
ENTWICKLUNG UND MODIFIKATION VON PCC- UND SPCC-MÖRTELN FÜR DIE BETONINSTANDSETZUNG

DEVELOPMENT AND MODIFICATION OF PCC AND SPCC MORTARS FOR CONCRETE REPAIR

Dipl.-Ing. Peter **Ramge** und Dr.-Ing. Hans-Carsten **Kühne**,
BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin, Deutschland

Bei Instandsetzungen mit PCC und SPCC Mörteln ist die Abstimmung der Mörtel­eigen­schaf­ten auf den Untergrund von größter Wichtigkeit für Funktionalität und Dauerhaftigkeit der Maßnahme. Der vorliegende Beitrag verdeutlicht, dass zur Eignungsbeurteilung eines Mörtels nicht alleine die Betrachtung einzelner Mörtel­eigen­schaf­ten ausreichend ist. Vielmehr muss die Verträglichkeit in Verbundkörperprüfungen nachgewiesen werden. Auch die Bewertung dieser Tests ist nicht trivial, da sich in einigen Fällen die Unverträglichkeit nur indirekt in einer Schädigung des Grundbetons äußert. Hauptproblem ist hierbei meistens ein ungünstiges Zusammenspiel von Schwindverhalten und Steifigkeit des Mörtels. Viele sekundäre Dauerhaftigkeitsprobleme lassen sich darauf zurückführen.

For repair tasks with PCC and SPCC mortars the adjustment of the mortar's properties to the substrate concrete is of essential importance for functionality and durability of the measure. In this paper it is pointed out that the evaluation of the mortar's suitability solely based on single mortar properties is not sufficient. Moreover the compatibility has to be verified in composite specimen tests. The evaluation of these test results is also not trivial. In many cases the incompatibility is only shown indirectly by damage to the substrate concrete. Main problem is the unfavorable interaction of the mortar's shrinkage behavior and stiffness. Many secondary durability issues have their cause herein.

1. Einleitung

Im Rahmen eines vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie geförderten Forschungsprojekts wurden an der BAM (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung) gemeinsam mit einem Industriepartner umfangreiche Untersuchungen im Hinblick auf die Rezepturen von Instandsetzungsmörteln und den Einfluss gezielter Mischungsmodifikationen auf verschiedene Leistungsparameter der Mörtel ausgeführt. Die derzeit marktüblichen Instandsetzungsmörtel sind üblicherweise aus einer großen Anzahl von Einzelkomponenten zusammengesetzt, deren exakte Abstimmung die Eigenschaften des Instandsetzungsproduktes steuert. Die Systeme sind jedoch oft so komplex, dass aufgrund des fehlenden Wissens über die Wechselwirkungen der Inhaltsstoffe keine effiziente Anpassung bzw. Optimierung der Rezepturen möglich ist. Ziel des Projekts war die Konzeption modularer Rezepturen für Instandsetzungsmörtel sowie die systematische Erforschung der Wirkungsweisen und Wechselwirkungspotenziale einzelner Komponenten. In diesem Beitrag werden einige Ergebnisse der Laboruntersuchungen an SPCC-Verbundkörpern gezeigt. Besonderer Fokus liegt dabei auf der Analyse von Schädigungen, die durch ungünstige Abstimmung von Schwindverhalten und Steifigkeit des Mörtels auf die Eigenschaften des Grundbetons verursacht bzw. begünstigt werden.

2. Theoretische Wechselwirkung zwischen Steifigkeit, Zugfestigkeit, Schwindverhalten und Rissbildung

Betrachtet man den Einfluss des Schwindverhaltens auf die Rissbildung mineralischer Mörtel, so ist der Grad der Verformungsbehinderung stets zu berücksichtigen. Der für die Vermeidung von Rissen günstigste Grenzfall, das unbehinderte Schwinden, kommt in der Anwendung praktisch nicht vor. Sobald eine Mörtelschicht im Verbund zu einem Altbeton hergestellt wird, tritt eine Verformungsbehinderung auf. Je nach Materialeigenschaften des Untergrundes und Geometrie der Reparaturstelle kann der Grad der Behinderung unterschiedlich stark ausfallen. Die Annahme einer vollkommenen Verformungsbehinderung liegt jedoch immer auf der sicheren Seite und bildet die meisten praktischen Situationen gut ab. Sobald der Schwinddehnung ε_s eine Behinderung entgegengesetzt wird, baut sich nach dem Hook'schen Gesetz eine Zugspannung σ auf.

$$\sigma = E_{eff} \cdot \varepsilon_s \quad (1)$$

mit ε_s behinderte Schwinddehnung
 E_{eff} wirksamer E-Modul des Instandsetzungsmörtels
 σ sich aufbauende Zwangsspannung

Meistens ist die Altsubstanz des instanzzusetzenden Bauwerks im Vergleich zur Instandsetzungsschicht derart massig, dass die in den Altbeton übertragenen Kräfte zu keiner nennenswerten Verformung führen und es auf diesem Wege nicht zu einem Spannungsabbau kommen kann. Insofern muss die schwindinduzierte Spannung gänzlich vom Instandsetzungsmörtel aufgenommen werden. Bezüglich der Rissbildung besteht eine Wechselwirkung zwischen Steifigkeit, Schwindverformung und Zugfestigkeit. Risse werden immer dann auftreten, wenn das Produkt aus E-Modul und Schwinddehnung größer ist als die vorhandene Zugfestigkeit. Dabei ist zu beachten, dass im Gegensatz zu metallischen Werkstoffen bei Beton oder Mörtel der E-Modul keine konstante Größe ist. Die Steifigkeit, ausgedrückt als die Steigung der Last-Verformungskurve, ist selbst vom Auslastungsgrad abhängig. Für Beton wird im Allgemeinen als E-Modul ein im Druckversuch bei 1/3 der Bruchlast ermittelter Sekantenmodul angegeben. Zur Beurteilung der Schwindrissbildung müsste aber der Zug-E-Modul im Belastungszustand unmittelbar vor dem Versagen angesetzt werden. Um der schwindinduzierten Rissbildung entgegen zu wirken, ergeben sich prinzipiell drei Strategien:

- 1.) Erhöhung der Zugfestigkeit
- 2.) Reduktion der Steifigkeit (E-Modul)
- 3.) Reduktion der Schwinddehnung

Da bei mineralischen Mörteln zwischen Steifigkeit und Festigkeit immer ein stoffspezifischer Zusammenhang besteht, stößt man bei der Kombination der ersten beiden Vorgehensweisen schnell an Grenzen. Viele betontechnologische Maßnahmen, die die Festigkeit erhöhen, erhöhen auch die Steifigkeit und umgekehrt. Es gibt aber auch Ausnahmen. Beim Einsatz von Kunststoffdispersionen als Zusatzstoff ist es beispielsweise möglich, gezielt die Zugfestigkeit zu erhöhen, während sich Druckfestigkeit und Steifigkeit reduzieren lassen. Unabhängig davon ist die Reduktion der Schwindverformungen eine sehr zielführende Maßnahme zur Rissvermeidung bzw. zur Reduzierung des Rissrisikos, da sich die Schwindverformungen weitestgehend unabhängig von Festigkeit und Steifigkeit beeinflussen lassen.

Allein durch Einhaltung der normativen Mindestanforderungen an Schwindmaß und Biegezugfestigkeit lässt sich die Bildung von Rissen aber theoretisch nicht ausschließen. Bei einer Schwinddehnung von 0,8 ‰ (28 Tage Grenzwert für SPCC nach RL SIB [1]) und einem vorhandenen E-Modul von beispielsweise 30 GPa würde sich zur Vermeidung von Rissen eine

in der Praxis nicht vorhandene Mindestzugfestigkeit von 24 MPa ergeben. In RL SIB wird aber lediglich eine Biegezugfestigkeit von 8 MPa nach 28 Tagen gefordert. In der praktischen Anwendung kommt es dennoch nicht zwangsläufig zur Rissbildung. Kriechen und Relaxation, die bei zementgebundenen Baustoffen im Allgemeinen auftreten, wirken sich positiv aus. Die im Mörtel tatsächlich auftretenden Spannungen können daher deutlich unter den theoretischen Werten nach dem Hook'schen Gesetz liegen. Voraussetzung hierfür ist, dass die Zwangsverformungen hinreichend langsam aufgebaut werden, um den zeitabhängigen Prozessen genügend Gelegenheit zum Spannungsabbau zu geben, um auftretende Spannungsspitzen stets unter der Zugfestigkeit des Materials zu halten.

3. Versuchsprogramm

Neben Prüfungen zur Anwendung im Trink- und Abwasserbereich wurden im Rahmen des Projekts hauptsächlich Prüfungen nach den gültigen nationalen Regelwerken für Hoch-, Ingenieur- und Wasserbau durchgeführt. Hauptgrundlage für die Anforderungen an die Instandsetzungsmörtel stellen dabei die Prüfkriterien nach der DAfStb Richtlinie „Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen“ (RL SIB) [1] und nach BAW Merkblatt „Spritzmörtel“ [2] dar. Aufgrund des großen dort geforderten Prüfungsumfangs wurde jedoch nicht für alle untersuchten Mörtel eine komplette Eignungsprüfung durchgeführt. Besonders im Rahmen kleiner Parameterstudien wurden stark reduzierte Versuchsprogramme ausgeführt, die sich auf wesentliche Schlüsseigenschaften konzentrieren. Ergebnisse dieser Parameterstudien an den Mörtelrezepturen sind an anderer Stelle veröffentlicht [3-10]. An einigen Entwicklungsstufen der Mörtel wurden umfangreichere Untersuchungen unter Einbeziehung von Verbundkörperprüfungen und Spritzapplikationen durchgeführt, auf die im weiteren Verlauf des Artikels genauer eingegangen wird. Auch hier wurde nicht immer der volle Prüfungsumfang der oben genannten Regelwerke durchgeführt.

