutlich verringert werden können. Weiterhin wirken sich auch zementchemische Einflüsse, wie ein geringerer Portlanditgehalt, eine verringerte OH-Ionenkonzentration (niedrigerer pH-Wert) sowie eine Absenkung des CaO/SiO₂-Verhältnis in den C-S-H-Phasen positiv auf den Widerstand gegen eine AKR aus.

Im Rahmen des hier vorgestellten Projektes wurde der Ansatz verfolgt, Zemente mit hohem Hüttensandgehalt ausschließlich im Unterbeton einer Betonfahrbahndecke einzusetzen, während der höher beanspruchte Oberbeton mit CEM I bzw. CEM II/A-S hergestellt wird. Derzeit ist in den TL Beton-StB 07 jedoch festgelegt, dass bei zweischichtigem Einbau Ober- und Unterbeton mit Zement der gleichen Art und Festigkeitsklasse herzustellen sind.

Neben hüttensandhaltigen Zementen kann auch ein teilweiser Zementersatz durch Flugasche zu einer ökologische Optimierung der Betonfahrbahndecke beitragen und parallel ebenfalls den Widerstand gegen eine AKR erhöhen. Jedoch existieren auch hier Bedenken hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes der Betonfahrbahndecke. Dementsprechend wird in den TL Beton-StB 07 der Einsatz von Zusatzstoffen eingeschränkt, so dass Flugasche zugegeben werden kann, diese jedoch zur Absicherung des hohen Frost-Tausalz-Widerstandes weder auf den Zementgehalt noch auf den w/z-Wert anrechenbar ist.

Im Rahmen eines Forschungsvorhabens sollten die notwendigen Kenntnisse gewonnen werden, um eine kritische Bewertung der zu berücksichtigenden Einschränkungen in der Verwendung unterschiedlicher Bindemittel im Ober- bzw. Unterbeton sowie ggf. eine Anrechenbarkeit der Flugasche im Betonstraßenbau vornehmen zu können. Im Ergebnis wird eine Modifizierung der entsprechenden Einschränkungen angestrebt.

Es galt nachzuweisen, dass sich unter den spezifischen Randbedingungen von Fahrbahndecken aus Beton weder für Herstellung, Nutzung sowie Dauerhaftigkeit Nachteile oder Beeinträchtigungen ergeben. Insbesondere ist dabei das Verbund- und Verformungsverhalten der beiden unterschiedlichen Betone zu berücksichtigen. Weiterhin war zu untersuchen, inwiefern durch die Verwendung von hüttensandhaltigen Zementen bzw. von Flugasche im Unterbeton das Risiko einer AKR vermindert wird und dadurch die Anzahl an verwendbaren Gesteinskörnungen im Unterbeton vergrößert werden kann.

2 Versuchsprogramm

2.1 Versuchsumfang

Entsprechend der in der Einleitung dargelegten Problemstellungen wurde ein Untersuchungsprogramm mit folgenden Schwerpunkten festgelegt.

1. Beurteilung des AKR-Minderungspotentials hüttensandhaltiger Bindemittel sowie von Flugasche im Unterbeton mittels AKR-Performanceprüfung
2. Auswirkung der Verwendung hüttensandhaltiger Zemente sowie von Flugasche auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Ober- und Unterbeton
3. Auswirkungen unterschiedlicher Betonparameter auf die baupraktische Ausführbarkeit sowie auf das Langzeitverhalten.

Hinsichtlich der baupraktischen Ausführbarkeit lag der Fokus auf der Verlangsamung der Festigkeitsentwicklung des Unterbetons, was ggf. ein rechtzeitiges Befahren der jungen Fahrbahndecke (Ausbürsten, Fugenschneiden) verhindern könnte. Dabei wurden auch unterschiedliche Lagerungstemperaturen berücksichtigt. Die Auswirkungen auf das Langzeitverhalten wurden u. A. an großformatigen, zweischichtigen Betonbalken untersucht, die einer zyklischen Belastung ausgesetzt wurden. An diesen Balken wurden die Gefügedegradation und auch eine Schwächung der Verbundfuge untersucht. Im Rahmen dieses Beitrages werden nur ausgewählte Ergebnisse zu den ersten beiden Schwerpunkten sowie zur baupraktischen Ausführbarkeit dargestellt.

