

Wiederverwendung von Restwasser in der Herstellung von Luftporen- und hochfesten Betonen

Christoph Müller, Sebastian Palm – VDZ gGmbH (Deutschland)

Christian Pierre, Gunther Mosselmans – CRIC - National Centre for Technical and Scientific Research for the Cement Industry (Belgien)

Martin Peyerl, Gerald Maier – Smart Minerals GmbH (Österreich)

1 Übersicht

Die Nutzung von Restwasser in Transportbetonwerken findet im europäischen Vergleich in unterschiedlichem Umfang statt. In einem europäischen Forschungsprojekt wurden daher einige grundlegende Fragen der Restwassernutzung in Transportbetonwerken noch einmal grenzübergreifend untersucht. Hierzu wurde Restwasser in verschiedenen Transportbetonwerken beprobt und im Labor auf den in EN 1008 genannten Grenzwert der Dichte bzw. des Feststoffgehaltes sowie darüber hinaus aufkonzentriert. Die Frisch- und Festbetoneigenschaften von Betonen mit und ohne Restwasser wurden verglichen.

Die Verwendung von Restwasser führt mit steigender Dichte des eingesetzten Restwassers unter anderem zu einem höheren Wasser- bzw. Zusatzmittelanpruch, zu einer erhöhten Frühfestigkeit sowie zu einer erhöhten Abwitterung im Frostversuch bei Betonen ohne künstliche Luftporen. Keine signifikanten Änderungen konnten festgestellt werden bezüglich der 2d bis 28d-Festigkeiten von Luftporenbeton oder hochfesten Betonen sowie des Frostwiderstandes von Betonen mit künstlichen Luftporen.

Der Einsatz von Restwasser in den von der EN 1008 festgelegten Grenzen wäre daher auch in hochfesten Betonen und Betonen mit künstlichen Luftporen möglich.

2 Einleitung

Im Forschungsvorhaben wurde untersucht, ob die in allen drei beteiligten Ländern bestehende Beschränkung der Nutzung von Restwasser in Transportbetonwerken für Luftporen- und hochfesten Betonen gerechtfertigt ist oder aufgehoben werden könnte. Darüber hinaus ist in Belgien grundsätzlich nur die Verwendung von feststofffreiem Restwasser zur Herstellung von Beton zugelassen. Daher ist für das CRIC auch die Fragestellung von Interesse, ob feststoffhaltige, nicht gefilterte Restwässer zur Herstellung aller Betone verwendet werden können und wie hoch der maximale Feststoffanteil im Restwasser sein darf. Zum Dritten wurde der Fragestellung nachgegangen, welchen Einfluss im Restwasser eventuell vorhandene Zusatzmittel, insbesondere Verzögerer, auf die Eignung von Restwasser zur Herstellung von Beton haben können.

3 Versuche

3.1 Allgemeines

Es wurden sowohl Versuche mit künstlichen Restwässern gemäß CUR 28 zum Einfluss von Verzögerern als auch mit realen Restwässern aus Transportbetonwerken durchgeführt.

3.2 Künstliche Restwässer

Es wurden 6 künstliche Restwässer gemäß CUR 28 mit verschiedenen Verzögerern hergestellt. Folgende Bestandteile wurden gemischt und bei (20 ± 2) °C für 16 Stunden gelagert:

- 1 Teil CEM I 52,5 N gemäß EN 480-1 (1,35 kg)
- 2 Teile CEN Normensand gemäß EN 196-1 (2,70 kg entspricht 2 Beuteln Normensand)
- 3 Teile Leitungswasser (4,05 kg)
- Verzögerer mit der maximalen im jeweiligen Datenblatt angegebenen Konzentration

Nach der Lagerung wurden die Mischungen für 30 Sekunden manuell geschüttelt und nachfolgend auf einem 2 mm-Sieb abgeseibt. Anschließend wurde das (künstliche) Restwasser gefiltert. (24 ± 2) Stunden nach der Filtration wurden mit den künstlichen Restwässern Zementleime gemäß EN 196-3 und Mörtel gemäß EN 196-1 hergestellt. Als Zement wurde ein CEM I 52,5 N gemäß EN 480-1 verwendet. Für eine Referenzmischung wurde Leitungswasser verwendet. Der Erstarrungszeiten wurden gemäß EN 196-3 bestimmt. Die Ergebnisse sind **Bild 1** dargestellt. Die Druckfestigkeit der Mörtel wurde nach 2, 7 und 28 Tagen gemäß EN 196-1 bestimmt. **Bild 2** zeigt die Ergebnisse.