Die Spritzapplikation erfolgte im Nassspritzverfahren. Der Förderschlauchdurchmesser betrug 40 mm, die Schlauchlänge 40 m. Die Konsistenz der Mörtel lag in einem Bereich von ca. 15 bis 18 cm Ausbreitmaß nach Hägermann. Die Förderdrücke betragen je nach Mörtelvariante zwischen 15 und 28 bar. Für die Untersuchungen am gespritzten Mörtel selbst wird in 4 cm tiefe, sandgestrahlte Stahlpfannen, die sogenannten Spritzpfannen, appliziert. Aus den so gewonnenen Festmörtelplatten werden für die weiteren Untersuchungen unmittelbar nach dem Ausbau aus dem Spritzstand Prismen gesägt (4x4x16 cm³). Für die Verbundkörperprüfungen wird eine 2 cm dicke Mörtelschicht auf unterschiedliche Grundkörper appliziert. Die Grundkörper bestehen aus den in Tabelle 3 charakterisierten Betonen „MC 0,40“ nach DIN EN 1766 [11] für die Prüfungen nach RL SIB und aus den Altbetonklassen „A2“ und „A3“ nach BAW-Merkblatt „Spritzmörtel“ für die dort geforderten Prüfungen. Sie haben in der Regel eine Abmessung von 30x30x10 cm³. Für einige Prüfungen auf den Altbetonklassen A2 und A3 werden jedoch größere Formate (50x30x10 cm³) gefordert. Nach der Applikation wurden die Probekörper stets für 48 h im Spritzstand feucht gehalten und anschließend ausgebaut. Danach sind prinzipiell 2 Lagerungsarten für die Mörtelproben und die Verbundkörper vorgesehen. Bei der Wasserlagerung (Lagerung A nach RL SIB) werden die Probekörper nach dem Ausbau bis zur Prüfung bei (23 ± 2) °C unter Wasser gelagert. Bei der Luftlagerung (Lagerung B nach RL SIB) werden die Proben bis zur Prüfung im Normklima bei (23 ± 2) °C und (50 ± 5) % RH gelagert. Nur für die Bestimmung des statischen E-Moduls erfolgt eine abweichende Lagerung in Anlehnung an DIN 1048: bis zum 7. Tag unter Wasser, dann bis zur Prüfung im Normklima bei (20 ± 2) °C und (65 ± 5) % RH.

In Tabelle 1 sind einige Anforderungen bzw. Grenzwerte aus RL SIB und BAW-Merkblatt zusammengefasst. Zu beachten ist, dass für die Anwendung auf A2 und A3 Beton die zulässigen Schwindverformungen an die vorliegende Steifigkeit des Mörtels gebunden sind.

Tab. 1: Anforderungen und Grenzwerte nach RL SIB und BAW Merkblatt

Anwendung auf	Verbundkörper			Mörtelproben				
	Haftzugfestigkeit ¹⁾ [MPa]		max. Rissbreite [mm] ²⁾	Festigkeit 28 d Lag. B ³⁾ [MPa]		Schwindmaß [mm/m]		stat. E-Modul [GPa]
	MW	kl. EW		Biegezug	Druck	28 d	91 d	
A2 gespritzt	0,8	0,5	0,1	- ⁴⁾	15	0,6	0,8	≤25
						0,8	1,0	≤20
A3 gespritzt	1,2	0,8	0,1	- ⁴⁾	25	0,6	0,8	15 ≤ E _{stat} ≤35
						0,8	1,0	15 ≤ E _{stat} ≤25
MC 0,40 gespritzt	2,0	1,5	0,1	8	45	0,8	-	≥ 20 ⁵⁾ bzw. 25 ≤ E _{dyn} ≤40
MC 0,40 manuell	2,0	1,5	0,1	8	45	0,9	-	- ⁶⁾ bzw. 25 ≤ E _{dyn} ≤40

¹⁾ MW = Mittelwert, kl. EW = kleinster Einzelwert
²⁾ gilt auch für Schwindrinnen
³⁾ 91 d Wert darf nicht unter 28 d Wert liegen
⁴⁾ Wert ermitteln
⁵⁾ Ersatzweise kann der mit Hilfe der Schalllaufzeit ermittelte dynamische E-Modul E_{dyn} bestimmt werden
⁶⁾ für statisch mitwirkende Mörtel Wert ermitteln, ansonsten nur Anforderung an E_{dyn}

Mit Rücksicht auf die Schutzinteressen des Industriepartners können die Rezepturen nicht im Detail offengelegt werden. Tabelle 2 zeigt daher nur einige für die weitere Auswertung interessante Unterscheidungsmerkmale der untersuchten Mörtelvarianten. Für alle Mörtel kam der gleiche Zement zum Einsatz, ein CEM I 42,5 R.

Tab. 2: Übersicht der Mörtelvariationen

	Wassergehalt ¹⁾ [M.-%]	w/z _{eq} -Wert ²⁾	Leimvolumen [Vol.-%]	Größtkorndurchmesser [mm]	Sand > 1mm ³⁾ [Vol.-%]	mineralische Zusatzstoffe ⁴⁾			Kunststoffdispersionspulver	Fasern (Kunststoff)	Schwindreduzierer ⁵⁾	Entschäumer
						Quarzmehl	Flugasche	Mikrosilika				
Mörtel A	13	0,37	50	2,0	17	•	+	+				
Mörtel B	11	0,45	46	2,0	37	++	+	+				
Mörtel C	12	0,48	49	4,0	39	-	++	+	x	x	xx	x
Mörtel D	13	0,37	51	2,0	17	•	+	+		x		
Mörtel E	13	0,37	51	2,0	17	•	+	+			x	
Mörtel F	13	0,37	52	2,0	16	•	+	+			xx	
Mörtel G	13	0,37	52	2,0	16	-	+	+			xx	x

¹⁾ bezogen auf die Trockenmörtelmasse
²⁾ Äquivalenter Wasserzementwert; Anrechnung Flugasche mit k = 0,4; Anrechnung Mikrosilika mit k = 1,0
³⁾ bezogen auf das gesamte Sandvolumen
⁴⁾ - = nicht vorhanden, • = < 1 M.-%; + = 1-5 M.-%; ++ = > 5 M.-% bezogen auf die Trockenmischung
⁵⁾ „xx“ = doppelte Menge als bei „x“

Prinzipiell werden die gespritzten Proben den gleichen Prüfungen unterzogen wie die konventionell hergestellten bzw. handapplizierten Proben. Der gesamte Prüfungsumfang kann RL SIB bzw. BAW-Merkblatt entnommen werden. Nachfolgend sind die Prüfungen gelistet, auf deren Ergebnisse im Weiteren eingegangen wird:

- Prüfungen am Festmörtel:
 - Festigkeit (Biegezug und Druck), Lagerung A nach 7d, 28d und 91d
 - Festigkeit (Biegezug und Druck), Lagerung B nach 7d, 28d und 91d
 - Statischer E-Modul (Druckbeanspruchung bis zu 1/3 der Bruchlast) nach 28d
 - Karbonatisierungstiefe, Lagerung B
 - Schwinden, Lagerung B
- Verbundkörperprüfungen:
 - Haftzugfestigkeit nach 7 d nach 3.6.4.3 RL SIB (Lagerung B)
 - Haftzugfestigkeit nach 91 d nach 3.6.4.2 RL SIB (Lagerung A)
 - Temperaturwechselbeanspruchung (TWB) nach 3.6.4.6 RL SIB
 - Frost-Tausalz-Beanspruchung (FTB) nach 3.6.4.5 RL SIB
 - Schwindrinnen zur Beurteilung des behinderten Schwindens nach 3.6.4.8 RL SIB

Tab. 3: Übersicht der Grundkörperbetone

Grundkörperbeton	spezifiziert in...	Druckfestigkeit, 28 d [MPa]	Oberflächenzugfestigkeit, 28d [MPa]
A2	BAW Merkblatt „Spritzmörtel“	15 ± 3	≥ 0,8
A3	BAW Merkblatt „Spritzmörtel“	25 ± 3	≥ 1,2
MC 0,40	DIN EN 1766	≥ 60	≥ 3,0