2.2 Ausgangsstoffe

Für die Untersuchungen wurden fünf Zemente mit identischer Klinkerbasis aber unterschiedlichem Hüttensandgehalt verwendet. Angestrebt wurde eine Abstufung des Hüttensandgehaltes von ca. 0, 15, 30, 40 und 50 %. Für das Untersuchungsprogramm konnte ein Hersteller gefunden werden, der entsprechende Zemente bis zu einem Hüttensandgehalt von ca. 40 % produziert. Der Zement mit 50 % Hüttensand (CEM III/A (Labor)) wurde durch die Zugabe von Hüttensandmehl zu dem Zement mit 40 % Hüttensand hergestellt. Weiterhin wurde eine Steinkohlenflugasche gemäß DIN EN 450-1 verwendet.

Tabelle 1: Eigenschaften der Zemente

	CEM I 42,5N	CEM II/A-S 42,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM III/A (Labor)
BLAINE* [cm ² /g]	3480	3860	3960	4540	4640
Wasseranspruch [%]	25,5	26,5	25,5	28,8	29,0
Druckfestig. 2d [MPa]	26,2	24,0	21,0	15,4	14,8
Druckfestig. 28d [MPa]	55,9	54,8	50,0	58,1	57,9
Na ₂ O-Äquivalent	0,53	0,60	0,61	0,64	n.b.
Hüttensandgehalt	0	14	28	41	50

*Spezifische Oberfläche

2.3 Rezepturen

Für die Untersuchungen wurden ein Oberbeton (Waschbeton), ein Splittunterbeton (Granodiorit) sowie für ausgewählte Untersuchungen auch ein Kiesunterbeton verwendet. Abgesehen vom Sand im Splittunterbeton wurden alkalireaktive Gesteinskörnungen für den Unterbeton verwendet. Tabelle 2 zeigt die wesentlichen Eckpunkte der Rezepturen. Für die AKR-Versuche wurde zusätzlich ein Splittunterbeton mit einer alkalireaktiven Grauwacke verwendet.

Tabelle 2: Eckdaten der Betonrezepturen (ohne Flugasche)

Referenzrezeptur	Gesteinskörnung	Zementgehalt [kg/m ³]	w/z-Wert [-]	Zielluftgehalt [%]
Oberbeton	Sand 0/2 (Werk 1) und Diabas 2/5, 5/8 (Werk 2)	420	0,42	5,5-6,5
Splittunterbeton	Sand 0/2 (Werk 1) und Granodiorit 2/8, 8/16, 16/22 (Werk3)	340	0,42	4,0-5,0
Kiesunterbeton	Sand 0/2 und Kies 2/8, 8/16 und 16/32 (Werk 4)	340	0,42	4,0-5,0
Splittunterbeton	Sand 0/2 (Werk 1) und Grauwacke 2/5, 5/8, 8/16, 16/22 (Werk 5)	340	0,42	4,0-5,0

Bei Verwendung von Flugasche wurde diese mit einem k-Wert von 0,4 auf den w/z-Wert angerechnet. Der Zementgehalt wurde entsprechend reduziert und der Wassergehalt konstant gehalten. Bei den flugaschehaltigen Rezepturen musste die Luftporenbildnerdosierung deutlich erhöht werden, um den notwendigen Luftgehalt im Frischbeton zu realisieren. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die Bindemittelvarianten.

Tabelle 3: Bindemittelvarianten

Zement	CEM I 42,5N			CEM II/A-S 42,5 R			CEM II/B-S 32,5 R		CEM III/A 42,5 N		CEM III/A (Labor)
Flugaschgehalt [%]	0	15	30	0	15	30	0	30	0	15	0
Oberbeton	X	X	X	X	X	X					
Unterbetone	X		X				X	X	X	X	X

3 Ergebnisse

3.1 AKR

Das AKR- Schädigungspotential der Gesteinskörnungen für die Unterbetone wurde mittels Mörtelschnelltest (Alternativverfahren gemäß Alkali-Richtlinie des DAfStB [3]) grob eingeschätzt. Die mit dem Mörtelschnelltest geprüften Gesteinskörnungen werden auf Grundlage der gemessenen Dehnung an den Mörtelprismen nach Lagerung bei 70 °C über Wasser bis zum 28. Tag bewertet. Bei einer Dehnung von größer 1,5 mm/m nach 28 Tagen ist die Gesteinskörnung als potentiell alkalireaktiv einzustufen. Mit weiter steigendem Mörtelschnelltest-Dehnungswert ist mit einer steigenden Alkalireaktivität der Gesteinskörnung zu rechnen. Gesteinskörnungen mit Dehnungswerten im Mörtelschnelltest von größer 2,0 mm/m werden als alkalireaktiv eingestuft. Die aufgeführten Grenzwerte gelten ausschließlich für grobe Gesteinskörnungen.