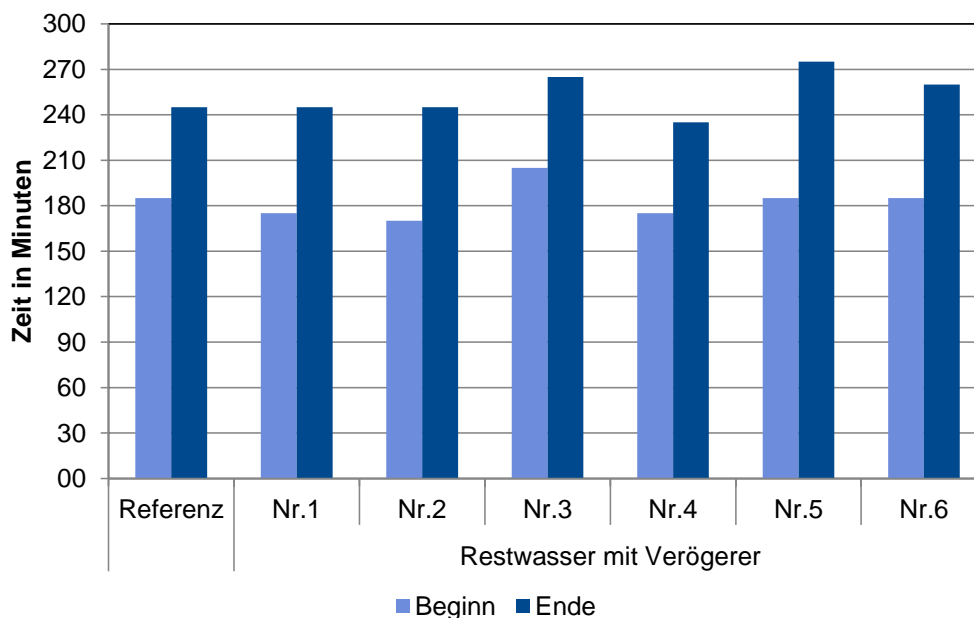


Bild 1 Erstarrungszeiten

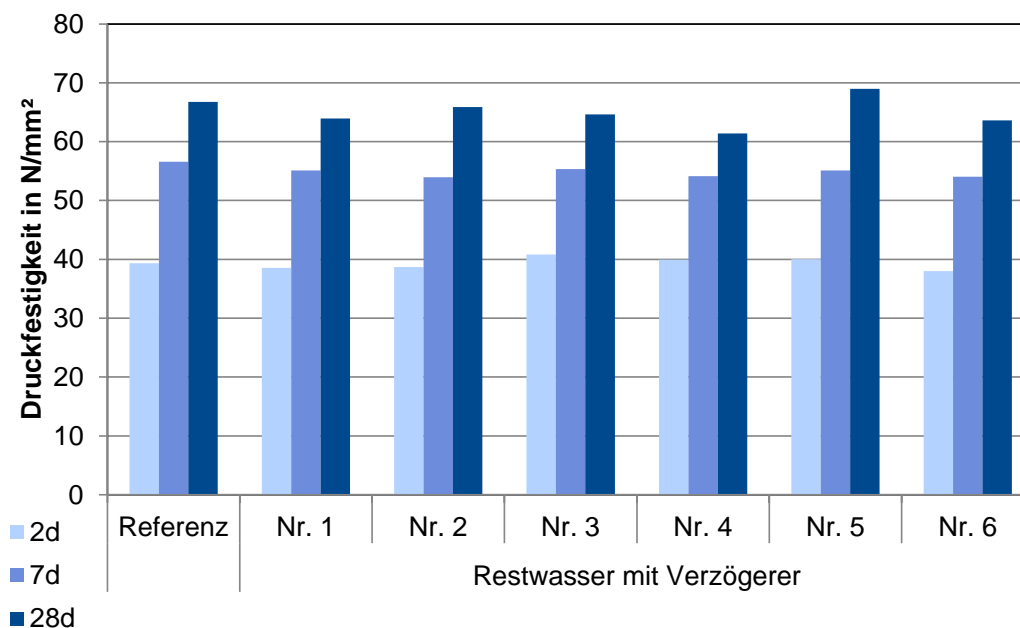


Bild 2 Mörteldruckfestigkeiten

Die Verwendung von künstlichem Restwasser gemäß CUR 28 hatte weder auf den Wasseranspruch, noch auf die Erstarrungszeiten oder die Festigkeitsentwicklung einen signifikanten Einfluss. Daher wurden alle folgenden Versuche mit realen Restwässern durchgeführt.

3.3 Reale Restwässer – Probenahme und Analyse

Es wurden Restwasserprobenahmen in drei Transportbetonwerken durchgeführt. Die Werke wurden jeweils einmal im Winter (W) und einmal im Sommer (S) beprobt, so dass insgesamt 6 Restwasserproben für Prüfungen an Mörteln untersucht wurden. Anstelle einer Sommerprobenahme in einem Transportbetonwerk wurde im VDZ das Eigenrestwasser aus dem Sedimentationsbehälter des Betonlabors beprobt. Zusätzlich zu den Restwasserproben für die Mörtelprüfungen wurde ein Restwasser für die Betonprüfungen („B“) in einem bereits beprobten Transportbetonwerk entnommen. Nach der Probenahme lagerten die Restwässer in 120 l – Gefäßen bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$. Die Proben wurden permanent mit einem Flügelmischer mit rd. 1000 U/min in Bewegung gehalten, um Sedimentationen weitestgehend zu vermeiden.

Die Restwässer wurden gemäß EN 1008 analysiert. Die Ergebnisse zeigt **Tabelle 1**. Die vergleichsweise hohen Konzentrationen von Chloriden und Alkalien im Eigenrestwasser des VDZ sind darauf zurückzuführen, dass die Probenahme im Sedimentationsbecken vor der chemischen Neutralisierung stattfand. In dieses Becken werden auch Prüfflüssigkeiten, beispielsweise für Frost-Taumittelprüfungen (Alkalien, Chloride), Chloridmigrations- und Diffusionsprüfungen (Chloride) sowie für AKR-Prüfungen (Alkalien) entsorgt.

Tabelle 1 Analyse der Restwässer

Messwert	Einheit	1(W)	2(W)	3(W)	1(S)	3(S)	VDZ	B	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
Öle und Fette	-	Spuren	nicht vorhanden						
Reinigungsmittel	-	nicht vorhanden						vorhanden	nicht vorhanden
Farbe	-	hellgelb	farblos	hellgelb	farblos				
Geruch	-	zementähnlich							
Säuren (pH-Wert)	-	12,6	12,6	12,5	12,6	12,6	12,3	12,6	
Huminstoffe	-	nicht vorhanden							
Chloride	mg/l	12	18	14	16	27	4.620	30	
Sulfate	mg/l	2	2	4	3	2	41	3	
Na ₂ O-Äquivalent	mg/l	522	444	946	347	361	3.594	533	
Zucker	mg/l	nicht vorhanden							
Phosphat	mg/l	<1	<1	<1	<1	<1	<1	4,4	
Nitrat	mg/l	1	1	3	5	4	8	1	
Blei	µg/l	3	1	4	1	1	0	0	
Zink	µg/l	393	528	175	201	146	199	244	
Dichte des Restwassers	g/cm ³	1,08	1,07	1,14	1,06	1,04	1,08	nicht bestimmt	
Dichte der Feststoffe	g/cm ³	2,56	2,56	2,51	2,32	2,16	2,23	2,14	

3.4 Reale Restwässer – Untersuchungen an Zementleim und Mörtel

Als Zement wurde ein CEM I 52,5 N gemäß EN 480-1 verwendet. Für Referenzmischungen wurde Leitungswasser verwendet. In den Prüfmischungen wurden Restwässer mit definierten, durch Sedimentation bzw. Verdünnen eingestellten Dichten verwendet. Abweichend von EN 196-3 bzw. EN 196-1 wurde zusätzlich jeweils die Fließmittelmenge (FM) verwendet, die für das Erreichen eines konstanten Ausbreitmaßes von (140 ± 10) mm gemäß EN 1015-3 benötigt wurde.

Der Wasseranspruch wurde gemäß EN 196-3 bestimmt. **Bild 3** zeigt die Ergebnisse. Mit steigender Dichte des Restwassers nimmt der Wasseranspruch zu. Mit der Verwendung von Fließmitteln lässt sich dies teilweise kompensieren.