4. Ergebnisse

4.1 Mörtelkennwerte

In Tabelle 4 sind einige der Ergebnisse der Mörtelprüfungen dargestellt. Dabei werden die gespritzten Werte den konventionellen gegenübergestellt. In Tabelle 5 werden die Ergebnisse des behinderten Schwindens mit denen des freien Schwindens verglichen. Bild 1 zeigt den Verlauf der Schwindverformungen für konventionelle und gespritzte Applikation. Bei allen Mörteln sind Steifigkeit und Festigkeit bei der gespritzten Herstellung höher als bei der konventionellen Herstellung, was auf den erreichten höheren Verdichtungsgrad zurückzuführen ist. Aufgrund des dichteren Gefüges weisen die gespritzten Proben für alle Mörtel deutlich geringere Karbonatisierungstiefen auf als die konventionell hergestellten Proben. Der höhere Verdichtungsgrad spiegelt sich auch in den Luftporengehalten (LP-Gehalt) wieder. Mit Ausnahme von Mörtel G findet bei der Spritzapplikation eine deutliche Verringerung des LP-Gehalts statt. Durch den Einsatz von Entschäumer ist der LP-Gehalt bei Mörtel G bereits in der konventionellen Herstellung relativ niedrig, so dass er durch die veränderte Verdichtungsenergie nur noch wenig beeinflusst wird. In [12] dargestellte Untersuchungen zur Porosität am Festmörtel zeigen, dass sich die mittels Quecksilberdruckintrusion messbare Porosität unterhalb eines Porenradius von 60 µm jedoch nicht nennenswert durch die Applikationsweise verändert. Generell besteht ein direkter Zusammenhang zwischen Festigkeit und Steifigkeit. Einzig für die Biegezugfestigkeit bei Lagerung B scheint dieser Zusammenhang nicht zu bestehen. Mörtel C ist der einzige der untersuchten Mörtel, der kunststoffmodifiziert

ist. Hier stellen sich, auch bei Lagerung B, wesentlich günstigere Verhältnisse aus Biegezugfestigkeit und Steifigkeit ein als bei den anderen Mörteln.

Tab. 4: Ausgewählte Mörtelkennwerte

Mörtel	Herstellungstyp ¹⁾	Biegezugfestigkeit 28d [MPa]		Druckfestigkeit 28d [MPa]		E-Modul ²⁾ 28d [GPa]	Karbo-tiefe 91d [mm]	LP-Gehalt [Vol.-%] ³⁾
		Lag A	Lag B	Lag A	Lag B			
A	konv.	9,8	6,6	71,9	50,6	35,8	1,9	7,6
	gesp.	12,6	6,4	87,2	71,2	39,0	1,2	2,0
B	konv.	9,5	7,4	65,7	49,3	29,3	3,5	8,3
	gesp.	11,9	6,3	90,1	84,5	39,5	1,2	-
C	konv.	-	-	-	-	-	-	-
	gesp.	7,6	7,2	45,3	40,5	23,6	5,5	4,3
D	konv.	9,3	6,4	65,4	48,6	32,4	2,4	11,0
	gesp.	12,7	6,7	92,1	76,8	38,5	1,4	2,3
E	konv.	8,9	6,5	56,5	42,0	31,4	2,5	13,0
	gesp.	10,6	7,5	89,6	75,5	36,7	1,0	3,9
F	konv.	10,0	7,1	71,2	52,9	35,4	1,9	8,4
	gesp.	11,5	6,7	77,6	64,8	36,4	1,2	4,1
G	konv.	10,5	7,4	80,6	60,0	31,0	1,8	4,9
	gesp.	12,5	8,3	61,1 ⁴⁾	66,5	33,2	1,0	4,5

¹⁾ konv. = konventionelle Herstellung; gesp. = gespritzte Herstellung
²⁾ statischer E-Modul, in Anlehnung an DIN 1048 ermittelt
³⁾ im Frischmörtel, bei Spritzapplikation an gespritzter Probe bestimmt
⁴⁾ Wert ist nicht repräsentativ, wahrscheinlich Imperfektionen bei der Probenpräparation

Tab. 5: Freies und behindertes Schwinden

Mörtel	Applikationsart	freies Schwinden [mm/m]		Ergebnisse der Schwindrinnen nach 91 d			
		28d	91d	max. Rissbreite [mm]		Rissbreitensumme [mm]	
				Rinne 1	Rinne 2	Rinne 1	Rinne 2
A	manuell	0,99	1,11	0,350	0,3	---	---
	senkrecht gespritzt	0,92	1,06	0,175	0,15	0,775	0,625
B	manuell	0,78	0,93	---	---	---	---
	senkrecht gespritzt	0,74	0,92	---	---	---	---
	überkopf gespritzt	0,73	0,90	---	---	---	---
C	senkrecht gespritzt	0,62	0,74	0,175	0,05	1,15	0,35
D	manuell	1,06	1,18	0,200	0,15	---	---
	senkrecht gespritzt	1,00	1,15	0,100	0,125	0,725	0,725
E	manuell	0,88	0,99	0,075	0,125	0,525	0,775
	senkrecht gespritzt	0,76	0,89	0,050	0,075	0,7	0,575
F	manuell	0,73	0,83	0,100	0,1	0,625	0,55
	senkrecht gespritzt	0,60	0,73	0,025	0,025	0,275	0,175
	überkopf gespritzt	0,67	0,79	0,050	0,225	0,450	0,550
G	manuell	0,66	0,75	0,100	0,05	0,525	0,45
	senkrecht gespritzt	0,63	0,78	0,125	0,2	0,65	0,675

--- = Wert nicht dargestellt da unvollständig oder fehlerhaft geprüft bzw. ausgewertet wurde

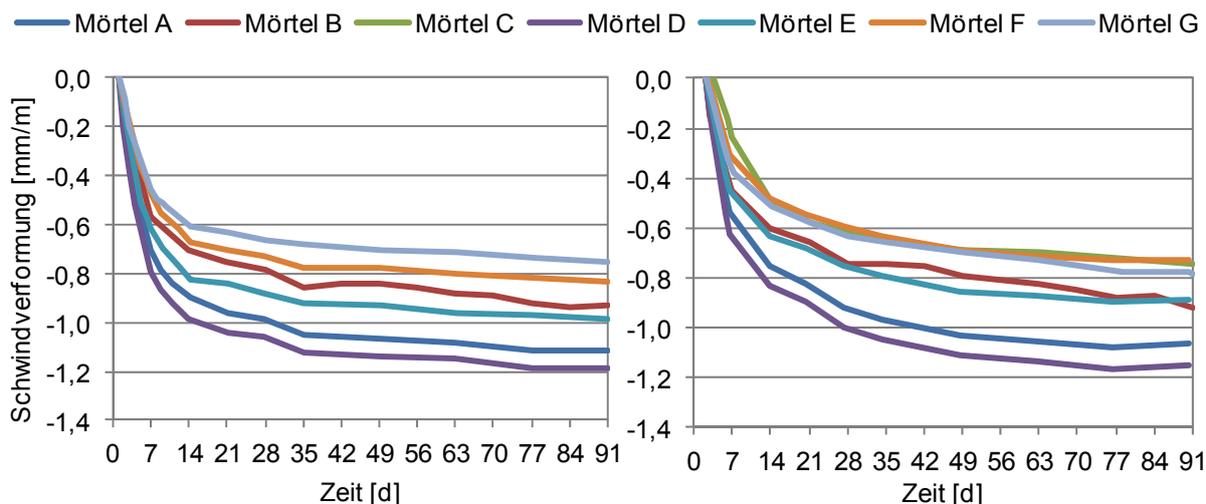


Bild 1: Zeitlicher Verlauf der Schwindverformungen für konventionelle Herstellung (links) und gespritzte Herstellung (rechts)

Bezüglich der Schwindverformungen ist zu beachten, dass die Ergebnisse der konventionellen Herstellung nicht direkt mit denen der gespritzten Herstellung vergleichbar sind, da die Mörtelproben in den ersten 48 h unterschiedlich behandelt werden und bei der gespritzten Herstellung die Nullmessung erst nach 48 h durchgeführt wird. Bei der Bewertung der unterschiedlichen Schwindverformungen kann daher nicht eindeutig in den Einfluss der Applikation und den Einfluss der Nachbehandlung unterschieden werden. Für alle Mörtel wurde das behinderte Schwinden in Schwindrinnen nach RL SIB untersucht. Die Rinnen bestehen aus 1 m langen Stahlwinkelprofilen mit einer Schenkellänge von 7 cm. Vor der Applikation werden die Innenflächen sandgestrahlt, um einen guten Haftverbund zum Mörtel sicherzustellen. Aufgrund der vergleichsweise hohen Steifigkeit der Stahlprofile kann von einer vollständigen Verformungsbehinderung des Mörtels ausgegangen werden. Bewertungskriterium ist die maximale Rissbreite der quer zur Rinnenachse verlaufenden Risse. Bei den Rissbreitensummen in Tabelle 5 sind die Rissbreiten inklusive der Randablösungen an den Stirnseiten entlang der Längsachse aufsummiert. Die Ergebnisse des behinderten Schwindens von Mörtel B sind nicht dargestellt, da hier die Rinnen in den ersten Wochen nicht korrekt gelagert wurden und sich somit geringere, nicht vergleichbare Verformungen eingestellt haben.