Die Dehnungen des Mörtelschnelltests (Abb. 1) für den Granodiorit aus Werk 3 liegen im unkritischen Bereich. Aufgrund von Erfahrungswerten war jedoch im Beton von einer (leichten) Alkali-Kieselsäure-Reaktivität auszugehen. Die Dehnungswerte für die Kiese aus Werk 4 liegen deutlich über dem Kriterium von 1,5 mm/m, teilweise sogar über 2,0 mm/m. Daher wurde von einem kritischen AKR-Schädigungspotential der Kiese dieses Werkes ausgegangen.

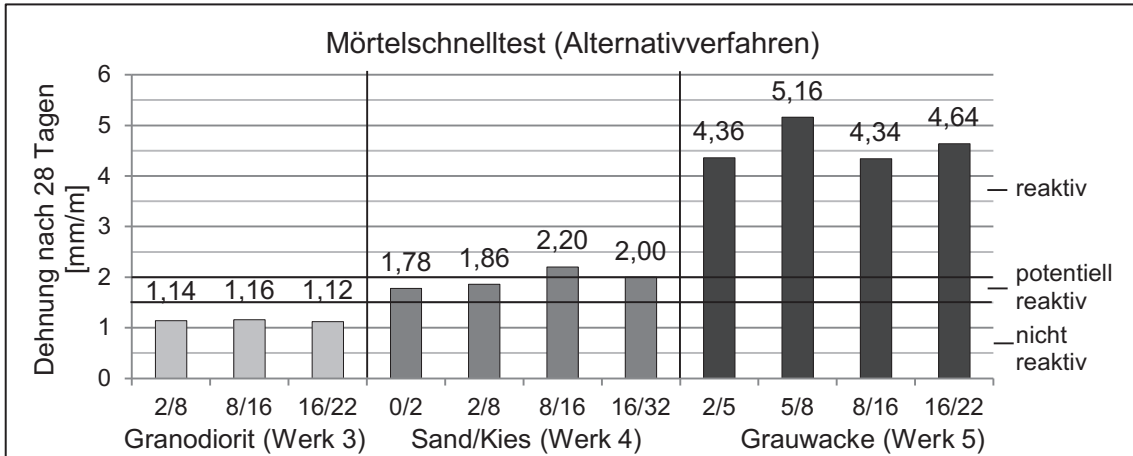


Abb. 1: Dehnungen im Mörtelschnelltest nach 28 Tagen (Alternativverfahren)

Die Dehnungswerte der Grauwacke aus Werk 5 liegen im Bereich des zwei- bis zweieinhalbfachen des Grenzkriteriums von 2,0 mm/m. Auf Basis des Mörtelschnelltests war von einem sehr hohen AKR-Schädigungspotential dieser Gesteinskörnung auszugehen.

Die Untersuchungen zum Minderungspotential hinsichtlich AKR erfolgten mit der am FIB entwickelten AKR-Performance-Prüfung (FIB-Klimawechsellagerung -KWL). Diese ermöglicht die zeitraffende Simulation wechselnder Klimabedingungen unter Einbindung von angreifenden Medien. Eine detaillierte Beschreibung des Verfahrens findet sich z.B. in [4]. In den folgenden zwei Abbildungen werden die Ergebnisse der KWL (Dehnungswerte) für den Kiesunterbeton sowie für den Splittunterbeton mit der reaktiven Grauwacke aufgeführt. Dargestellt sind die Werte bei äußerer Alkalizufuhr durch Einwirkung von NaCl-Lösung. Als Bindemittel wurden der CEM I, der CEM II/B-S, der CEM III/A sowie der CEM I + 30 % Flugasche eingesetzt. Der Splittunterbeton mit dem Granodiorit wies auch in der Rezeptur mit CEM I schon unkritische Dehnungen auf und wird daher hier nicht gezeigt.