An Mörteln wurde die Druckfestigkeit nach 2, 7 und 28 Tagen gemäß EN 196-1 bestimmt. **Bild 4** zeigt die Ergebnisse. Auf die Festigkeitsentwicklung hatte die Verwendung von Restwasser keinen signifikanten Einfluss. Eine Ausnahme stellt das Eigenrestwasser „VDZ“ dar. Dieses Restwasser wäre gemäß EN 1008 aber nicht für die Herstellung von Beton zugelassen.

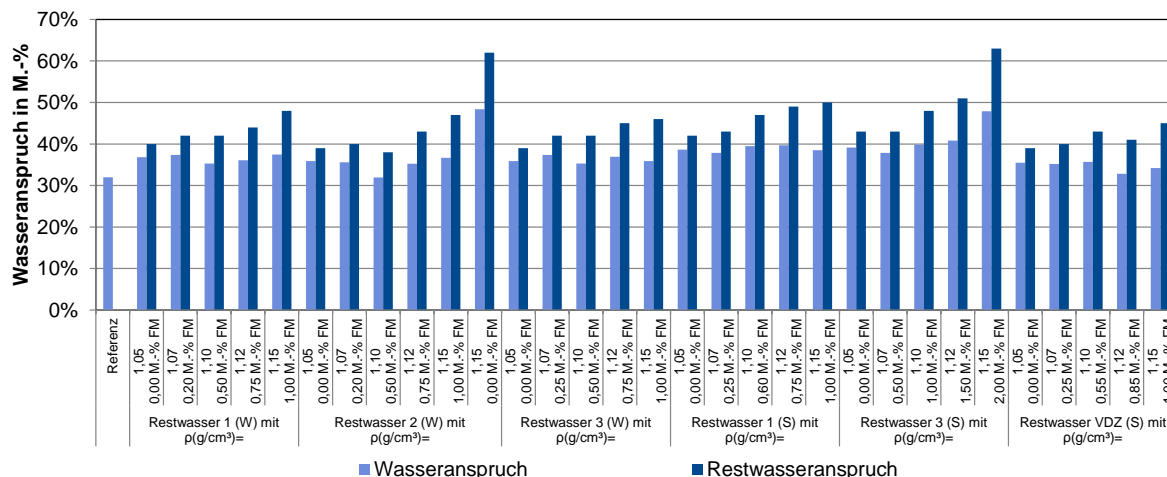


Bild 3 Wasseranspruch

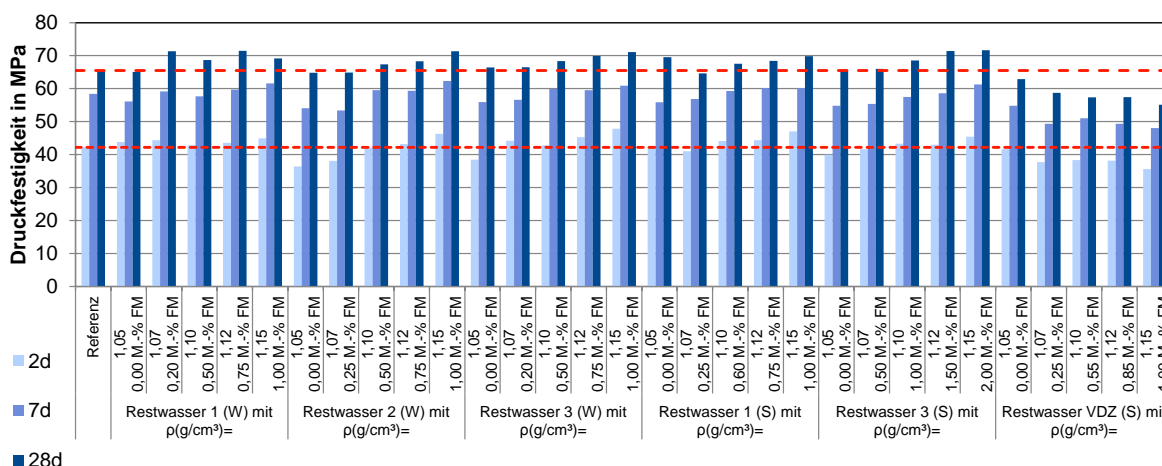


Bild 4 Mörteldruckfestigkeiten

3.5 Reale Restwässer – Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit von Beton

3.5.1 Allgemeines

Für die Betonversuche wurde ein weiteres Restwasser „B“ in einem Transportbetonwerk entnommen. Dieses Restwasser wurde auf 2 verschiedene Dichten eingestellt:

- Dichte, die gemäß EN 1008 rd. 1 M.-% der Gesteinskörnung im Beton entspricht (rd. 1,06 g/cm³)
- 1,15 g/cm³

Es wurden drei Betone und ein Mörtel (Tabelle 2) jeweils mit Leitungswasser sowie mit Restwasser der beiden genannten Konzentrationen hergestellt. Die Sieblinie für die Betone B1 bis B3 wurde gemäß EN 480-1 bzw. DIN 1045-2 (A16/B16) eingestellt. Es wurde ein PCE-basiertes Fließmittel verwendet.

Tabelle 2 Beton- / Mörtelrezepturen

	B1 Referenzbeton	B2 Beton mit künstl. Luftporen	B3 Hochfester Be- ton	MS Mörtel zur Prüfung des Sulfatwiderstandes
1	2	3	4	5
Zement [kg/m ³]	300	340	430	450*
Silikastaub [kg/m ³]	-	-	30	-
w/z	0,60	0,45	0,31	0,50
Zielluftgehalt [Vol.-%]	-	5,0 ± 0,5	-	-
Zielkonsistenzklasse	F3 / F4	F3 / F4	F4	-
Gesteinskörnung	Sand, Rheinkies	Sand, Rheinkies	Sand, Rheinkies	Normensand

*g/Mörtelmischung

3.5.2 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften der Betone B1 bis B3 sind in **Bild 5** bis **Bild 9** dargestellt. Für die Bestimmung des Einflusses von Zeit, Temperatur und Restwasserdichte auf die Konsistenzentwicklung an der Betonrezeptur B2 wurden direkt nach der Herstellung bei (20 ± 2) °C 3x jeweils rd. 10 l Beton in verschleißbare PE-Eimer umgefüllt. Jeweils 1 Eimer wurde bei (10 ± 2) °C, (20 ± 2) °C und (30 ± 2) °C gelagert. Das Ausbreitmaß wurde gemäß DIN EN 12350-5 nach 10, 30, 60, 90 und 120 min geprüft.

Mit steigender Restwasserdichte steigt der Zusatzmittelbedarf für die Einstellung eines konstanten Ausbreitmaßes bzw. Luftgehalts (**Bild 5** und **Bild 6**). Des Weiteren ist mit steigender Restwasserdichte ein früher einsetzender Konsistenzverlust zu beobachten (**Bild 7** bis **Bild 9**). Eine signifikante Temperaturabhängigkeit konnte nicht beobachtet werden.