4.2 Verbundkörperprüfungen

Mit Ausnahme von Mörtel G wurden für alle Mörtel senkrechte Spritzapplikationen sowohl auf MC 0,40 Grundkörpern als auch auf A3 Grundkörpern durchgeführt. Tabelle 6 zeigt eine Gegenüberstellung der Haftzugfestigkeiten nach 7 Tagen. Allen Mittelwerten liegen Messungen auf mindestens 2 Verbundkörpern mit je 5 Prüfstellen pro Verbundkörper zugrunde. Auf den MC 0,40 Grundkörpern zeigen alle Mörtel, mit Ausnahme von Mörtel C, ein ähnliches Verhalten. Die Mittelwerte liegen in der gleichen Größenordnung (Spreizung nur 0,14 MPa). Ein Großteil der Brüche findet im Grundbeton statt. Dies ist der Grund für die geringe Spreizung der Mittelwerte. Die erzielbare Haftzugfestigkeit ist durch die Festigkeit des Grundbetons limitiert. Bei Mörtel C liegt der Mittelwert um rund 1 MPa niedriger als bei den anderen Mörteln, entsprechend finden alle Abrisse im Mörtel selbst statt. Wenn man von dem zu niedrigen Einzelwert (1 EW < 1,5) absieht, erfüllt der Mörtel mit einem Mittelwert von 2,26 MPa dennoch die Anforderungen von RL SIB (MW \geq 2,0). Auf dem A3 Beton zeichnet sich ein anderes Bild ab. Hier erfüllt nur Mörtel C die Anforderung eines Mittelwerts größer 1,2 MPa. Dennoch haben alle Brüche im Grundkörper stattgefunden.

In Tabelle 7 sind die Ergebnisse der Verbundkörperprüfungen nach der Frost-Tausalz-Bearbeitung für die einzelnen Verbundkörper dargestellt. Nur wenige Verbundkörper haben die Prüfung entsprechend der Anforderungen nach RL SIB bestanden. Hierfür gibt es unterschiedliche Ursachen. Viele Verbundkörper sind aufgrund der Nichteinhaltung des Rissbreitenkriteriums durchgefallen. In allen diesen Fällen ist aber zusätzlich das Durchfallkriterium der zu niedrigen Haftzugfestigkeit ebenfalls gegeben. Bei nicht erreichtem Grenzwert der Haftzugfestigkeit ist zwischen Versagen in der Verbundfuge und Versagen im Grundbeton zu unterscheiden.

Bei Versagen in der Verbundfuge gibt es die Fälle, in denen bereits vor der FTB kein ausreichender Verbund vorlag (z.B. nachgewiesen durch die Ergebnisse der Haftzugfestigkeit nach 7 d). Das ist z.B. bei Mörtel B der Fall (vgl. 5.1 und Tab.8). Der ohnehin schlechte Haftverbund ist hier durch die FTB derart geschwächt worden, dass einige der Prüfstellen bereits beim Vorbohren abgerissen sind. Eine Aussage über die Performance des Mörtels bei gutem Verbund, der beispielsweise auf den gleichen Grundkörpern bei senkrechter Applikation vorlag, lässt sich nicht treffen. Weiterhin gibt es die Fälle, bei denen das Versagen größtenteils in der Verbundfuge stattfindet, aber die Haftzugfestigkeit nach 7 d keinen Hinweis auf einen grundsätzlich mangelhaften Verbund gibt. Dies ist bei Mörtel D und F handappliziert der Fall. Hier ist die Schwächung der Verbundzone offensichtlich das Resultat der Frost-Tausalz-Bearbeitung. Beim weitaus größten Teil der durchgefallenen Prüfstellen findet das Versagen aber im Grundbeton statt, obwohl einwandfreie Grundkörper verwendet wurden. Hier kam es offensichtlich durch die FTB zu einer Schädigung im Grundkörperbeton.

Mit den Mörteln B und F wurden sowohl Applikationen senkrecht als auch über Kopf durchgeführt, sodass hier eine Bewertung des Einflusses der Applikationsrichtung möglich ist. Die Ergebnisse der Verbundkörperprüfungen sind in Tabelle 8 dargestellt. Bei Mörtel B wurden für die Haftzugfestigkeit nach 7 Tagen in der Überkopapplikation auf MC 0,40 Platten nur knapp 40 % der in der senkrechten Applikation erreichten Festigkeit erzielt. Für die Applikation auf den anderen Platten (A2, A3) gibt es keinen nennenswerten Unterschied. Für diesen Mörtel wurden alle Applikationen am gleichen Tag vom gleichen Verarbeiter durchgeführt, so dass die unterschiedliche Leistungsfähigkeit nicht durch unterschiedliche Mörtelchargen oder unterschiedliche Verarbeitungsbedingungen hervorgerufen sein kann. Bei Mörtel F ist kein Einfluss der Applikationsrichtung auf die Verbundkörpereigenschaften festzustellen.

Tab. 6: Haftzugfestigkeiten 7 d, senkrecht gespritzt

	Applikation auf MC 0,40 Grundbeton						Applikation auf A3 Grundbeton					
	Haftzugfestigkeit ¹⁾			Verteilung der Bruchart ²⁾ [%]			Haftzugfestigkeit ¹⁾			Verteilung der Bruchart ²⁾ [%]		
	MW [MPa]	kl. EW [MPa]	STABW [-]	A	B	A/B	MW [MPa]	kl. EW [MPa]	STABW [-]	A	B	A/B
Mörtel A	3,18	2,64	0,26	30	50	20	0,95	0,74	0,16	100	-	-
Mörtel B	3,25	2,83	0,32	75	-	25	1,17	0,92	0,17	100	-	-
Mörtel C	2,26	1,32	0,47	-	100	-	1,54	1,23	0,12	100	-	-
Mörtel D	3,28	2,87	0,25	20	80	-	1,18	0,96	0,21	100	-	-
Mörtel E	3,19	2,92	0,23	85	15	-	1,05	0,90	0,11	100	-	-
Mörtel F	3,32	2,75	0,45	75	25	-	1,15	1,03	0,13	100	-	-

¹⁾ MW = Mittelwert, kl. EW = kleinster Einzelwert, STABW = Standardabweichung
²⁾ A = im Grundbeton, B = im Mörtel, A/B = in der Verbundfuge

Tab. 7: Ergebnisse der Frost-Tausalz-Wechselagerung an Verbundkörpern

Mörtel	Applikationsart	Probekörper Nr.	Haftzugfestigkeit			Verteilung der Bruchart ¹⁾ [%]			verwertbare Prüfstellen	max. Rissbreite ²⁾ [mm]		bestanden	durchgefallen wg. Rissbreite	durchgefallen wg. Haftzugfestigkeit
			MW [MPa]	kl. EW. [MPa]	STABW. [-]	A	B	A/B		vorher	nachher			
A	s	1	1,81	1,31	0,44	100	-	-	5/5	#	0,03			x
		2	2,23	0,85	0,97	96	-	4	5/5	#	0,05			x
	h	1	0,67	0,33	0,30	53	-	47	5/5	#	0,20		x	x
		2	0,60	0,24	0,24	84	-	16	4/6	#	0,20		x	x
B	ü	1	0,23	0,07	0,16	13	-	87	3/9	0,15	0,30		x	x
		2	0,17	0,09	0,13	-	-	100	3/9	0,1	0,35		x	x
	h	1	0,92	0,31	0,43	52	33	15	5/5	0,05	0,25		x	x
		3	1,09	0,6	0,35	80	20	-	5/5	0,05	0,20		x	x
C	s	1	2,09	1,81	0,22	100	-	-	5/5	0,03	0,03	x		
		2	2,10	1,48	0,56	100	-	-	5/5	0,03	0,03			x
D	s	1	2,79	2,25	0,51	100	-	-	5/5	#	0,05	x		
		2	1,35	1,05	0,33	100	-	-	5/5	#	0,08			x
	h	1	0,82	0,41	0,62	4	-	96	5/5	#	0,20		x	x
		2	0,22	0,09	0,20	4	-	96	5/5	#	0,20		x	x
E	s	1	1,64	0,58	0,64	100	-	-	5/5	0	0,25		x	x
		2	2,32	1,89	0,44	100	-	-	5/5	#	0,03	x		
	h	1	1,00	0,62	0,39	30	68	2	5/5	#	0,05			x
		2	0,41	0,33	0,11	13	87	-	3/5	#	0,05			x
F	s	1	2,18	1,57	0,53	100	-	-	5/5	0	0,10	x		
		2	2,83	2,66	0,11	100	-	-	5/5	#	0,02	x		
	ü	1	1,91	1,34	0,40	100	-	-	5/5	0,03	0,05			x
		2	1,39	1,15	0,30	100	-	-	5/5	0,03	0,50		x	x
		3	1,25	0,94	0,30	100	-	-	5/5	0,05	0,08			x
	h	1	0,66	0,25	0,45	-	20	80	5/5	#	0,05			x
2		1,11	0,31	0,56	-	20	80	5/5	#	0,05			x	
G	s	1	0,89	0,67	0,19	100	-	-	5/5	#	0,10			x
		2	1,07	0,87	0,21	100	-	-	5/5	#	0,05			x
		3	1,36	0,95	0,39	100	-	-	5/5	#	0,05			x
	h	1	0,77	0,55	0,24	100	-	-	5/5	#	0,05			x
		2	0,91	0,54	0,28	100	-	-	5/5	#	0,05			x
		3	0,82	0,57	0,26	99	-	1	5/5	#	0,03			x
MC 0,40 ³⁾	a	0,43	0,36	0,05	X			5/5	X					
	b	1,27	1,1	0,17				5/5						
	c	3,58	3,06	0,39				5/5						