Kiesunterbeton

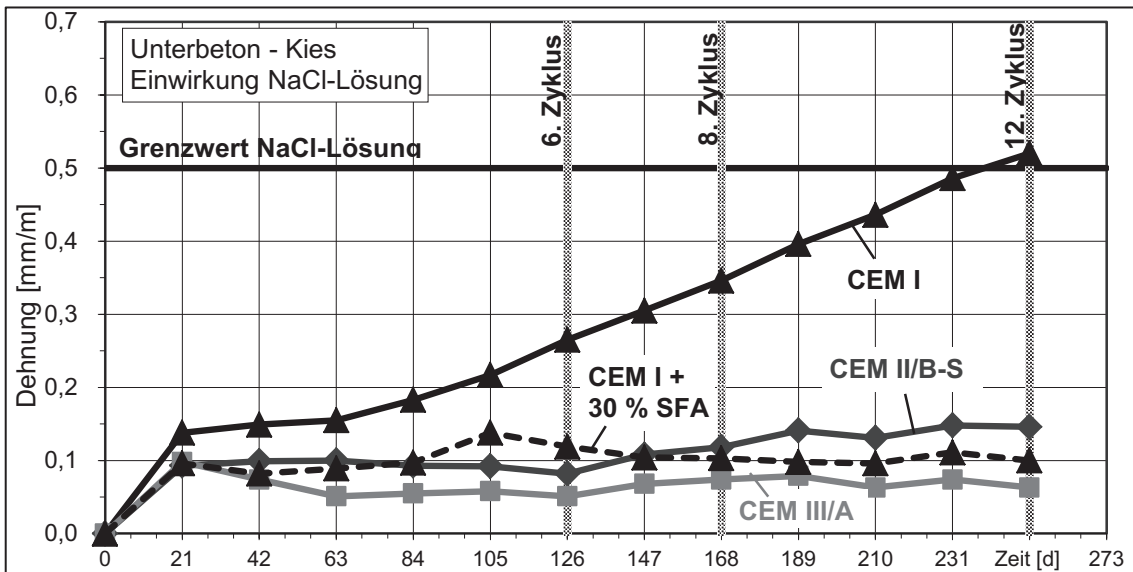


Abb. 2: Klimawechsellagerung Kiesunterbeton mit NaCl-Einwirkung

Bei der Rezeptur mit CEM I ohne Flugasche war ab dem 5. Zyklus eine stetige Dehnungszunahme zu verzeichnen, welche bis zum Ende der Prüfung nach 12 Zyklen nicht abflachte. Nach 12 Zyklen überschritt die Dehnung den Grenzwert für NaCl-Lösung von 0,5 mm/m. Die Rezeptur wurde auf Basis der KWL als kritisch hinsichtlich AKR eingestuft. Diese Beurteilung wurde durch Untersuchungen an Dünnschliffen bestätigt. Die Ergebnisse zeigen, dass aufgrund des niedrigen Alkaligehaltes des CEM I das Auftreten einer schädigenden AKR bei diesem Beton zeitlich verzögert, aufgrund der Alkalizufuhr von außen jedoch nicht verhindert werden kann.

Die Dehnungswerte der Rezepturen mit CEM II/B-S, CEM III/A sowie CEM I + 30 % Flugasche lagen über den kompletten Prüfzeitraum im unkritischen Bereich. Schon mit einem Hüttensandgehalt von ca. 30 % im CEM II/B-S konnte das Auftreten einer AKR beim Kiesunterbeton wirkungsvoll unterbunden werden, auch bei äußerer Alkalizufuhr.