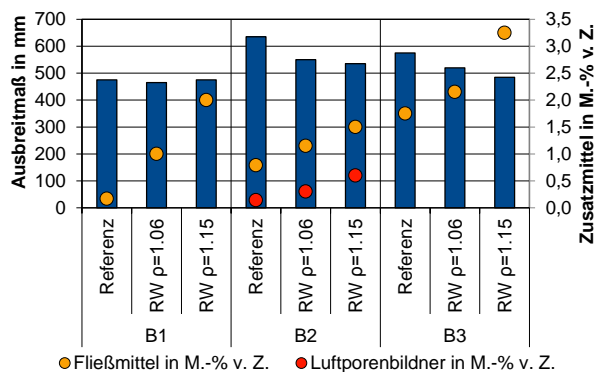


Bild 5 Ausbreitmaße der Betone, bestimmt nach 10 min sowie benötigte Zusatzmittelmenge

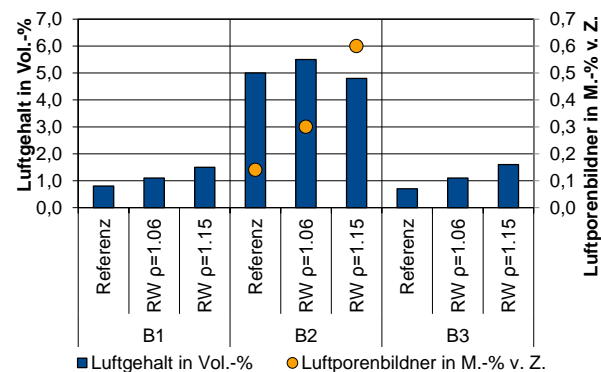


Bild 6 Frischbetonluftgehalte der Betone, bestimmt nach 10 min sowie benötigte Zusatzmittelmenge

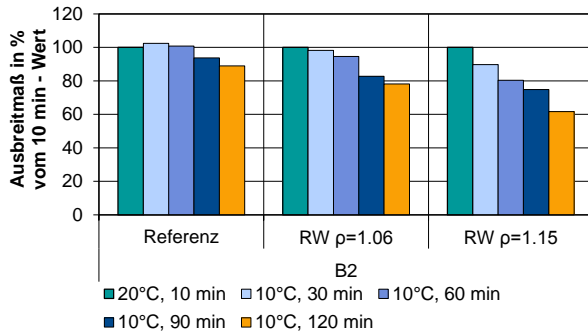


Bild 7 Entwicklung des relativen Ausbreitmaßes des Betons B2 bei 10°C; Bezug auf 20°C-Wert 10 min nach Mischungsende

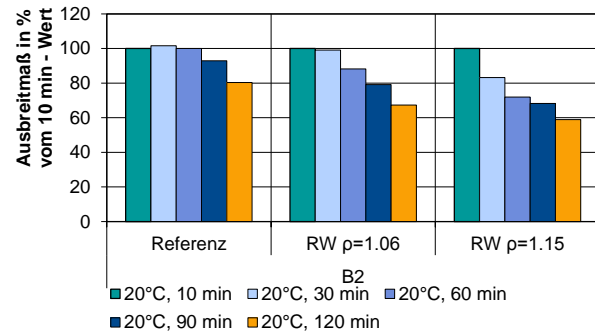


Bild 8 Entwicklung des relativen Ausbreitmaßes des Betons B2 bei 20°C; Bezug auf 20°C-Wert 10 min nach Mischungsende

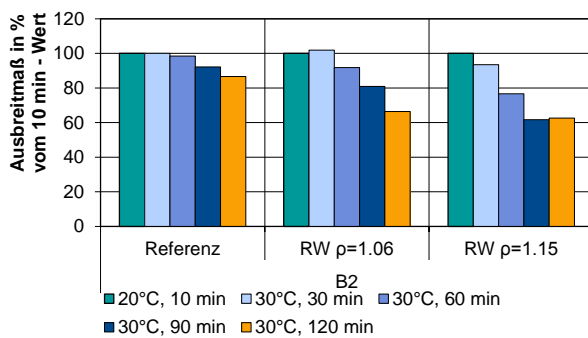


Bild 9 Entwicklung des relativen Ausbreitmaßes des Betons B2 bei 30°C; Bezug auf 20°C-Wert 10 min nach Mischungsende

3.5.3 Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit wurde im Alter von 1, 2, 7 und 28 Tagen an jeweils 3 Würfeln der Kantenlänge 150 mm gemäß DIN EN 12390-3 bestimmt. **Bild 10** und **Bild 11** zeigen die Ergebnisse. Die Verwendung von Restwasser führt zu einem Anstieg der 1-Tages-Festigkeit aller drei Betone um rd. 15 % bis rd. 50 %. Bei Beton B1 ist auch zu den anderen Prüfzeitpunkten ein Anstieg um rd. 20 % zu beobachten. Die 2d- bis 28d-Festigkeitswerte der Betone B2 und B3 mit Restwasser liegen im Bereich $\pm 10 \%$ der jeweiligen Festigkeit des Betons ohne Restwasser.