¹⁾ A = im Grundbeton, B = im Mörtel, A/B = in der Verbundfuge

²⁾ 0 = augenscheinlich keine Risse feststellbar,

--- = keine Rissbegutachtung vor der FTS Beanspruchung durchgeführt

= Risse vorhanden aber Rissbreite nicht explizit bestimmt, da augenscheinlich $\leq 0,10$ mm

³⁾ a = Tausalz beanspruchte Oberfläche

b = ca. 1-2 cm unter der beanspruchten Oberfläche

c = versiegelte Rückseite

Tab. 8: Vergleich senkrecht gespritzt und über Kopf gespritzt

Grundkörper- beton	Applikations- richtung	Mörtel B						Mörtel F											
		Haftzugfestigkeit			Verteilung der Bruchart [%]			Haftzugfestigkeit			Verteilung der Bruchart [%]								
		MW [MPa]	kl. EW [MPa]	STABW [-]	A	B	A/B	MW [MPa]	kl. EW [MPa]	STABW [-]	A	B	A/B						
Haftzugfestigkeit 7d																			
MC 0,40	s	3,25	2,83	0,32	76	-	24	3,32	2,75	0,45	74	27	-						
	ü	1,27	0,67	0,39	-	-	100	3,14	2,33	0,44	79	-	21						
A3	s	1,17	0,92	0,17	100	-	-	X											
	ü	1,10	0,57	0,24	100	-	-												
A2	s	0,82	0,63	0,12	100														
	ü	0,84	0,54	0,14	100														
Haftzugfestigkeit 91 d																			
MC 0,40	s	X												3,67	3,16	0,31	100	-	-
	ü							3,74	3,25	0,36	98	-	2						
Temperaturwechselbeanspruchung TWB																			
MC 0,40	s	X						2,91	1,82	0,44	100	-	-						
	ü							3,29	2,86	0,30	100	-	-						
Frost-Tausalz-Beanspruchung FTB																			
MC 0,40	s	X						2,51	1,57	0,50	100	-	-						
	ü							1,52	0,94	0,50	100	-	-						

5. Auswertung und Bewertung der Ergebnisse

Bei der Bewertung der Verbundkörperprüfungen reicht es nicht aus, lediglich die Einhaltung der Grenzwerte zu kontrollieren. In den Fällen, in denen die Sollwerte nicht erreicht sind, sollte der Grund des Versagens genauer betrachtet werden. Für das Nichterreichen der geforderten Haftzugfestigkeit gibt es vereinfachend die folgenden Gründe:

1. die Materialeigenschaften des Mörtels an sich
2. Fehler bei der Verarbeitung, Lagerung oder Prüfung
3. Vorzeitiges Versagen des Grundbetons.

Normalerweise würde man annehmen, dass nur im erstgenannten Fall ein Grund zur Verwerfung des entsprechenden Mörtels besteht. Wie nachfolgend erläutert wird, kann dies aber auch in den beiden anderen Fällen, besonders bei Versagen im Grundbeton, gegeben sein.

5.1 Robustheit des Mörtels

Die Auswertung der Untersuchungen zu unterschiedlichen Applikationsbedingungen und Applikationsweisen kann Aufschluss über die Robustheit eines Mörtels geben, d.h. über seine Fähigkeit trotz veränderter Randbedingungen die gleiche gewünschte Leistungsfähigkeit zu zeigen. Dazu zählt auch die Fähigkeit in einem gewissen Rahmen Verarbeitungsfehler kompensieren zu können.

Die schlechte Performance von Mörtel B auf den MC 0,40 Grundkörpern in der Überkopffapplikation wurde vermutlich durch zu starkes Vornässen hervorgerufen. Da die A2 und A3 Betone recht saugfähig sind, konnte sich hier, trotz gleichen Vornässens, kein Wasserfilm an der Oberfläche bilden. In der senkrechten Lage konnte sich auch auf den MC 0,40 Platten kein Wasserfilm bilden, da das überschüssige Wasser abgelaufen ist. Einzig in der Überkopflage hat sich an den MC 0,40 Platten ein Wasserfilm gebildet, der vor der Applikation weder abtropfen noch verdunsten konnte und so zu einer Schwächung der Verbundfuge zwischen Mörtel und Grundkörper geführt hat. Die Brüche fanden hier alle mit verblüffender Exaktheit in der Verbundfuge statt.

Für Mörtel F gibt es keine nennenswerten Unterschiede bezüglich der Applikationsrichtung. Das schlechtere Abschneiden der über Kopf gespritzten Platten in der FTB Prüfung ist auf eine Schwächung des Grundbetons durch den Frost-Tausalz-Angriff zurückzuführen. Wie in 5.4 erläutert wird, ist hierfür die Rissbildung in der Instandsetzungsschicht maßgebend, die unabhängig von der Applikationsrichtung ist.

Am Beispiel vom Mörtel B wird deutlich, wie störanfällig das Zusammenspiel zwischen Mörtel, Grundkörper und Vorbereitung sein kann. Daher muss der Mörtel aufgrund seiner Zusammensetzung eine gewisse Robustheit aufweisen, um Unterschiede und Schwankungen in den Untergrundeigenschaften und bei der Untergrundvorbereitung kompensieren zu können. Mörtel B ist für den Praxiseinsatz unter Baustellenbedingungen eher ungeeignet, obwohl er unter idealen (Labor-) Bedingungen eine sehr gute Performance zeigt.

5.2 Schwindinduzierte Schädigung des Grundbetons durch Zwangsspannungen

Tritt bei der Haftzugprüfung das Abreißen im Grundbeton deutlich unterhalb des Sollwertes auf, so kann dies prinzipiell durch eine minderwertige Qualität des Grundkörperbetons verursacht sein. Aufgrund von Gegenproben ist dies aber für die vorliegenden Untersuchungen auszuschließen. Vielmehr wird angenommen, dass aufgrund des guten Verbunds durch die Schwindverformung des Mörtels eine Schädigung im Gefüge des Grundbetons stattgefunden hat. Über die Verbundfuge erzeugt die (teilweise behinderte) Schwindverformung des Mörtels in der oberen Schicht des Grundkörpers einen Spannungszustand, der bei Überlagerung mit der Beanspruchung der Haftzugprüfung zu einem vorzeitigen Versagen führt. Die Schädigung bzw. Schwächung findet dabei nicht direkt in der Verbundfuge statt, sondern deutlich im Grundbeton. Voraussetzung für diesen Effekt sind ein guter Verbund, ein hohes Schwindmaß des Mörtels und eine im Vergleich zum Grundbeton hohe Steifigkeit des Mörtels.

Mit Ausnahme von Mörtel C tritt dieser Effekt bei allen untersuchten Mörteln bei der Applikation auf A3 Grundkörpern auf (Tabelle 6). Theoretisch verhält sich die Schädigung proportional zu Schwindmaß und Steifigkeit des Mörtels. In Bild 2 sind die erzielten Haftzugfestigkeiten der einzelnen Prüfstellen auf den A3 Grundkörpern dem Produkt aus Schwindmaß und dynamischem E-Modul der Mörtel gegenübergestellt. Alle Werte beziehen sich hier auf ein Alter von 7 Tagen. Die Tendenz ist gut zu erkennen, aber aufgrund der Streuung der Einzelwerte liegt der Korrelationskoeffizient nur bei 0,44.

Bei der Bewertung der Haftzugergebnisse ist somit Vorsicht geboten. Zu sagen, der Mörtel würde die Anforderungen erfüllen, da die Ursache der zu geringen Haftzugfestigkeit am Grundbeton lag und nicht am Mörtel oder am schlechten Verbund des Mörtels, ist technisch fragwürdig. Die Ursache des vorzeitigen Versagens liegt durchaus beim Mörtel, da dessen ausgeübte Zwangsverformung der Grund für die Schwächung des Grundbetons ist. Wenn Zweifel an der Qualität des Grundkörperbetons bestehen, sollte zur Klärung die Haftzugfestigkeit auf der nicht mit Mörtel beschichteten Rückseite geprüft werden. Wenn der zu geringe

Wert auf die durch den Mörtel verursachte Schädigung des Gefüges im Grundkörper zurückzuführen ist, muss die Prüfung als nicht bestanden gewertet werden, da der Mörtel für diesen Grundbeton dann offensichtlich ungeeignet ist. Eine Instandsetzungsmaßnahme hätte sonst unmittelbar eine erneute Schädigung der Altsubstanz zur Folge.