Splittunterbeton mit alkalireaktiver Grauwacke

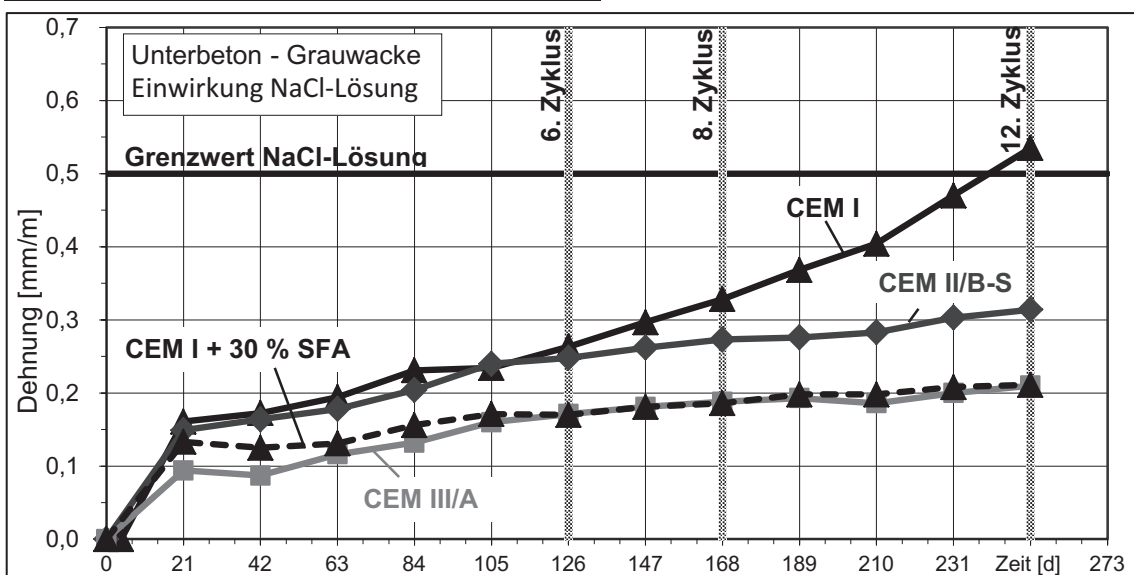


Abb. 3: Klimawechsellagerung Splittunterbeton (Grauwacke) mit NaCl-Einwirkung

Die Ergebnisse des Splittunterbetons mit der reaktiven Grauwacke zeigten die gleichen Tendenzen wie beim Kiesunterbeton. Auch hier konnte schon bei einem Hüttensandgehalt von 30% das Auftreten einer AKR unterbunden werden. Die hier beobachtete hohe Wirksamkeit hinsichtlich AKR-Vermeidung kann zwar nicht pauschal auf alle hüttensand- bzw. flugaschehaltigen Zemente übertragen werden, zeigt aber dennoch das hohe Potential entsprechender Bindemittel.

3.2 Ausbüsten und maßgebende Druckfestigkeit bei 20 °C

Die mechanische Erstbelastung des jungen Fahrbahndeckenbetons erfolgt bei der Waschbetonbauweise in der Regel beim Ausbürsten des Waschbetons. Der ungefähre Zeitpunkt dieser Erstbelastung wurde über die Bestimmung des spätmöglichen Ausbürstzeitpunktes bei 20 °C Lagerung festgestellt. Dafür wurde eine Ausbürstvorrichtung gemäß [5] verwendet. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die Ergebnisse als erreichte mittlere Texturtiefe in Abhängigkeit vom Ausbürstzeitpunkt. Wurden 0,60 mm unterschritten, so wurde dies als Ende des Ausbürstzeitraumes definiert.