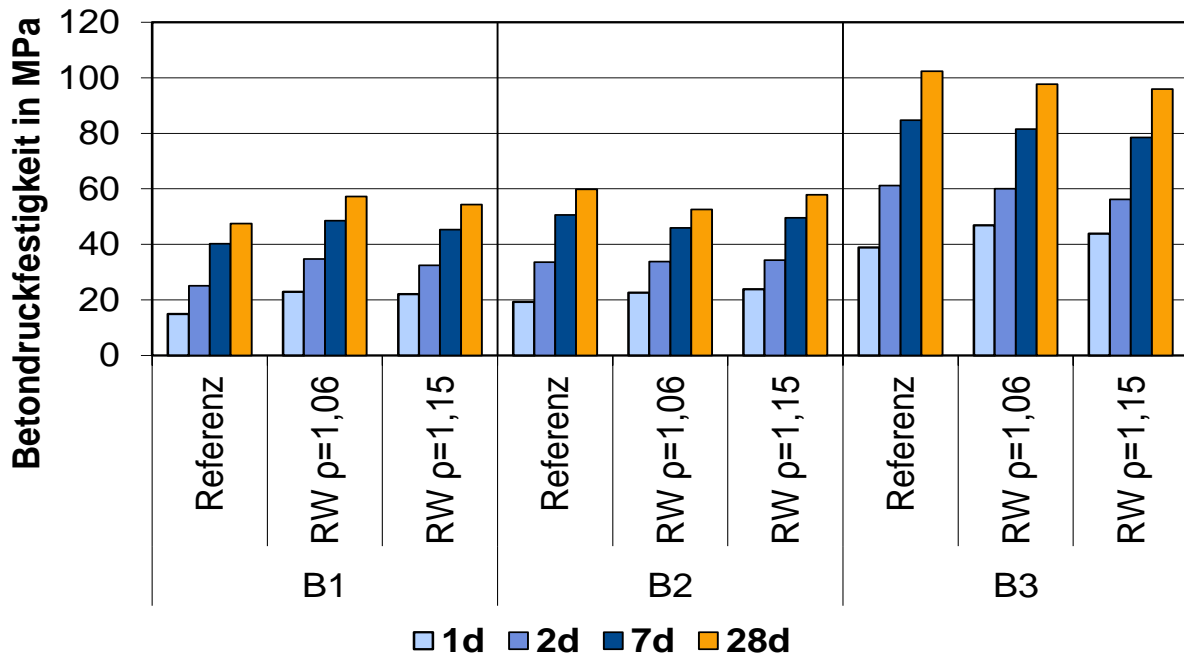


Bild 10 Betondruckfestigkeit

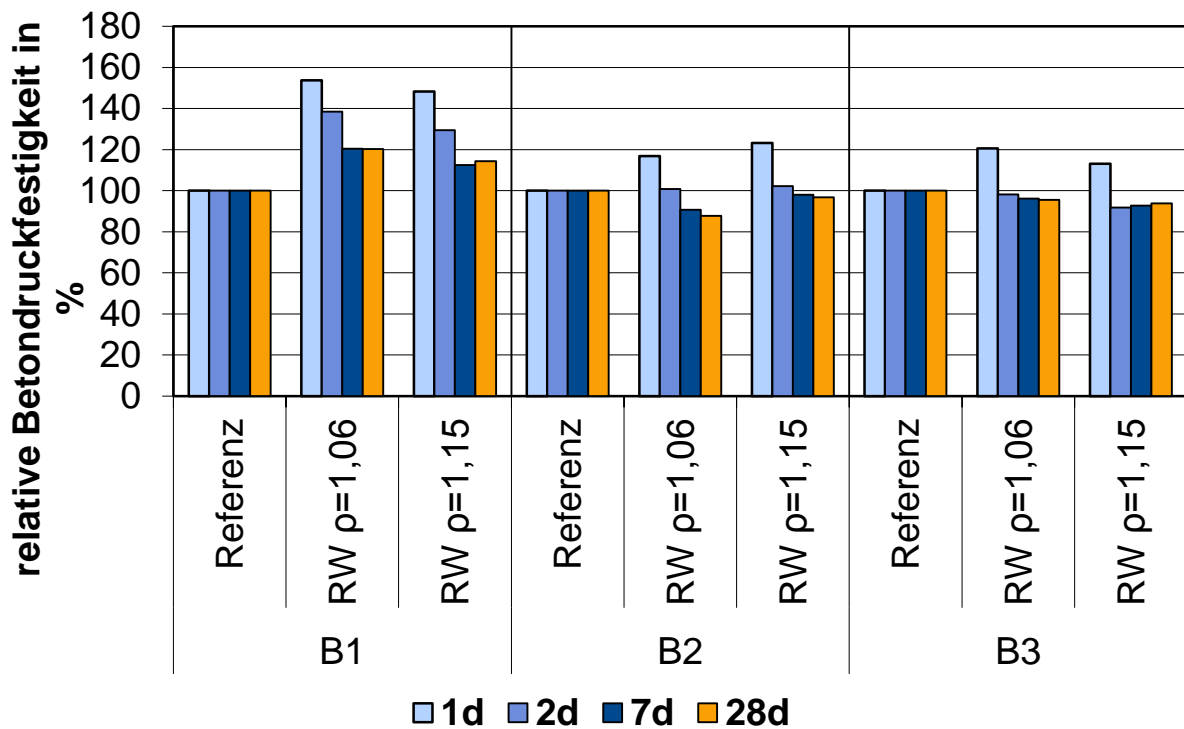


Bild 11 relative Betondruckfestigkeit

3.5.4 Karbonatisierung

Der Karbonatisierungswiderstand wurde gemäß DIN EN 13295 mit einer CO₂-Konzentration von 1 % an Beton B1 bestimmt. Hierzu wurden 3 Balken mit den Abmessungen 100 mm x 100 mm x 500 mm hergestellt und gemäß DIN EN 13295, Anhang A 1.2 vorgelagert. Die Prüfung der Karbonatisierungstiefe fand nach 14, 28 und 56 Tagen Lagerung im

Klima (20 ± 2) °C, (65 ± 5) % relativer Luftfeuchte und 1 % CO₂-Konzentration statt. **Bild 12** und **Bild 13** zeigen die Ergebnisse.

Bild 12 zeigt für die Betone mit Restwasser eine zwischen 28d und 56d abnehmende Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Dieser Verlauf deutet auf Fehler im Prüfverfahren hin. Beispielsweise könnte die CO₂ Konzentration der der Klimakammer unbemerkt abgefallen sein. Daher wurde die Karbonatisierungsgeschwindigkeit aus dem Verlauf aller drei Betone bis zum 28. Tag auf den 56. Tag interpoliert. Für den Referenzbeton ergibt sich damit ein vernachlässigbarer Unterschied zum tatsächlichen Messwert. Aus den Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit Restwasser wurden die Karbonatisierungstiefen berechnet (**Bild 13**). Diesem Ergebnis zufolge führt der Einsatz von Restwasser zu einer höheren Karbonatisierungstiefe (16% bzw. 44%). Da in Deutschland der Beton mit einem Restwasser der Dichte 1,06 g/cm³ im Gegensatz zum Beton mit einem Restwasser der Dichte 1,15 g/cm³ zulässig ist, ist ausschließlich die Erhöhung der Karbonatisierungstiefe um 16 % zu bewerten. Diese kann im Rahmen der Genauigkeit des Prüfverfahrens als geringfügig eingestuft werden.