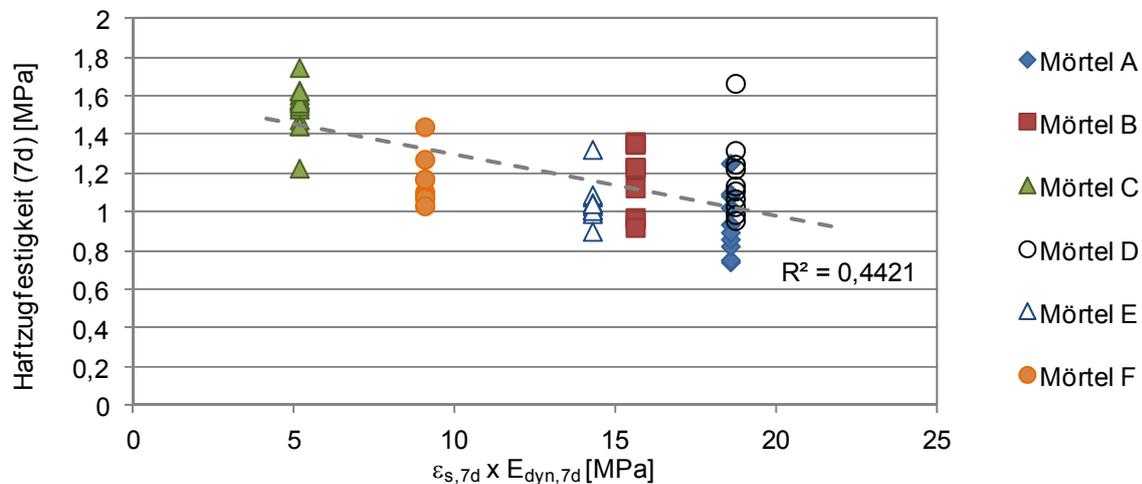


Bild 2: Erzielte Haftzugfestigkeit bei A3 Grundbeton in Abhängigkeit von Schwindmaß und Steifigkeit des Mörtels

5.3 Schwindinduzierte Rissbildung

Die Messergebnisse des behinderten Schwindens zeigen, dass zwischen der freien Schwindverformung und dem Verhalten in der Schwindrinne wie erwartet ein direkter Zusammenhang besteht. Die Rissbreitensummen in der Schwindrinne sind aber verfahrensbedingt immer kleiner als das freie Schwindmaß. Der Mörtel steht aufgrund der behinderten Schwindverformung zunächst unter Zugspannung. In den ungerissenen Bereichen bleibt die elastische Dehnung aufgrund des Verbundes zum Stahlprofil erhalten. Kriechen und Relaxation können zu einem teilweisen Spannungsabbau führen, so dass ggf. auch bei weiterer Schwindverformung keine neuen Risse entstehen. Bei den Ergebnissen gibt es jedoch Ausreißer, die sich nur durch zufällige ungewollte Einflüsse bei der Herstellung erklären lassen.

In Bild 3 sind links die Rissbreitensummen und rechts die maximalen Rissbreiten über den freien Schwindverformungen aufgetragen. Auch zwischen maximaler Rissbreite und Schwindverformung besteht, abgesehen von einigen Ausreißern, ein deutlicher Zusammenhang. Die Trendlinien wurden ohne Berücksichtigung der Ausreißer (ausgefüllte Symbole) ermittelt. Eine Extrapolation der Ergebnisse deutet darauf hin, dass bei einem Schwindmaß unter 0,5 mm/m mit einer Rissbreite von 0,0 mm, also mit Rissfreiheit, zu rechnen wäre. Zur Verifizierung lagen jedoch keine Prüfungen in diesem Bereich vor. Mit der Prüfung eines derartigen Mörtels könnte auch verifiziert werden, ob die geringen Rissbreitensummen von Mörtel F Ausreißer waren oder nicht. Die Trendlinie in Bild 3 (links) müsste dann ggf. im Bereich zwischen 0,5 und 0,7 mm/m nach unten abknicken.

Der Zusammenhang zwischen Schwindverformung und Rissbildung besteht für handapplizierte Mörtel und spritzapplizierte Mörtel gleichermaßen. Da jedoch bei der Spritzapplikation aufgrund der intensiveren Verdichtung in der Regel höhere Steifigkeiten vorliegen, ist das Problem hier verschärft. Wie schon in 4.1 angedeutet steigt bei schlechter Nachbehandlung (vgl. Lagerung B), anders als bei guter Nachbehandlung (vgl. Lagerung A), die Biegezugfestigkeit nicht proportional zu Steifigkeit und Druckfestigkeit. Wie in [6] erläutert, bleibt die messbare Biegezugfestigkeit hier aufgrund der mangelnden Nachbehandlung unterhalb ei-

nes gewissen Grenzwertes. Da dieser Effekt unabhängig von Druckfestigkeit und Steifigkeit ist, führt er besonders bei hohen Steifigkeiten zu sehr ungünstigen Verhältnissen bezüglich der Bildung von Zwängungsrissen. Wenn in der Praxis Schäden auftreten, d.h. wenn sich schwindinduzierte Zwängungsrisse bilden, dann geschieht dies aber gerade im Falle der schlechten Nachbehandlung.

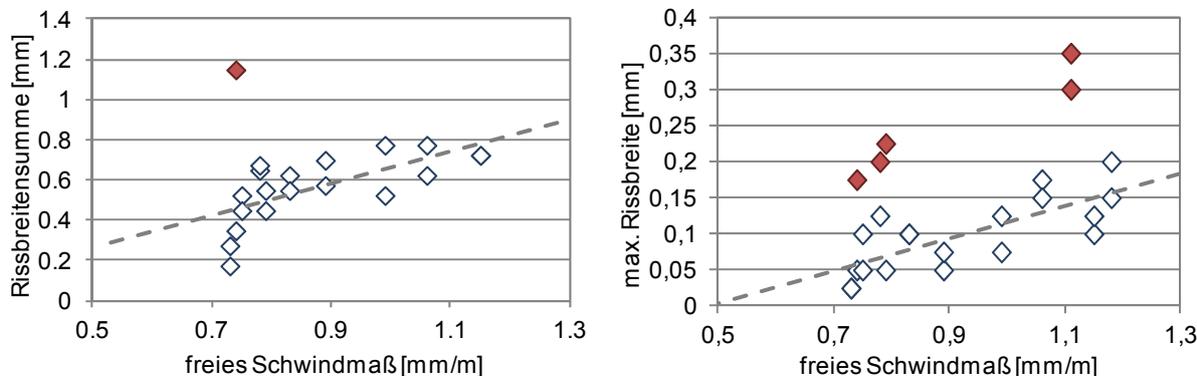


Bild 3: Rissbreitensummen (links) und maximale Rissbreite (rechts) in Abhängigkeit der freien Schwindverformung

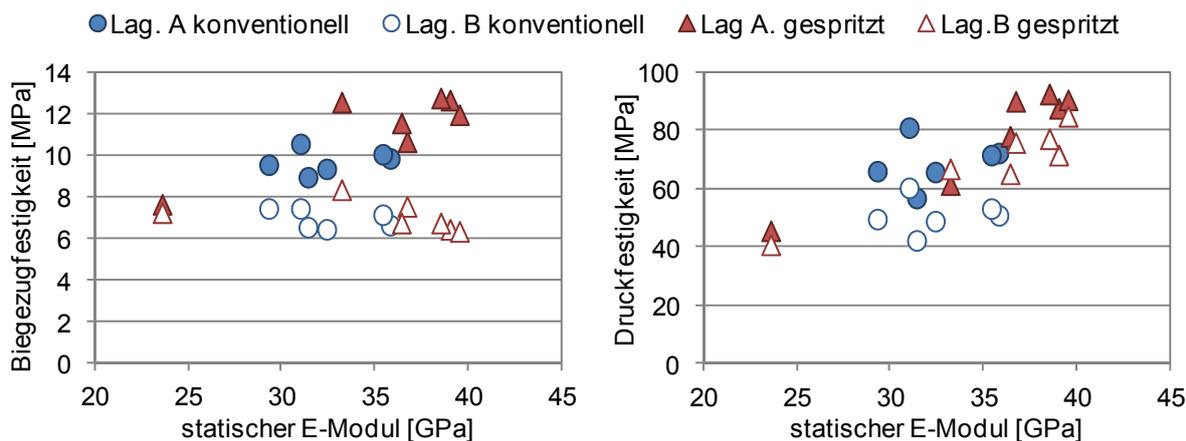


Bild 4: Biegezugfestigkeit (links) und Druckfestigkeit (rechts) in Abhängigkeit der Steifigkeit

In Bild 4 sind für die vorliegenden Mörtel die bei den unterschiedlichen Lagerungsarten erreichten Festigkeiten über der jeweiligen Steifigkeit aufgetragen. Mit Ausnahme von Mörtel C ist für die gespritzte Applikation das Verhältnis aus Biegezugfestigkeit und Steifigkeit für Lagerung B wesentlich ungünstiger als für die händische Applikation. Bei der Druckfestigkeit gibt es diese Abweichungen nicht, hier verhalten sich für beide Lagerungsarten Druckfestigkeit und Steifigkeit im Großen und Ganzen proportional zueinander. Für eine Eindämmung des Rissrisikos bei der Spritzapplikation ist es also wichtig, dass Überfestigkeiten unbedingt vermieden werden. Eine Möglichkeit hierfür ist der Einsatz von Kunststoffdispersionen, wie beispielsweise bei Mörtel C.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verminderung der Schwindverformung des Mörtels ein effektives Werkzeug zur Reduktion von Rissmenge und Rissbreite ist. Kriechen, Relaxation und elastische Verformung wirken positiv. Die Rissbreitensumme entspricht somit nicht dem

freien Schwindmaß. Der Zusammenhang bleibt aber bestehen: Ein geringeres Schwindmaß führt zu einer geringeren Rissbildungsintensität. Dennoch kann es unplanmäßige Ausreißer geben. Ein kleines Schwindmaß kann somit keine 100%-ige Rissfreiheit garantieren, da es eine Überlagerung mit anderen Einflüssen gibt, z.B. ungewollte Imperfektionen bei der Applikation, die als Rissinizationszonen fungieren. Jedoch erhöht jede Reduktion des Schwindmaßes die Erwartungswahrscheinlichkeit einer Rissfreiheit.