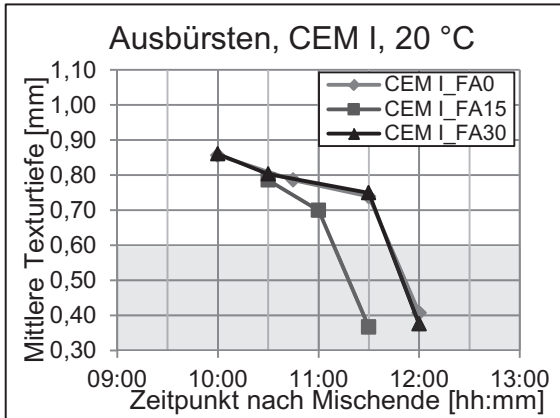


Abb. 4: Ausbürsten CEM I bei 20 °C

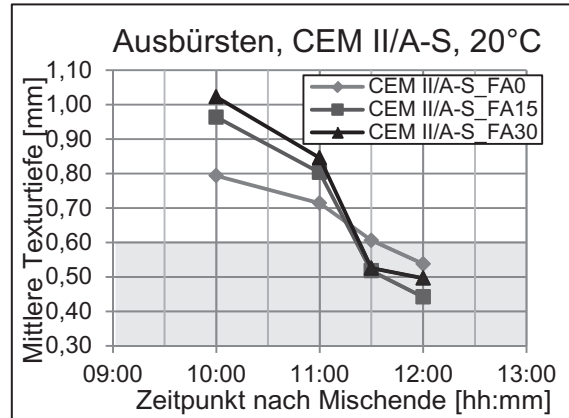


Abb. 5: Ausbürsten CEM II/A-S bei 20 °C

Bei allen Rezepturen lag das Ende des Ausbürstzeitraumes bei 11 bis 11,5 Stunden. Die Druckfestigkeit nach 12 Stunden bei 20 °C kann daher als Näherungswert für eine vergleichende Festigkeitsentwicklung herangezogen werden. Die ermittelte Spanne der Oberbetonfestigkeiten nach 12 h ist als grauer Querbalken dargestellt (Abb. 6, Abb. 7). Dem werden die Festigkeiten der Unterbetone (Säulen) gegenübergestellt.

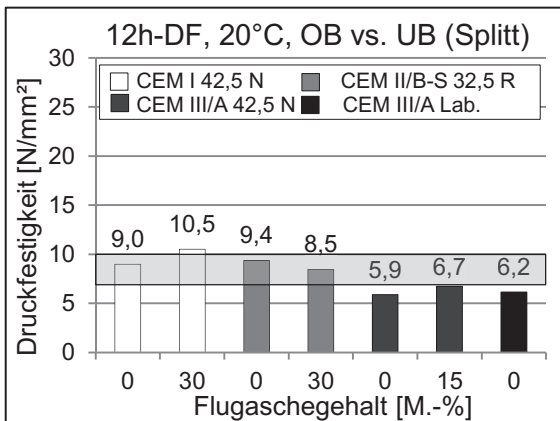


Abb. 6: Vergleich Druckfestigkeit Oberbeton zu Unterbeton (Splitt) nach 12h bei 20 °C

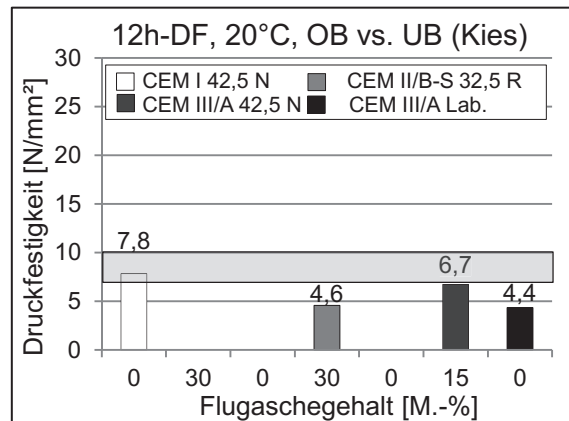


Abb. 7: Vergleich Druckfestigkeit Oberbeton zu Unterbeton (Kies) nach 12h bei 20 °C

Die 12 Stunden-Druckfestigkeit des **Splittunterbetons** mit CEM I und CEM II/B-S lag innerhalb bzw. knapp oberhalb des Festigkeitsbereiches des Oberbetons. Nach 12 h war schon eine deutliche Verlangsamung der Festigkeitsentwicklung der Splitt-Unterbetone mit den CEM III/A-Zementen festzustellen, wobei die Festigkeiten nur geringfügig unterhalb der Festigkeitsspanne des Oberbetons lagen. Beim **Kiesunterbeton** lag bei der Prüfung nach 12 Stunden nur die Druckfestigkeit des Referenzunterbetons (CEM I 42,5 N, ohne Flugasche) noch knapp im Festigkeitsbereich der Oberbetone. Die anderen Unterbetone lagen unterhalb der Festigkeiten der Oberbetone. Ursache war vermutlich die geringere Verzahnung der ungebrochenen Gesteinskörnung.

3.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand der Betone wurde mit dem CDF-Verfahren gemäß DIN CEN/TS-12390-9 bestimmt. Die Prüfung erfolgte an den teflongeschalteten Seitenflächen (Referenzfläche) von Betonwürfeln der Kantenlänge 150 mm. Ergänzend wurde ebenfalls der Frost-Tausalz-Widerstand der Waschbetonoberfläche ausgewählter Oberbetonrezepturen ermittelt.

Die Nachbehandlung des Waschbetons nach dem Ausbürsten erfolgte mit einem handelsüblichen Nachbehandlungsmittel. Die Proben lagerten bis zur Prüfung im Normklima 20°C / 65 % rel. Feuchte. Die folgenden zwei Abbildungen zeigen die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln für den Oberbeton bei Prüfung an der Referenzfläche sowie an der Waschbetonoberfläche.