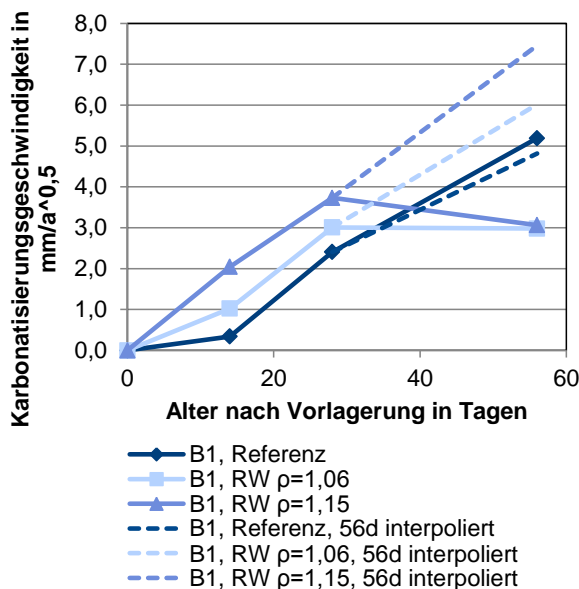


Bild 12 Karbonatisierungsgeschwindigkeit des Betons B1

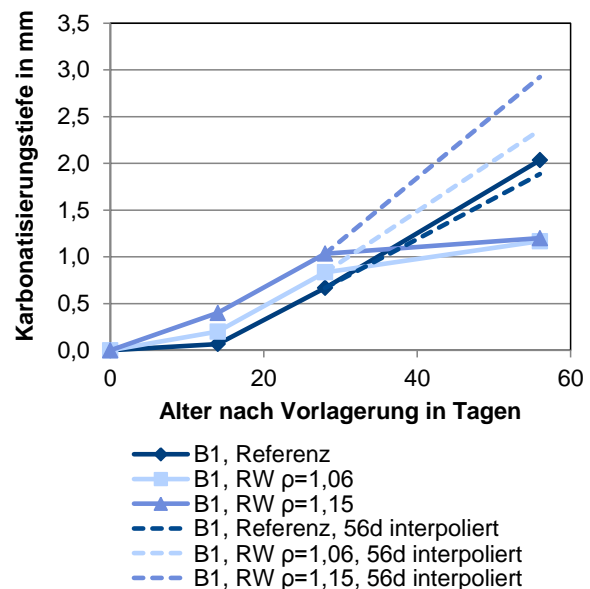


Bild 13 Karbonatisierungstiefe des Betons B1

3.5.5 Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand der Betone B2 und B3 wurde gemäß CEN/TS 12390-9 mit dem Plattenprüfverfahren im Alter von 28 Tagen geprüft. Es wurde eine 3 %ige NaCl-Lösung als Prüfflüssigkeit verwendet. **Bild 14** zeigt die Ergebnisse. Bei Betonen mit künstlichen Luftporen (B2) ist keine signifikante Abhängigkeit des Frost-Tausalz-Widerstandes von der Dichte des verwendeten Restwassers erkennbar. Im Frostversuch ohne künstliche Luftporen (B3) weisen die Betone mit Restwasser deutlich höhere Abwitterungen auf als der Referenzbeton. Die Abwitterung liegt jedoch unterhalb des Grenzwertes von 1 kg/m².

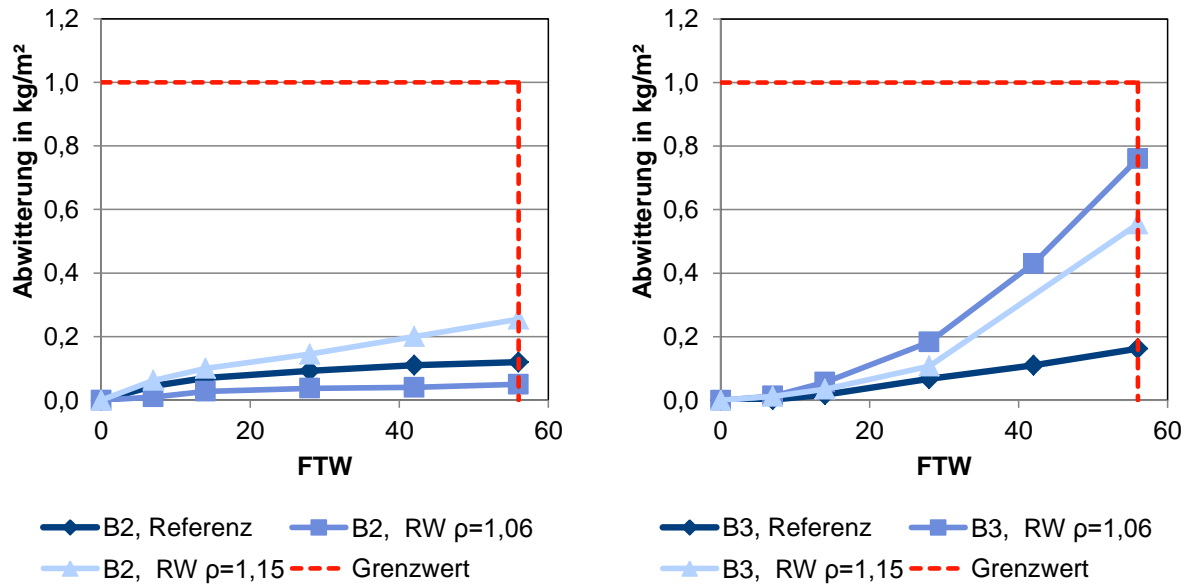


Bild 14 Abwitterung im Frost-Tausalz-Versuch

3.5.6 Chloriddiffusion

Der Chloriddiffusionswiderstand wurde gemäß prEN 12390-11:2014 an den Betonen B2 und B3 geprüft. Die Prüfkörper (PK) wurden gemäß DIN EN 12390-2 für 28 Tage unter Wasser bei $(20\pm 1)^\circ\text{C}$ vorgelagert. Die Hauptlagerung in einer 3 %igen NaCl-Lösung fand bis zum Alter von 118 Tagen statt. **Bild 15** und **Bild 16** zeigen die Chloriddiffusionsprofile. **Bild 17** zeigt die berechneten Diffusionskoeffizienten. Erwartungsgemäß liegen die Diffusionskoeffizienten der hochfesten Betone (B3) deutlich unter denen der (normalfesten) Betone mit künstlichen Luftporen (B2). Bei Luftporenbetonen führt die Verwendung von Restwasser zu keiner Veränderung bzw. zu geringfügig höheren Diffusionskoeffizienten. Bei hochfesten Betonen wird der Diffusionskoeffizient durch die Verwendung von Restwasser gesenkt. Die Verringerung lag zwischen rd. 20 % und 55%.