5.4 Schädigung des Grundbetons durch Frost-Tausalz-Beanspruchung

Wie in 4.2 dargestellt kommt es bei der Haftzugprüfung nach Frost-Tausalz-Beanspruchung häufig zu einem Abreißen im Grundbeton deutlich unterhalb der Sollfestigkeit. Wie bei den Prüfungen aus 5.2 liegt der Grund hier ebenfalls nicht in der Verwendung minderfester Grundkörper, sondern in einer Schwächung des Grundbetons durch die Beanspruchung. Die Ursache dieser Schwächung kann auf die Einwirkung der gesättigten Kochsalzlösung in Verbindung mit den Frost-Tau-Wechseln zurückgeführt werden.



Bild 5: Visualisierung der Chloridbelastung mit Silbernitratlösung

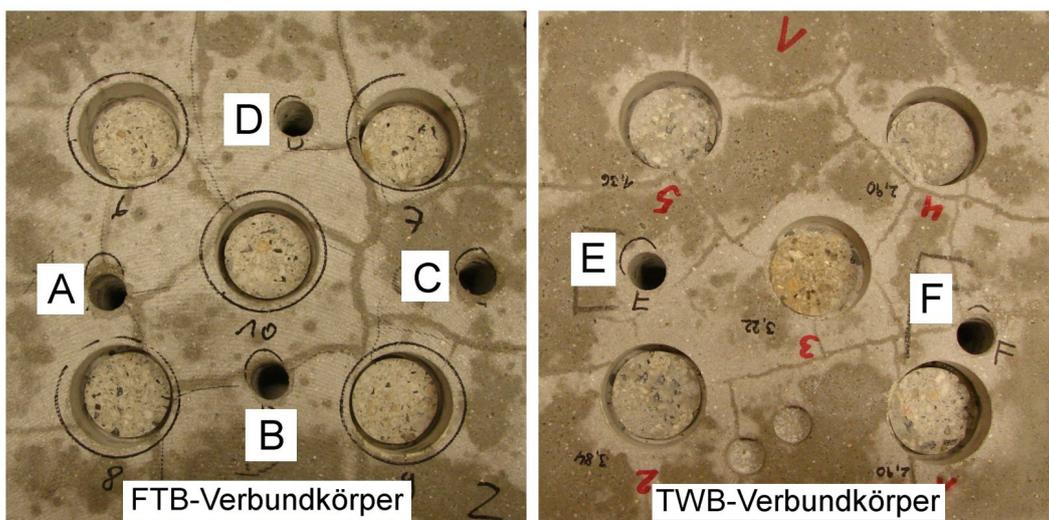


Bild 6: Lage der Bohrmehlentnahmestellen auf den Verbundkörpern

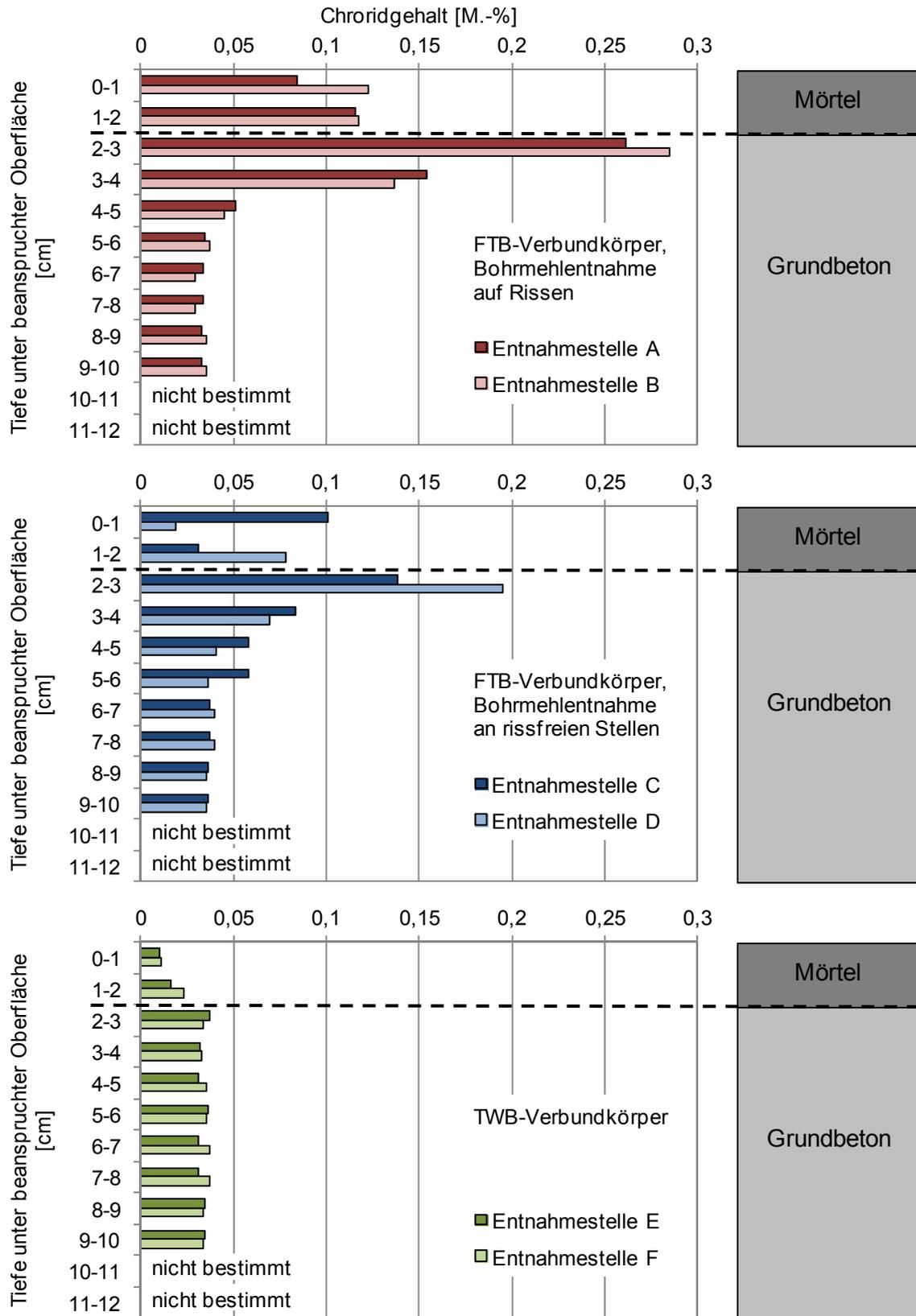


Bild 7: Chlorideindringprofile für FTB- und TWB-Platten, ermittelt aus Bohrmehlproben

Vergleichsuntersuchungen, bei denen eine nicht mit Mörtel beschichtete MC 0,40 Platte der FTB ausgesetzt wurde, belegen, dass weder die Temperaturwechsel an sich, noch eine Zermürbung des Grundkörpergefüges aufgrund von zyklischen Zwängungen durch unterschiedliche Temperaturdehnungsverhalten von Mörtel und Grundkörper der Grund für die Schädigung sind. Wie die anderen FTB-Verbundkörper war die Vergleichsplatte an den Seitenflächen und an der Rückseite mit Epoxidharz versiegelt, so dass die Tausalzlösung nur über die Vorderseite einwirken konnte. An der beanspruchten Vorderseite erreichte die Haftzugfestigkeit mit durchschnittlich 0,43 MPa nur etwa 12 % des Wertes der auf der ungeschädigten Rückseite nachgewiesen werden konnte. Bereits 1-2 cm unter der exponierten Oberfläche ist die Haftzugfestigkeit mit 1,27 MPa auf 35 % des Rückseitenwertes angestiegen. Im Normalfall soll der Instandsetzungsmörtel den Grundbeton vor der Einwirkung der Tausalzlösung schützen. Risse, durch die die Tausalzlösung zur Grundkörperoberfläche vordringen kann, ermöglichen eine Schädigung des Grundbetons unter der Instandsetzungsschicht.

In Bild 5 werden gespaltene Bohrkerne gezeigt, die aus einer FTB-Platte entnommen wurden. Zur Visualisierung der Belastung durch die Tausalzlösung wurden die Proben mit Silbernitratlösung besprüht. Helle Flächen deuten auf hohe Chloridgehalte hin, dunkle Flächen auf geringe. Es scheint so, als ob die Mörtelschicht in ihrem Inneren weniger mit Chloriden belastet ist, die Tausalzlösung hier also weniger stark eingedrungen ist. Unterhalb der Instandsetzungsschicht ist ein mehrere cm breites, stark mit Chloriden belastetes Band im Grundbeton zu erkennen, während der untere Bereich des Grundbetons unbelastet scheint. Aufgrund von Schwierigkeiten bei der Probenpräparation sind die Ergebnisse nicht besonders eindeutig, so dass zur genaueren Untersuchung des Eindringens der Tausalzlösung Bohrmehlprofile erstellt wurden. Zwei der Bohrmehlprofile wurden an Stellen mit offensichtlichen Rissen genommen, zwei an augenscheinlich ungerissenen Stellen und zwei weitere zum Vergleich an einer TWB-Platte, die keiner Tausalzbeanspruchung ausgesetzt war.