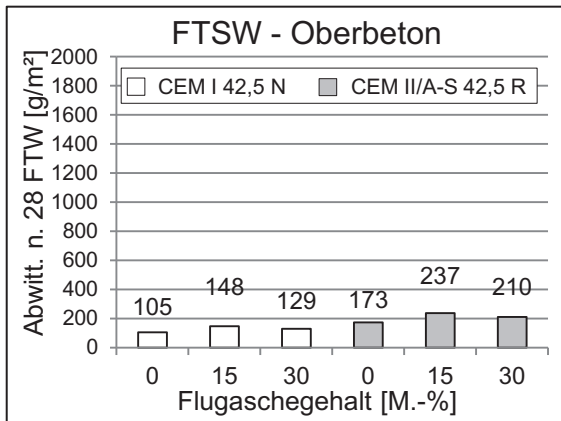


Abb. 8: Oberbeton - Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln

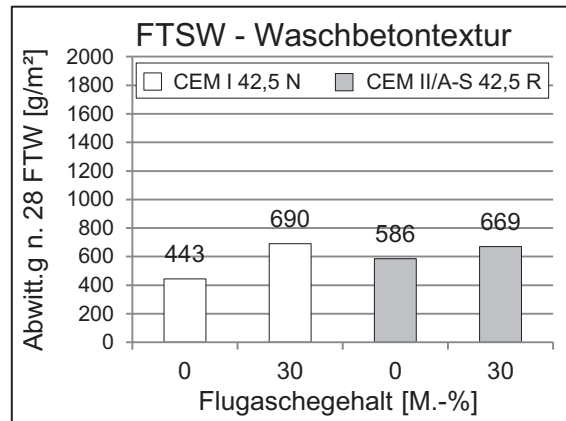


Abb. 9: Waschbetontextur – Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln

Die Abwitterungen der Referenzflächen nach 28 Frost-Tauwechseln lagen in der Größenordnung von 100 bis 250 g/m². Die Betone wiesen damit einen hervorragenden Frost-Tausalz-Widerstand auf. An der Waschbetonoberfläche traten erheblich höhere Abwitterungen nach 28 Frost-Tauwechseln auf, verursacht durch die ungünstigere Nachbehandlung. Die Rezepturen mit 30 % Flugasche wiesen einen etwas verringerten Frost-Tausalz-Widerstand auf.

Die folgenden Abbildungen zeigen Ergebnisse der CDF-Prüfungen für die Unterbetone.

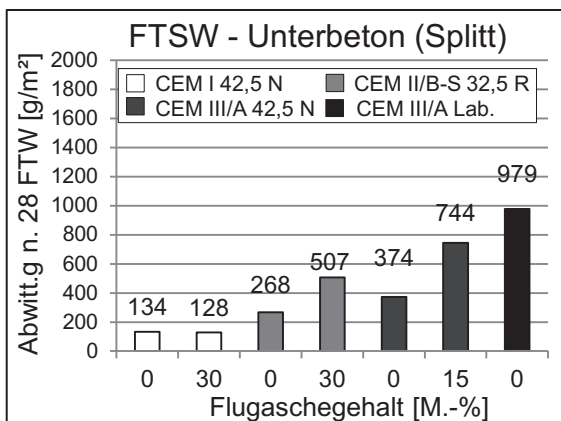


Abb. 10: Unterbeton (Splitt) - Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln

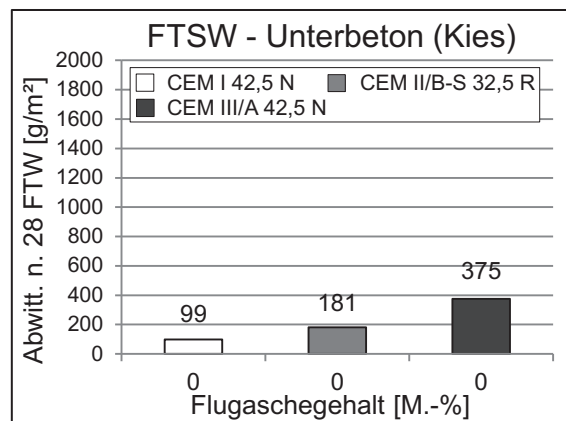


Abb. 11: Unterbeton (Kies) - Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln

Der Frost-Tausalz-Widerstand des Splittunterbetons verringerte sich mit zunehmendem Hüttensandgehalt bis 40 % (CEM III/A) im Zement stetig. Bei der weiteren Erhöhung des Hüttensandanteils auf 50 % (CEM III/A Labor) verringerte sich der Widerstand nochmals deutlich. Dieses Verhalten steht im Einklang zu Erkenntnissen aus [5], wonach bei Betonen mit Hochofenzementen ab ca. 50 % der Frost-Tausalz-Widerstand dieser Betone signifikant reduziert wird.

Der teilweise Zementersatz durch Flugasche wirkte sich erst ab Hüttensandgehalten im Zement von 30 % negativ auf den Frost-Tausalz-Widerstand aus. Die Ergebnisse des Kiesunterbetons zeigten dieselben Tendenzen wie beim Splittunterbeton. Insgesamt lagen die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln bei allen Proben deutlich unterhalb des empfohlenen Prüfkriteriums von 1.500 g/m². Alle Unterbetone wiesen somit einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand auf.

4 Zusammenfassung

Gemäß dem Regelwerk für Betonstraßen muss für zweischichtige Betonfahrbahndecken derselbe Zement in Ober- und Unterbeton verwendet werden. Weiterhin ist die Anrechnung von Flugasche auf den w/z-Wert nicht gestattet. Durch eine flexiblere Handhabung der Bindemittel könnten sich Vorteile für die Betonbauweise ergeben. So könnte z.B. der stärker durch Frost beanspruchte Oberbeton mit CEM I hergestellt werden, während Zemente mit höheren Hüttensandgehalten nur im Unterbeton angewendet werden. Im Unterbeton könnten dann Gesteinskörnungen eingesetzt werden, die in einer herkömmlichen CEM I-Rezeptur als AKR-kritisch eingestuft würden.

Anhand von AKR-Performance-Prüfungen konnte die hohe Wirksamkeit hüttensandhaltiger Zemente sowie auch von Flugasche auf die AKR-Verminderung aufgezeigt werden. Schon mit einem CEM II/B-S wurden AKR-kritische Rezepturen in den unkritischen Bereich verschoben. Der Frost-Tausalz-Widerstand der Betone wurde bei hohen Gehalten an Hüttensand bzw. Hüttensand + Flugasche verringert, bewegte sich aber in jedem Fall noch im günstigen Bereich. Um eine Beeinträchtigung der baupraktischen Umsetzbarkeit zu vermeiden, sollte sich die Festigkeitsentwicklung von Ober- und Unterbeton im jungen Alter nicht zu stark unterscheiden. Modellberechnungen zur Festlegung einer Mindestfestigkeit für die frühe Belastung sind derzeit noch in Bearbeitung.

5 Literatur

1. Giebson, C.; Seyfarth, K.; Stark, J. (2010): Effectiveness of ground granulated blast furnace slag in preventing deleterious ASR in concretes exposed to alkali-containing deicer solutions. in International RILEM Conference on Material Science (PRO 77).
2. Schmidt, K. (2009): Verwendung von Steinkohlenflugasche zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure Reaktion im Beton. Dissertation. TU München.
3. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, DAfStB (Hrsg.): Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton: Alkali-Richtlinie. Berlin, 2007.
4. Stark, J.; et al. (2006): AKR-Prüfverfahren zur Beurteilung von Gesteinskörnungen und projektspezifischen Betonen. Beton, Jahrgang 56, Heft 12, S. 574-581.
5. Ludwig, H.-M.; Ehrhardt, D. (2013): Prüfung der Kombinationsmittel zur Herstellung von Waschbetonoberflächen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Nr. 1090.
6. Ludwig, H.-M. (1996): Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar.

6 Autoren

Dipl.-Ing. Matthias Müller,
Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
Bauhaus-Universität Weimar,
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Coudraystr. 11, D-99421 Weimar

M.Sc. Christoph Schulte-Schrepping,
Prof. Dr.-Ing. Rolf Breitenbücher
Ruhr-Universität Bochum
Lehrstuhl für Baustofftechnik
Universitätsstraße 150, D-44780 Bochum

Kontakt: matthias.mueller@uni-weimar.de