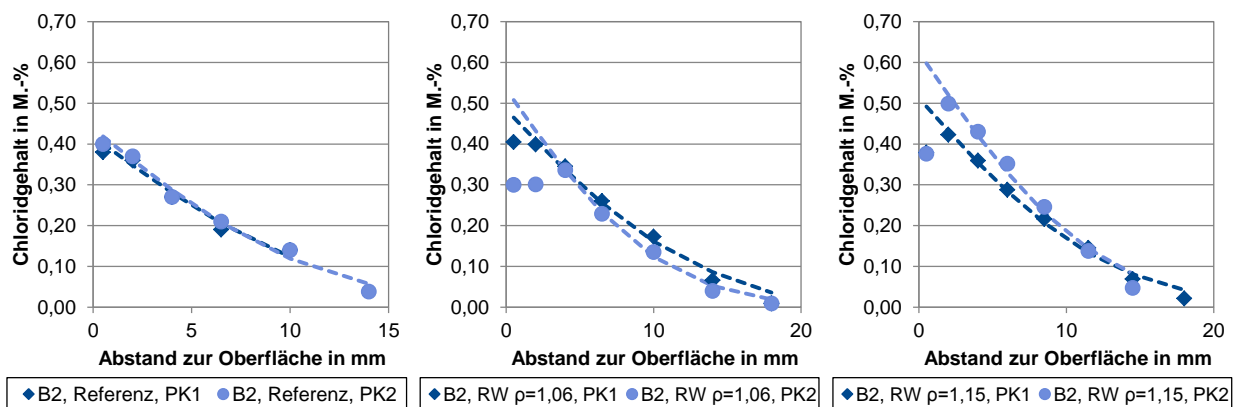


Bild 15 Chloridprofile der Betone B2

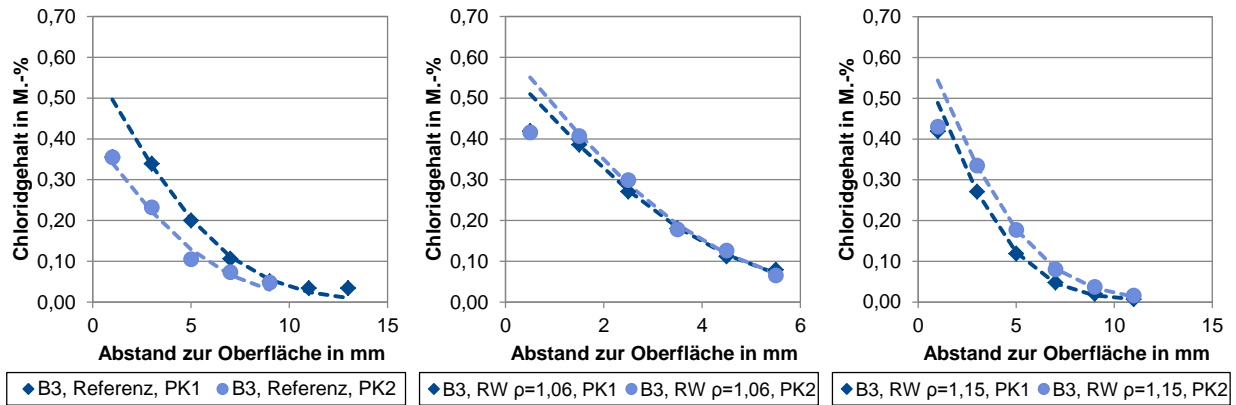


Bild 16 Chloridprofile der Betone B3

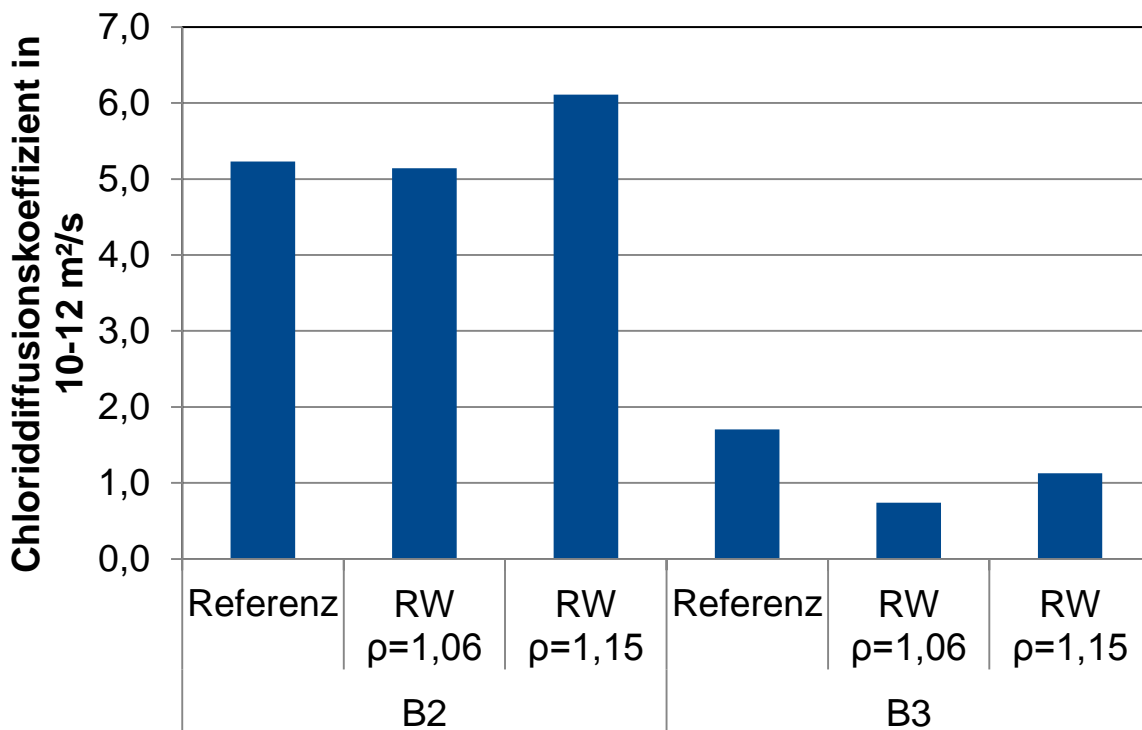


Bild 17 Chloriddiffusionskoeffizienten

3.5.7 Sulfatwiderstand

Der Sulfatwiderstand wurde gemäß CUR 48 geprüft. Es wurden Prismen der Abmessungen 20 mm x 20 mm x 160 mm aus Normmörtel (MS, **Tabelle 2**) mit Leitungswasser bzw. Restwasser der Dichten 1,06 g/cm³ und 1,15 g/cm³ hergestellt. Je Rezeptur wurden 6 Prismen zunächst unter Wasser bei (20 ± 2) °C gelagert. Nach 28 Tagen wurden je 3 Prismen in eine Lösung mit (16 ± 0,5) g SO₄⁻ / l umgelagert. Die 3 übrigen Prismen verblieben im Wasser.