Bild 6 zeigt die Lage der Bohrmehlentnahmestellen auf den Platten. In Bild 7 sind die ermittelten Chloridbelastungen graphisch dargestellt. Die Auswertung der Bohrmehlprofile belegt, dass es (besonders bei Rissen) zu einer starken Chloridanreicherung in der obersten Schicht des Grundkörpers kommt, deutlich stärker als im Mörtel. Es zeigt sich auch, dass die Chloride die Instandsetzungsschicht förmlich unterwandern, da auch für Bohrungen auf ungerissenen Mörtel im darunterliegenden Grundkörper große Chloridanreicherungen nachgewiesen wurden. Ab einer Tiefe von ca. 6 cm, d.h. 4 cm im Grundkörper, liegen die Ergebnisse im normalen Bereich des Grundkörperbetons, wie der Vergleich mit der unbelasteten TWB-Platte belegt. Der unabhängig im Rahmen der Eignungsprüfung am reinen Mörtel bestimmte Chloridgehalt beträgt 0,014 M.-%.

Auch wenn ihre Breiten deutlich unter dem Grenzwert von 0,1 mm liegen fungieren die Risse als sehr leistungsfähige Transportwege für Chloride. Somit stellen sie nicht nur eine Gefahr für die Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons oder Mörtels dar sondern auch im Bezug auf chloridinduzierte Stahlkorrosion. Bereits kleinste Risse ermöglichen das tiefe Eindringen von Chloriden. Ein guter Chlorideindringwiderstand des Mörtels selbst spielt hierbei keine Rolle, da die Chloride die Instandsetzungsschicht durch die Risse umgehen und sich im Altbeton ausbreiten.

6. Zusammenfassung

Am Beispiel von SPCC-Verbundkörperprüfungen wurde die Notwendigkeit der Abstimmung des Instandsetzungsmörtels auf den Grundbeton verdeutlicht. Ist die Verträglichkeit nicht gegeben, so kann es durch Zwängung entweder zu einer Schädigung des Grundbetongefüges und damit zu einer Schwächung des Verbunds der Instandsetzungsschicht zur Altsubstanz kommen oder zu einer Rissbildung im Instandsetzungsmörtel.

Voraussetzung für eine dauerhafte Betoninstandsetzung ist jedoch die Gewährleistung eines ungestörten Verbundes und bestmögliche Rissfreiheit. Bei der Instandsetzung ist dies noch wesentlich wichtiger als beim Neubau eines monolithischen Betonbauwerks, da die Instandsetzungsschicht neben der Gewährleistung ihrer eigenen Dauerhaftigkeit die Aufgabe hat, den darunterliegenden schwächeren Altbeton zu schützen. Auch kleinste Risse unter 0,05 mm können hier schon kritisch sein, da sie beispielsweise in Verbindung mit Frost-Tausalzbeanspruchung sehr leistungsfähige Transportwege für Chloride darstellen.

Die bei der Spritzapplikation im Vergleich zur händischen Applikation in der Regel höhere Verdichtung des Mörtels wirkt sich bezüglich der Dauerhaftigkeit einer Instandsetzungsmaßnahme einerseits positiv auf einen erhöhten Karbonatisierungswiderstand und einen erhöhten Chlorideindringwiderstand aus. Andererseits erhöht sich durch die mit der höheren Verdichtung einhergehende höhere Steifigkeit jedoch die Gefahr von Zwängungsrissen.

Sowohl zur Sicherstellung des Verbundes als auch zur Vermeidung von Rissen ist die Abstimmung von Steifigkeit, Zugfestigkeit und Schwindverhalten von entscheidender Wichtigkeit. Neben der Steifigkeitsreduktion durch Kunststoffdispersionen bietet die Kontrolle der Schwindverformungen hier aus baustofflicher Sicht das größte Optimierungspotential.

Die Reduktion der Schwindverformungen ist ein zielführender Weg zur Leistungsverbesserung von Instandsetzungsmörteln. Selbst wenn Risse nicht gänzlich vermieden werden können, trägt jegliche Verminderung der Schwindverformungen zu einer Verringerung des Rissrisikos bzw. einer Verminderung der Rissintensität bei und verbessert so die Dauerhaftigkeit. Zur Eignungsbeurteilung eines Mörtels reicht jedoch die isolierte Betrachtung einzelner Mörtelkennwerte nicht aus. Die Ergänzung durch eine umfangreiche Performance-Prüfung an Verbundkörpern ist unumgänglich.

7. Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse stammen größtenteils aus dem Forschungsvorhaben „MODIN-SYS – Entwicklung eines modularen Betoninstandsetzungssystems für die Anwendungsbereiche Hoch-, Ingenieur- und Wasserbau sowie Trink- und Abwasser“, welches in dankenswerter Weise aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages durch das Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie gefördert wurde. Ebenso ist dem projektbeteiligten Industriepartner, der PAGEL Spezial-Beton GmbH & Co. KG, für die uneingeschränkte Kooperation im Rahmen des Forschungsvorhabens zu danken.

8. Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb):
Richtlinie Schutz und Instandsetzung von Betonbauteilen, Ausgabe 2001. Beuth Verlag, Berlin, 2001.
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW):
Merkblatt Spritzmörtel/Spritzbeton nach ZTV-W LB 219, Abschnitt 5 (BAW-Merkblatt „Spritzmörtel“) Ausgabe 2007. Karlsruhe, 2007.
- [3] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Betoninstandsetzung mit modular zusammengesetzten PCC- und SPCC-Mörteln. In: Stark, J (Hrsg.): Ibausil, 17. Internationale Baustofftagung Band 2, F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, 2009, S. 2-0151-2-0156.

- [4] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
MODINSYS modular systems for the protection and repair of concrete structures. In: de Aguiar, J. B.; Jalali, S.; Camões A.; Ferreira, R.M (Hrsg.): Proceedings of the 13th International Congress on Polymers in Concrete, 10.-12. 02.2010 Funchal – Madaira Islands, Portugal, University of Minho, Minho, Portugal, 2010, S. 697-704.
- [5] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Development of a Modular System for the Protection and Repair of Concrete Structures. Restoration of Buildings and Monuments – Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Vol. 16 (2010), Heft. 4/5, S. 387-400.
- [6] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Parameterstudien zum Einfluss von Rezepturveränderungen auf Schwindverhalten, Rissneigung und Steifigkeit mineralischer Instandsetzungsmörtel. In: Littmann, K. (Hrsg.): 7. Internationales Kolloquium Industrieböden 2010, 14.-16.12.2010, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 2010, S. 191-200.
- [7] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Einfluss ausgewählter Modifikationen der Mischungszusammensetzung auf die Eigenschaften von Instandsetzungsmörteln. In: Raupach, M. (Hrsg.): 2. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken 2011, 25.-26.01.2011, Technische Akademie Esslingen, Ostfildern, 2011, S. 213-221.
- [8] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Properties of Repair Mortars – Potentials and Risks of a Tailor-Made Mixture Proportioning. In: Dehn, F; Beushausen, H. (Hrsg.): Performance-based Specifications for Concrete – Proceedings, MFPA Leipzig GmbH Institute for Materials Research and Testing, Leipzig, 2011, S. 319-329.
- [9] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Einfluss ausgewählter Modifikationen der Mischungszusammensetzung auf die Eigenschaften von Instandsetzungsmörteln. Restoration of Buildings and Monuments – Bauinstandsetzen und Baudenkmalpflege, Vol. 17 (2011), Heft. 3/4, S. 169-180.
- [10] Ramge, P.; Kühne H.-C.; Meng B.:
Properties of Repair Mortars – Potentials and Risks of a Tailor-Made Mixture Proportioning. In: Grantham, M.; Mechtcherine, V.; Schneck, U. (Hrsg.): Concrete Solutions – Proceedings of Concrete Solutions, 4th International Conference on Concrete repair, Dresden 26.-28.09.2011, CRC Press/Balkema, Leiden, Niederlande, 2011, S. 451-459.
- [11] DIN EN 1766:
Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Referenzbetone für Prüfungen, Ausgabe 2000.
- [12] Ramge, P.; Rübner, K.; Kühne H.-C.:
Einflüsse der Mischungszusammensetzung auf die Porenstruktur von Instandsetzungsmörteln. In: XV. Workshop über die Charakterisierung von feinteiligen und porösen Festkörpern, 16.-17.11. 2010, Bad Soden am Taunus, 2010 (Vortrag und Poster).

Zu den Autoren

Dipl.-Ing. Peter Ramge

Studium des Bauingenieurwesens an der TU Darmstadt, danach Tätigkeit als Tragwerksplaner. Seit 2006 wissenschaftlicher Mitarbeiter, zunächst am Institut für Baustoffe der Leibniz Universität Hannover und seit 2008 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

peter.ramge@bam.de

Dr.-Ing. Hans-Carsten Kühne

Studium Steine und Erden an der TU Berlin, Promotion an der TU Hamburg-Harburg. Seit 2003 an der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung tätig, seit 2004 dort Leiter der Arbeitsgruppe „Zementgebundene Baustoffe; erweiterte Leistungsmerkmale“.

hans-carsten.kuehne@bam.de