Bild 18 zeigt die Dehnung der Prüfkörper, die in der Sulfatlösung gelagert wurden. **Bild 19** zeigt die Differenz der Dehnungen der Prüfkörper in Sulfatlösung und der Prüfkörper, die im Wasser gelagert wurden.

Die Verwendung von Restwasser mit hoher Dichte führte zu höheren Dehnungen, während die Verwendung von Restwasser mit einer Dichte im Bereich des Grenzwertes der EN 1008 nicht zu signifikanten Änderungen im Dehnungsverlauf führte.

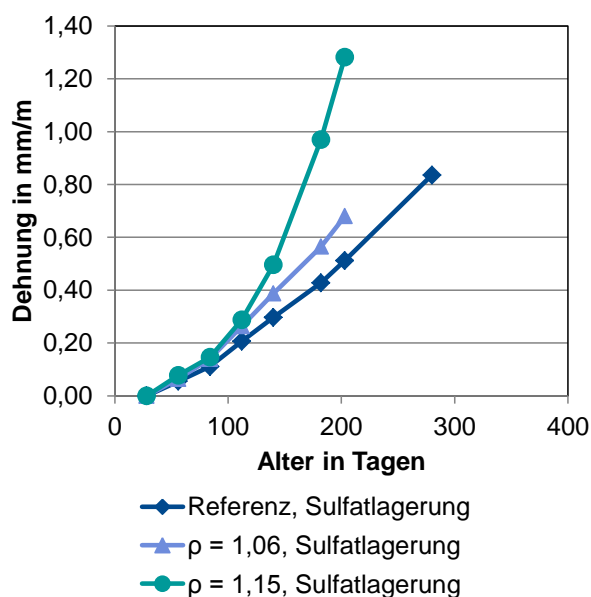


Bild 18 Dehnungsverlauf, Sulfatlagerung

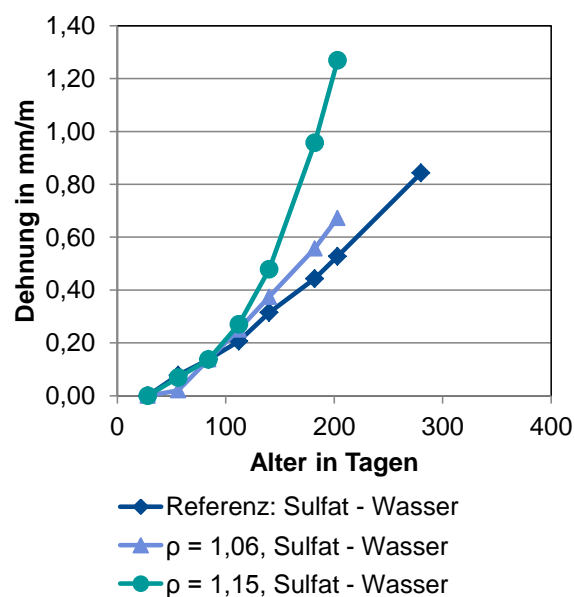


Bild 19 Differenz des Dehnungsverlaufs Sulfatlagerung - Wasserlagerung

4 Zusammenfassung

4.1 Zusammensetzung von Restwässern aus Transportbetonwerken

Die Dichte der in Restwässern suspendierten Feststoffe lag zwischen rd. 2,15 g/cm³ und 2,55 g/cm³. Die Dichten der im Winter entnommenen Proben waren überwiegend höher als die Dichten der im Sommer entnommenen Proben.

Eine deutliche jahreszeitliche oder werksbedingte Schwankung in der chemischen Zusammensetzung ist nicht erkennbar. Allenfalls scheint der Alkaligehalt im Winter – ggf. durch Taumittleintrag – etwas höher zu sein.

4.2 Auswirkung von Restwasser auf Frischmörtel bzw. –betoneigenschaften

Die Verwendung von Restwasser führt mit steigender Dichte des eingesetzten Restwassers zu

- einem höheren Wasseranspruch,
- einem früheren Ansteifen,
- einem erhöhten Zusatzmittelbedarf.

Diese Einflüsse sind im Hinblick auf die Sicherstellung robuster, baustellengerechter Frischbetoneigenschaften zu berücksichtigen und ggf. im Rahmen (erweiterter) Erstprüfungen des Transportbetonherstellers zu ermitteln.

4.3 Auswirkung von Restwasser auf Festmörtel bzw. –betoneigenschaften

Die Verwendung von Restwasser führt mit steigender Dichte des eingesetzten Restwassers

- zu einer erhöhten Frühfestigkeit,
- bei Betonen mit niedrigerer Zielfestigkeit (hier B1) zu höheren 28d-Festigkeiten,
- zu einem geringfügig niedrigeren Karbonatisierungswiderstand bei Verwendung von Restwasser im normativ geregelten Bereich
- zu einem deutlich niedrigeren Karbonatisierungswiderstand bei Verwendung von Restwasser jenseits des normativ geregelten Bereiches
- zu einer erhöhten Abwitterung im Frostversuch bei Betonen ohne künstliche Luftporen,
- beim Einsatz von Restwasser mit über DIN EN 1008 hinausgehenden Dichten zu einem verringerten Sulfatwiderstand.

Keine signifikanten Änderungen konnten festgestellt werden bezüglich

- der 2d bis 28d-Festigkeiten von Luftporenbeton oder hochfesten Betonen,
- des Frostwiderstandes von Betonen mit künstlichen Luftporen,
- des Chloriddiffusionswiderstandes.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens bestätigen damit teilweise die bereits in [RI01]¹ dargestellten Erfahrungen. Ein Einsatz von Restwasser in den von der DIN EN 1008 festgelegten Grenzen erscheint damit grundsätzlich auch in hochfesten Betonen bzw. Betonen mit künstlichen Luftporen möglich. Die ermittelten Einflüsse sind im Hinblick auf die Sicherstellung robuster, baustellengerechter Frischbetoneigenschaften zu berücksichtigen und ggf. im Rahmen (erweiterter) Erstprüfungen des Transportbetonherstellers zu ermitteln.

5 Weitere Ergebnisse

Weitere Ergebnisse des VDZ sowie der am Forschungsvorhaben beteiligten Partner CRIC und Smart Minerals können auf Anfrage zur Verfügung gestellt werden.

6 Danksagung

Das IGF-Vorhaben 124 EN 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.

¹ Rickert, Jörg; Grube, Horst. Einfluß von Restwasser aus dem Frischbetonrecycling auf die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton: Teil 1;; Teil 2. Beton. 2001/2001, 51/51(8/9), S.463-467/S.523-527

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages