

---

# UNTERSUCHUNGEN ZUM EINFLUSS VON VERZÖGERERN AUF DIE EIGENSCHAFTEN VON NASSSPRITZBETON

---

## ***STUDIES ON THE INFLUENCE OF RETARDERS ON THE PROPERTIES OF WET MIX SPRAYED SHOTCRETE***

Rudolf **Röck**, Andreas **Saxer**

Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften, Universität Innsbruck, Österreich

Joachim **Juhart**, Lukas **Briendl**, Marlene **Sakoparnig**, Florian **Mittermayr**

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, Österreich

Isabel **Galan**, Florian **Steindl**

Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz, Österreich

Wolfgang **Kusterle**

Ostbayerische Technische Hochschule Regensburg, Deutschland

Im Rahmen des Forschungsprogramms „**Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone (ASSpC)**“ wurde sowohl im Labor als auch in zwei Großspritzversuchen der Einfluss von diversen Verzögerern auf den Nassspritzbeton untersucht. Zum Einsatz kamen dabei 6 verschiedene handelsübliche Verzögerer, die meist in zwei verschiedenen Dosierungen zur Anwendung gebracht wurden. Die Betone wurden unmittelbar nach dem Anmischen und nach einer Haltezeit von 4 Stunden, in 4 Fällen auch in Langzeitverzögerung nach 15 - 17 Stunden, verspritzt und geprüft. Die Prüfungen umfassten sowohl Verarbeitungs- als auch Frischbeton- und Festbetoneigenschaften. Auch Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit wurden untersucht. Besonders bei der Frühfestigkeitsentwicklung konnten bisweilen starke Unterschiede im Vergleich zur Referenzmischung ohne Verzögerer festgestellt werden.

Es wurde auch versucht, die Ursachen der z.T. gravierenden Frühfestigkeitsminderungen zu eruieren.

*As part of the research program "**Advanced and Sustainable Sprayed Concrete (ASSpC)**", the influence of various retarders on the properties of wet-mix shotcrete was investigated both in the laboratory and in two large scale shotcrete tests. 6 different commercial retarders, mostly used in two different dosages, were applied. The concretes were sprayed and tested immediately after mixing and after a holding time of 4 hours, in 4 cases also after retardation of 15-17 hours. The processing properties as well as fresh and shotcrete properties were investigated. Influences on the durability were also examined. Especially for the early strength development remarkable differences were found compared to the reference mix without retarders.*

*Attempts were also made to explain the significant differences in early strength development.*

### **1. Einleitung**

Der Einsatz von Verzögerern ist in der Praxis der Spritzbetonverarbeitung besonders im Tunnelbau nicht mehr wegzudenken. Insbesondere zur Gewährleistung des ungestörten Baufortschritts sind verzögerte Spritzbetone unerlässlich. Die Herstellung des Spritzbetons erfolgt üblicherweise in einer in der Nähe des Tunnelportals errichteten Mischanlage. Je weiter der Tunnelbau fortgeschritten ist, umso länger gestalten sich die Anfahrtswege zur Einbaustelle und umso länger muss der Spritzbeton verarbeitbar sein ohne wesentliche Qualitätseinbuße.

Wegen der immensen Wichtigkeit dieser Zusatzmittelgruppe wäre zu erwarten, dass umfangreiche Untersuchungen über den Einfluss von Verzögerern auf den Spritzbeton vorliegen sollten. Dem ist jedoch nicht so. Es sind kaum Untersuchungen zu finden, die die Auswirkungen der diversen Verzögerertypen auf die Eigenschaften des Spritzbetons darlegen und dokumentieren. Insbesondere was den Einfluss auf die Dauerhaftigkeit betrifft, konnten lediglich Arbeiten über Normalbeton [1], nicht aber über Spritzbeton gefunden werden.

Es war also an der Zeit, im Rahmen des Forschungsprogramms zur Entwicklung dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone (ASSpC), den Einfluss von Verzögerern auf die neuen Spritzbetone zu untersuchen und den Anwendern zur Kenntnis zu bringen.

## 2. Versuchsplanung

Zur Abklärung des Temperatureinflusses wurden zwei Großspritzversuche (Zams-III und Hagerbach) veranstaltet. Einmal im November 2019 im Freien bei feucht-kalter Witterung um die -1 bis 5°C und teilweise Schneefall und einmal im Versuchsstollen Hagerbach bei einer Umgebungstemperatur von konstant 20 °C.

Auch bei kalter Witterung wurden die Zuschläge nicht beheizt, sodass stets eine Frischbetontemperatur von ca. 10-12°C zu verzeichnen war. In Hagerbach betrug die Frischbetontemperatur 16 - 18°C.

Die Verzögerer-Dosierung richtete sich nach den ausgeführten Laboruntersuchungen zur Ermittlung der Verzögerer-Leistung für 8 Stunden und in zwei Fällen für 24 Stunden Verzögerungsdauer. Dabei wurde besonders bei der hohen Dosierung darauf geachtet, den vernünftig noch sinnvollen Bereich auszuloten bzw. sogar zu überschreiten und somit auch die Auswirkungen von Extremdosierungen studieren zu können.

Die Frischbetonprüfung und die Herstellung von Spritzkisten für die Frühfestigkeitsprüfung sowie die Festigkeits- und Dauerhaftigkeitsprüfungen wurden jeweils nach 0,3 Stunden und 4 Stunden bzw. für Langzeitverzögerer nach 7,5 oder 15 bzw. 17 Stunden durchgeführt.

Zur Abwicklung der Versuche wurde ein genauer Zeitplan festgelegt. Um die große Anzahl der Versuche bewältigen zu können, waren beim ersten Versuch in Zams zwei Mischfahrzeuge und eine Mannschaft von insgesamt 20 Personen im Dauereinsatz.

Für alle Versuche wurden folgende Prüfungen durchgeführt:

- Frischbetonprüfung bestehend aus Fließmaß, Ausbreitmaß, Luftporen-Gehalt, FB-Dichte, Filtratwassermenge und Viskositätsprüfung mittels Rohrviskosimeter (Sliper).
- Verarbeitungseigenschaften am Spritzmobil: Hydraulikdruck, Leitungsdrücke an 4 Stellen, Luftdruck, EB-Pumpendruck.
- Frühfestigkeitsmessung mittels Penetrometer und Hilti-Setzbolzen-Methode gemäß Richtlinie Spritzbeton.
- Druckfestigkeitsprüfung an Bohrkernen nach 28 und 90 Tagen Wasser-Lagerung.
- RV-Test
- Carbonatisierungstiefe (nur Zams-III)
- Wasserundurchlässigkeit (nur Zams-III)
- Sulfatdehnung an 23 mm Bohrkernen
- Thaumazitprüfung

### 3. Voruntersuchungen

Zur Abklärung der Einflüsse diverser Verzögerer auf die Frühfestigkeit wurden zunächst im Labor mit der Prismenmethode (**Siehe Anhang**) beschleunigte Spritzmörtel mit 4 mm Größtkorn hergestellt und geprüft. Zur Auswahl kamen 8 verschiedene handelsübliche Verzögerer von insgesamt 4 Herstellerfirmen wie in Tabelle 1 dargestellt.

Tab. 1: Für die Voruntersuchung eingesetzte Verzögerer-Typen

Nr.	Hersteller	Basis
VZ 1	A	Zucker (Saccharose)
VZ 2	A	Tetrakaliumpyrophosphat
VZ 3	B	2-Phosphonobutan-1,2,4-tricarbonsäure Citronensäuremonohydrat
VZ 4	C	Phosphonsäure
VZ 5	C	Gluconate
VZ 6	D	Nitrilomethylenphosphonat Citronensäure
VZ 7	D	Alkaliphosphat + Monosaccharide
VZ 8	D	Zucker (Saccharose)

Dabei zeigte sich bei einer einheitlichen Dosierung von jeweils 1M-% auf das Bindemittel bezogen ein eklatanter Unterschied in der Frühfestigkeitsentwicklung im Vergleich zum unverzögerten Mörtel. In Bild 1 sind diese Ergebnisse dargestellt.

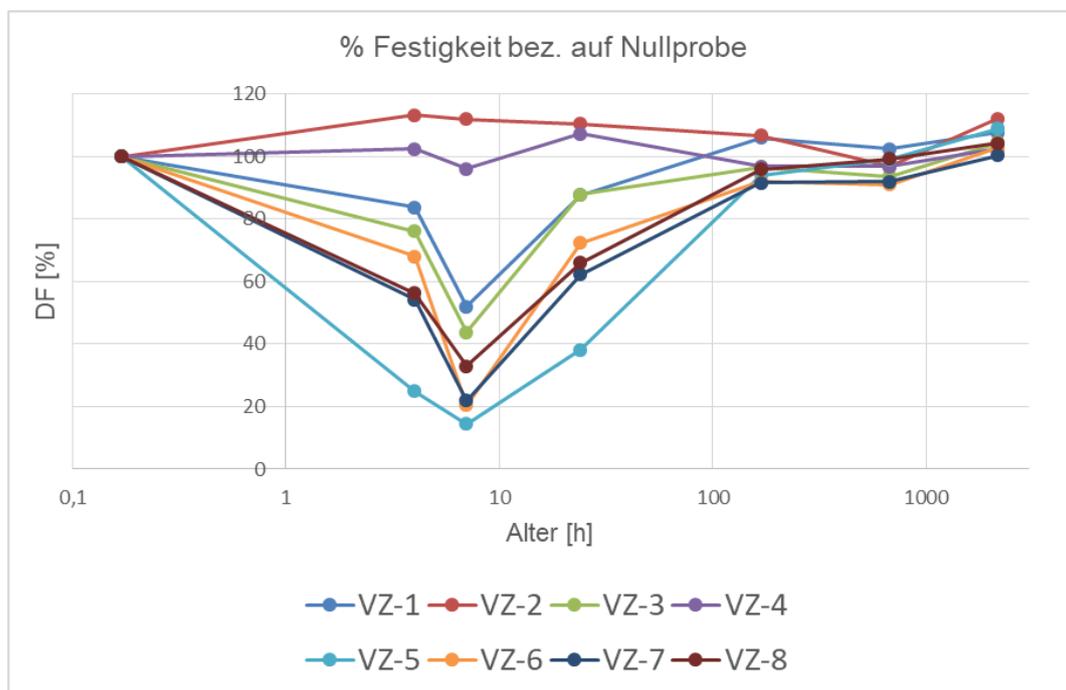


Bild 1: Einfluss diverser Verzögerer auf die Frühfestigkeitsentwicklung von beschleunigten Mörteln in Prozent zur unverzögerten Probe.

Dieses Ergebnis zeigt, dass die Prüfung der Festigkeitsentwicklung von zum Teil stark überdosierten Verzögerermischungen den Produkten nicht gerecht wird, weil die Verzögerungsleistung, d.h. die für eine bestimmte Verzögerungsdauer (z.B. 8 Stunden) notwendige Dosierung nicht berücksichtigt wurde.

Es war daher zwingend erforderlich, vor Beginn der Großversuche die Verzögerungsleistung der einzelnen Produkte zu ermitteln und dementsprechend die Dosierung für den Großversuch zu wählen.

Die Ermittlung der Verzögerungsleistung erforderte eine ausgedehnte Testreihe von Ausbreitmaß-Messungen an 4 mm Mörteln mit jeweiligen Verzögerer-Dosierungen von 0%, 0,3%, 0,6%, 1,0% und 1,5% bezogen auf das Bindemittel.

Diese Prozedur wurde im Labor vollzogen. Das Ergebnis ist in Tabelle 2 und Bild 2 und 3 dargestellt. Aus diesen Messungen ließ sich die Verzögerungsleistung des jeweiligen Produkts ableiten.

Als Beispiel sei das Verhalten von VZ1 (Saccharose) dargestellt.

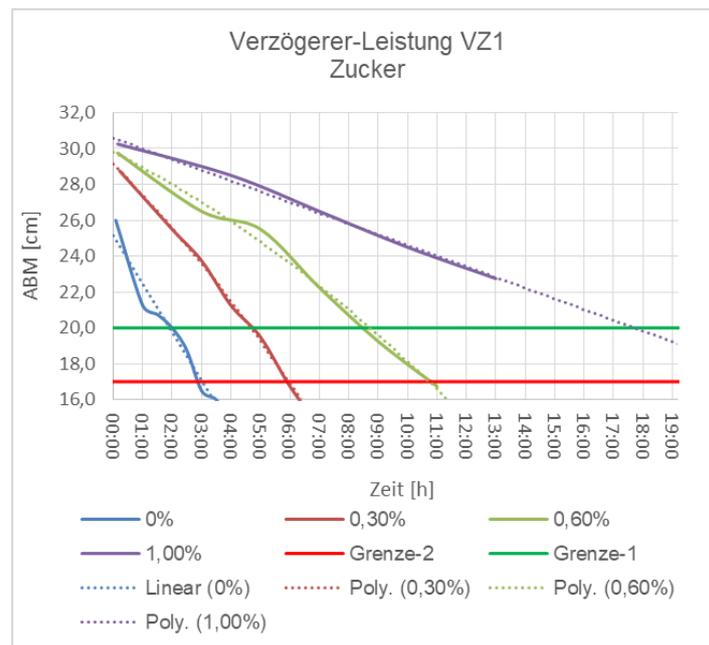


Bild 2: Messung des Verzögerungsverhalten von VZ1 (Saccharose)

Wenn man die Verarbeitbarkeitsgrenze mit einem Ausbreitmaß von 20 cm auf dem Hägermann-Tisch (grüne Horizontale) annimmt und die Schnittpunkte der 4 Kurven gegen die Verzögerungsdauer aufträgt, lässt sich die Verzögerungsleistung des untersuchten Produkts ablesen.

Tab. 2: Schnittpunkte der Verzögerungskurven mit dem ABM-Grenzwert 20 cm

%	h VZ-20 cm	VZ Ziel h
0,00%	2,0	8
0,30%	4,6	8
0,60%	8,5	8
1,00%	17,6	8

Auf diese Weise wurden alle ausgewählten 6 Verzögerertypen behandelt.

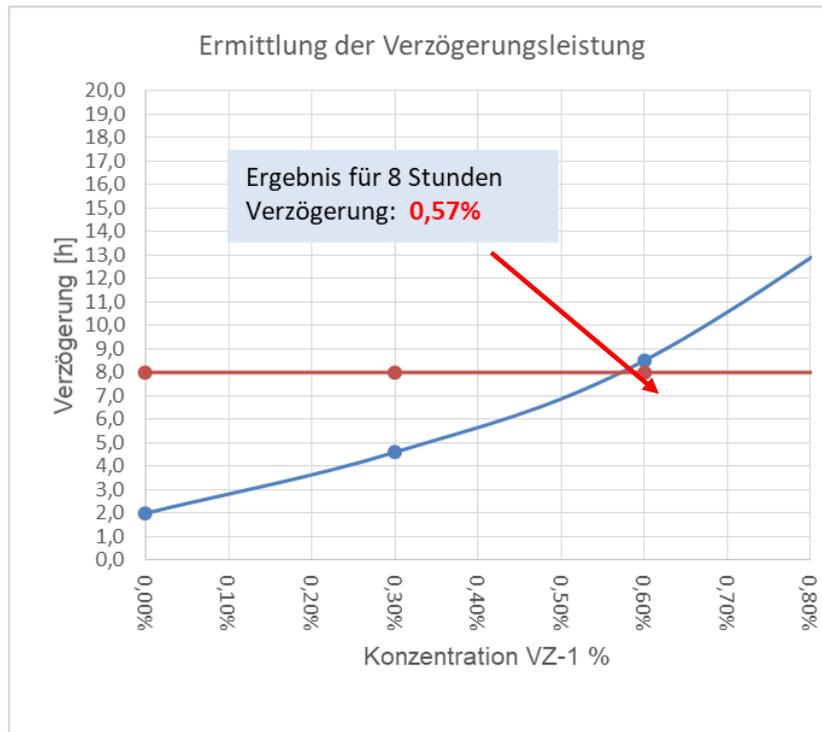


Bild 3: Ermittlung der Verzögerungsleistung für 8 Stunden Verzögerung.

#### 4. Geräte

Bei beiden Großversuchen wurde dasselbe Spritzmobil Sika PM 500 (Bild 4) von der Partner-Firma Sika zur Verfügung gestellt und vom selben Düsenführer bedient.



Bild 4: Spritzmobil und seine Beschickung

## 5. Materialien

### 5.1 Bindemittel

Als Bindemittel wurde das aus bisherigen Versuchen resultierende optimale Gemisch aus 280 kg/m<sup>3</sup> CEM I 52,5 R und 140 kg/m<sup>3</sup> Premium-AHWZ verwendet.

Das Gesamtbindemittel wies folgende Zusammensetzung auf:

Tab. 3: Zusammensetzung Bindemittel für Verzögerer-Versuche

Material	Gewichts-%
CEM I 52,5 R	67
Hüttensand gemahlen	19
Metakaolin SF	7
Feinstcalcit	7

### 5.2 Zusatzmittel

- **Fließmittel: Zams-III**

Zur Einstellung der Verarbeitungskonsistenz von einem Zielwert von 55 – 60 cm Ausbreitmaß wurde stets ein Produkt der Firma BASF Glenium Sky 894 verwendet, das im Betonwerk in Verwendung war.

- **Fließmittel Hagerbach**

Sika Viscocrete SC-200

- **Luftporenbildner Zams-III**

Ebenso wurde der im Werk in Verwendung befindliche Luftporenbildner Microair 9001 von BASF eingesetzt. Der Zielwert des LP-Gehalts für den Spritzbeton betrug 10 %. Es wurden einheitlich 1,26 kg/m<sup>3</sup> dosiert. Damit wurde ein LP-Gehalt im Frischbeton erzielt, der zwischen 8 % und 13 % schwankte.

- **Luftporenbildner Hagerbach**

Sika Control Air 200P; Dosierung: 1,6 kg/m<sup>3</sup>. Der LP-Gehalt im Frischbeton bewegte sich zwischen 8 und 12 %.

- **Verzögerer Zams-III und Hagerbach**

Es wurden 6 handelsübliche Verzögerer (Tabelle 4) nach dem Kriterium ausgesucht, dass jede mögliche chemische Basis, die in der Praxis in Verwendung ist, zur Untersuchung kommt.

Aus den Vorversuchen zur Bestimmung der Leistungsfähigkeit der eingesetzten Verzögerer ergaben sich die in Tabelle 4 dargestellten Dosierungen für eine Verzögerungsdauer von mindestens 8 Stunden.

Die beiden Produkte VZ5 und VZ6, die speziell für Langzeitverzögerung vorgesehen waren, wurden ebenfalls nach den Vorgaben der Verzögerungsleistung für 24 Stunden entsprechend dosiert.

- **Beschleuniger**

Für alle Versuche (Zams-III und Hagerbach) wurde ein Beschleuniger der Firma Sika mit der Bezeichnung Sigunit L 5601 AF mit einer Dosierung von 7% auf das Gesamt-Bindemittel bezogen verwendet. In Ausnahmefällen wurden 10% dosiert,

um zu ergründen, ob die höhere Dosierung die wegen der Kälte mäßigen Anfangsfestigkeiten erhöhen kann.

Tab. 4: Für die Spritzversuche verwendete Verzögerer-Typen und Dosierungen

Verzögerer-Dosierung für 8 h Verzögerung auf ABM 20 cm (Pumpbarkeit)			% Dosierung Großversuch Zams-III		
Zusammensetzung	Bezeichnung	% Dosierung 8h	niedrig	hoch	LZ (15h)
Zucker (Saccharose)	VZ1	0,57	0,5	0,8	
Tetrakaliumpyrophosphat	VZ2	1,12	1,0	1,5	
2-Phosphonobutan-1,2,4-tricarbonsäure + Gluconate	VZ3	0,48	0,4	0,8	
Nitrilmethylenphosphonat+Citronensr.	VZ5	0,16			0,6
Alkaliphosphat + Monosaccharide	VZ6	0,43			1,0
	VZ7	0,60		0,5	
Verzögerer-Dosierung für 8 h Verzögerung auf ABM 20 cm (Pumpbarkeit)			% Dosierung Großversuch Hagerbach		
Zusammensetzung	Bezeichnung	% Dosierung 8h	niedrig	hoch	LZ (15h)
Zucker (Saccharose)	VZ1	0,57	0,5		0,8
2-Phosphonobutan-1,2,4-tricarbonsäure +	VZ3	0,48	0,6		1,0

## 6. Rezepturen

Die für die Verzögerer-Versuche gewählten Rezepturen sind in den Tabellen 5a und 5b aufgelistet. Grundsätzlich wurde ein Bindemittelgehalt von 420 kg/m<sup>3</sup> (bzw. in Hagerbach 410 kg/m<sup>3</sup>) bei einem Ziel-W/B-Wert von 0,47 festgelegt. Das Bindemittel bestand aus CEM II/A-M(S,L,Q) 42,5 N und wurde von der Firma Schretter in Vils aus den Komponenten CEM I 52,5 R, gemahlenem Hüttensand, Metakaolin und Feinstcalcit zusammengemischt und im Silozug angeliefert.

Die Zusammensetzung des Bindemittels ist in Tabelle 3 dargestellt. Die Rezepturen samt den Anteilen an Verzögerern zeigen die Tabellen 5a und 5b.

## 7. Durchführung der Versuche

### 7.1 Versuch Zams-III

Nach dem erwähnten Ablaufkonzept wurden die geplanten 11 Versuche innerhalb von 3 Tagen gemischt, gespritzt und geprüft.

Der Ablauf war folgender: Für die vorgesehene Rezeptur wurden jeweils 3 m<sup>3</sup> Beton gemischt und die Frischbetonkennwerte Fließmaß, Ausbreitmaß, Luftporengehalt, Viskosität mit dem Rohrviskosimeter, Filtratwasser mit der Betonfilterpresse und der Wassergehalt (W/B-Wert) mittels Mikrowellentrocknung bestimmt.

Sobald die Konsistenz ermittelt und für gut befunden war, fuhr das Mischfahrzeug zur Einbaustelle, wo sofort jeweils 5 Kisten mit Beschleuniger und eine Kiste ohne Beschleuniger (Null-Probe) gespritzt wurden. Diese Null-Probe wurde gebraucht, um den durch den Beschleuniger verursachten Festigkeitsabfall zu ermitteln.

Während des Spritzvorgangs wurde an der Pumpe an 4 Stellen die Drücke gemessen und elektronisch aufgezeichnet. Die 3 wichtigsten Werte (Hydraulikdruck, Maschinenleistung und Druck an der Beschleuniger-Pumpe) wurden zusätzlich auch händisch erfasst.

Unmittelbar anschließend begann die Prüfung der Frühfestigkeitsentwicklung mittels Penetrometer und Hilti-Setzbolzen-Methode.

Tab. 5a: Rezepturen pro m³ Zams-III

Dichte Stoffe kg/l	m³	1,04	1,11	1,11	1,11	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	2,78	2,78	2,78	1,00	
	gewählter BM-Gehalt kg/m³															
Nr.:	Beschreibung	VZ1 Zucker kg/m³	VZ2 Phosphat kg/m³	VZ3 Phosphat + CS kg/m³	VZ5 Gluconat kg/m³	VZ6 Delvo HCA- 20 kg/m³	VZ7 Alkaliphos- phat Mono- saccharide kg/m³	EB %	LP %	FM %	TBA- Sand 0- 4 mm kg/m³	TBA- Kies 4- 8 mm kg/m³	Wasser kg/m³			
M0	Referenz ohne Verzögerer	420	1,00					1,10	0,15	7,00	1336	441	180			
M0 W	Referenz ohne Verzögerer	420	1,00					1,10	0,15	7,00	1342	440	207			
M1	VZ1 niedrig	420	1,00	0,50				1,10	0,15	7,00	1323	440	186			
M2	VZ1 hoch	420	1,00	0,80				1,00	0,15	7,00	1324	439	194			
M3	VZ2 niedrig	420	1,00		4,20			0,90	0,15	7,00	1338	441	206			
M4	VZ5 Langzeit	420	1,00		0,60	2,52		1,20	0,15	7,00	1339	442	202			
M5	VZ2 hoch	420	1,00		1,50	6,30		1,00	0,15	7,00	1343	445	201			
M6	VZ3 niedrig	420	1,00	0,40	1,68			0,90	0,15	7,00	1337	444	207			
M7	VZ3 hoch	420	1,00	0,80	3,36			1,00	0,15	7,00	1339	443	199			
M8	VZ6 Langzeit	420	1,00			1,00	4,20	1,00	0,15	7,00	1339	441	200			
M9	VZ7mittel	420	1,00				0,50	0,90	0,15	7,00	1339	443	192			
M9 a	VZ7 hoch VZ nach 10 min zugeben	420	1,00				1,00	0,90	0,15	7,00	1426	405	193			

Tab. 5b: Rezepturen pro m³ Hagerbach

Dichte Stoffe kg/l	m³	1,04	1,11	1,11	1,11	1,20	1,20	1,20	1,20	1,20	2,78	2,78	1,00		
	gewählter BM-Gehalt kg/m³														
Nr.:	Beschreibung	VZ1 Zucker kg/m³	VZ2 Phosphat kg/m³	VZ3 Phosphat + CS kg/m³	VZ5 Gluconat kg/m³	VZ6 Delvo HCA- 20 kg/m³	VZ7 Alkaliphos- phat Mono- saccharide kg/m³	EB %	LP %	FM %	TBA- Sand 0- 4 mm kg/m³	TBA- Kies 4- 8 mm kg/m³	Wasser kg/m³		
M0	Referenz ohne Verzögerer	410	1,00					1,10	0,15	7,00	1280	427	190,7		
M1	VZ3 niedrig	410	1,00	0,50	2,05			1,10	0,15	7,00	1280	427	189,1		
M2	VZ3 hoch	410	1,00	0,80	3,28			1,00	0,15	7,00	1280	427	188,3		
M3	VZ1 niedrig	410	1,00	0,60				0,90	0,15	7,00	1280	427	188,5		
M4	VZ1 niedrig hoch	410	1,00	1,00				1,90	1,15	8,00	1280	427	187,0		

Die Pumpenkennwerte wurden meist bei 3 verschiedenen Spritzleistungen (12, 18 und 24 m<sup>3</sup>/h) gemessen. Bei ausgewählten Versuchen wurden mittels Hochgeschwindigkeitskamera Video's gedreht, die besonders das Unterbrechen des Frischbetonstromes während der Umschaltvorgänge der Pumpenzylinder dokumentieren sollten.

Die restliche Betonmenge von ca. 1,5 m<sup>3</sup> verblieb die nächsten 3-4 Stunden im Mischfahrzeug und wurde nach 4-stündiger Haltezeit der gleichen Prozedur unterzogen. Im Falle von Langzeit-Verzögerung verblieb die Mischung über Nacht 15 Stunden im Mischwagen und wurde am nächsten Tag verspritzt und geprüft.

Wie schon erklärt, herrschten zu dieser Zeit bereits winterliche Verhältnisse bei Temperaturen von -1 bis +5°C, bisweilen bei Schneefall oder Schneeregen und trüber feuchter Witterung. Lediglich die ersten beiden Versuche verliefen bei gutem aber kaltem Wetter um den Gefrierpunkt.

Eine bemerkenswerte Erscheinung trat besonders bei den Langzeit-Verzögerer-Versuchen auf. Wir beobachteten abhängig von der Luftfeuchtigkeit mehr oder weniger starke Kondenswasser-Bildungen im Mischwagen, was zum Teil für beträchtliche W/B-Wert-Erhöhungen von bis zu 5 Punkten (also z.B. von 0,49 auf 0,54) führte (Tabelle 6).

Tab. 6: Kondensatbildung in Abhängigkeit von Luftfeuchtigkeit und Witterung

Mischung	Lagerungsdauer [h]	W/B Beginn	W/B nach Lagerung	Kondensat-Menge/h [l]	Luftfeuchte	Witterung
VZ1n	4	0,46	0,47	17	67	Schön, trocken
VZ1h	4	0,48	0,46	-17	49	Schön, trocken
VZ2n	4	0,50	0,52	17	51	Schön, trocken
VZ5LZ	15	0,50	0,54	34	96	Nebel, feucht
VZ2h	4	0,50	0,51	17	95	Nebel, feucht
VZ3n	4	0,51	0,53	17	93	Nebel, feucht
VZ3h	4	0,49	0,52	25	97	Schneefall, feucht
VZ6LZ	15	0,49	0,54	42	92	Schneefall, feucht
VZ7	7,5	0,47	0,51	34	79	feucht

## 7.2 Versuch Hagerbach

Im Gegensatz zu Zams herrschten im Versuchsstollen Hagerbach konstant 20°C und 70 bis 80% relative Luftfeuchtigkeit. Die Frischbetontemperatur bewegte sich stets um die 17 °C. Zum Unterschied von Zams stand im Hagerbachstollen nur ein Mischfahrzeug zur Verfügung, sodass die Spritz-Versuchs-Häufigkeit etwas geringer war. Wir benötigten für die insgesamt 9 Versuche ebenfalls 3 Tage.

## 8. Ergebnisse

### 8.1 Bohrkernfestigkeiten

Aus den Kisten wurden Ø 100 mm Bohrkern entnommen, auf 100 mm abgelängt und plan geschliffen. Die Lagerung der Bohrkern erfolgte bis zur Prüfung unter Wasser. Die Ergebnisse sind in Bild 5a und 5b dargestellt.

Im Gegensatz zu Hagerbach wurden in Zams-III teilweise extrem starke (bis 50%) Festigkeitsminderungen gegenüber Beschleuniger-freien Proben gemessen. Ob diese Erscheinung an der Frischbetontemperatur oder an den Gesteinskörnungen gelegen war, konnte nicht ermittelt werden. Die übrigen Parameter waren gleich.

Die Absolutwerte der beschleunigten Proben lagen immerhin in ähnlichem Bereich.

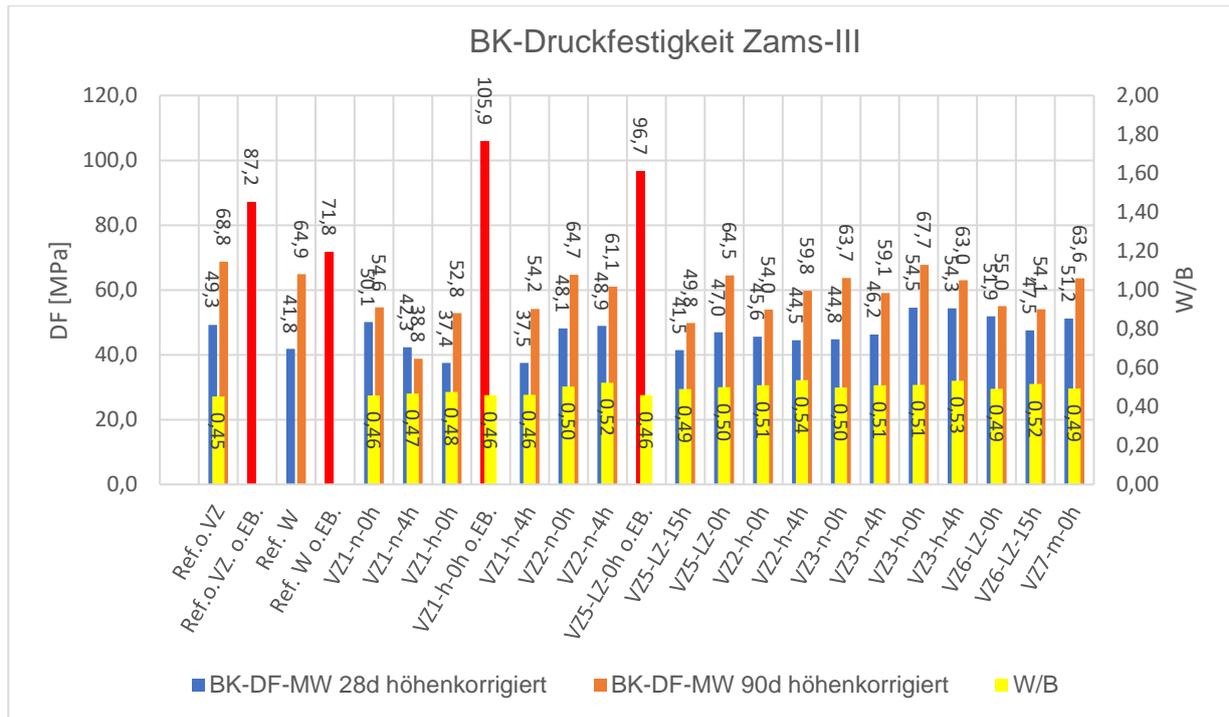


Bild 5a: Bohrkernfestigkeiten 28 u. 90 d und W/B Zams-III; Werte ohne EB sind rot

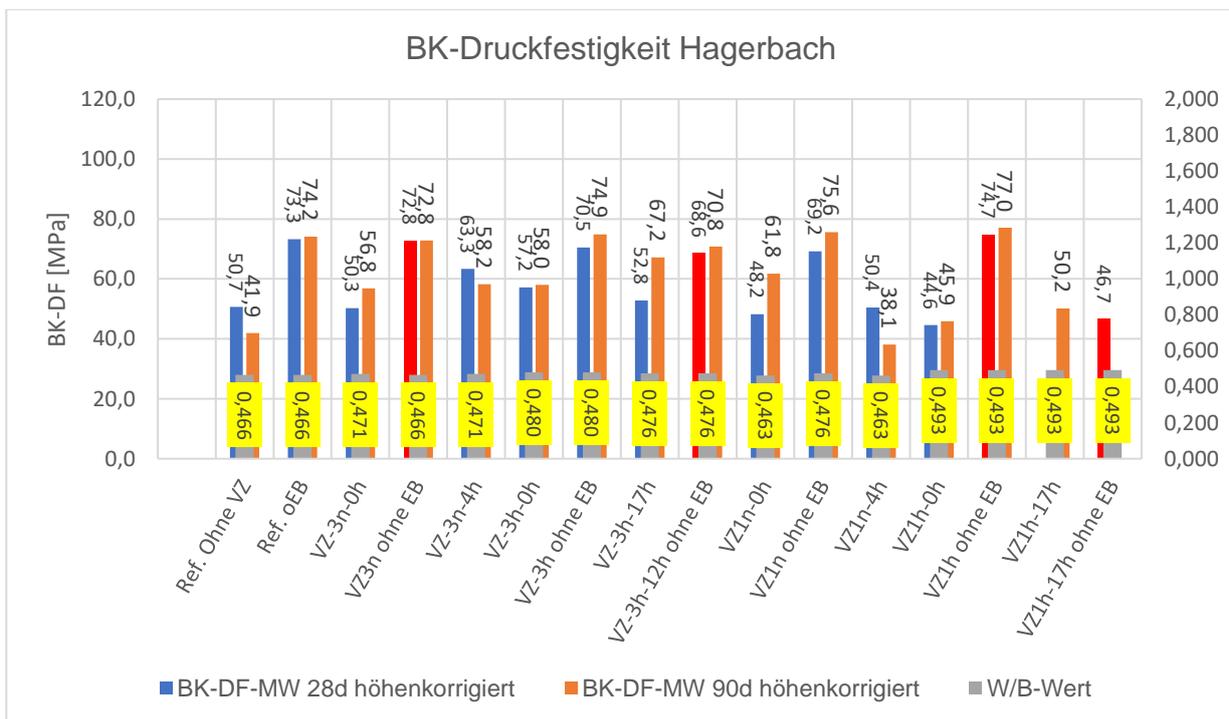


Bild 5b: Bohrkernfestigkeiten 28 u 90 d und W/B Hagerbach; Werte ohne EB sind rot

Wie aus den Ergebnissen ersichtlich, lässt sich kein signifikanter allein Verzögererbedingter Einfluss auf die Bohrkernfestigkeiten ableiten, zumal bedacht werden muss, dass die verwendete Gesteinskörnung doch recht unterschiedlich war. Während in Zams Kalkdolomit eingesetzt wurde, stand in Hagerbach Silikat-Gestein zur Verfügung. Zudem führte die

sogenannte, durch Materialstromunterbrechung bedingte Lagenbildung, vereinzelt zu Festigkeitsminderung.

Am ehesten könnte dem VZ1 (Saccharose) ein gewisser Festigkeitsmindernder Einfluss zugeschrieben werden.

## 8.2 Frühfestigkeiten

Zur besseren Übersichtlichkeit wurden die direkten Messwerte aus Penetrometer und Hilti-Setbolzenverfahren mittels Interpolation in ein einheitliches Bild umgesetzt, bei dem stets die Messpunkte bei 0,1; 1,0; 3,0; 6,0; 15,0 und 24,0 Stunden gesetzt wurden. Die Ergebnisse sind in Bild 4 angeführt.

Die Diagramme zeigen jeweils die Festigkeit der Referenz-Probe (schwarz) ohne Verzögerer, sowie jene nach 0,3h (orange) und nach Haltezeit 4h, 7,5h oder 15h (blau).

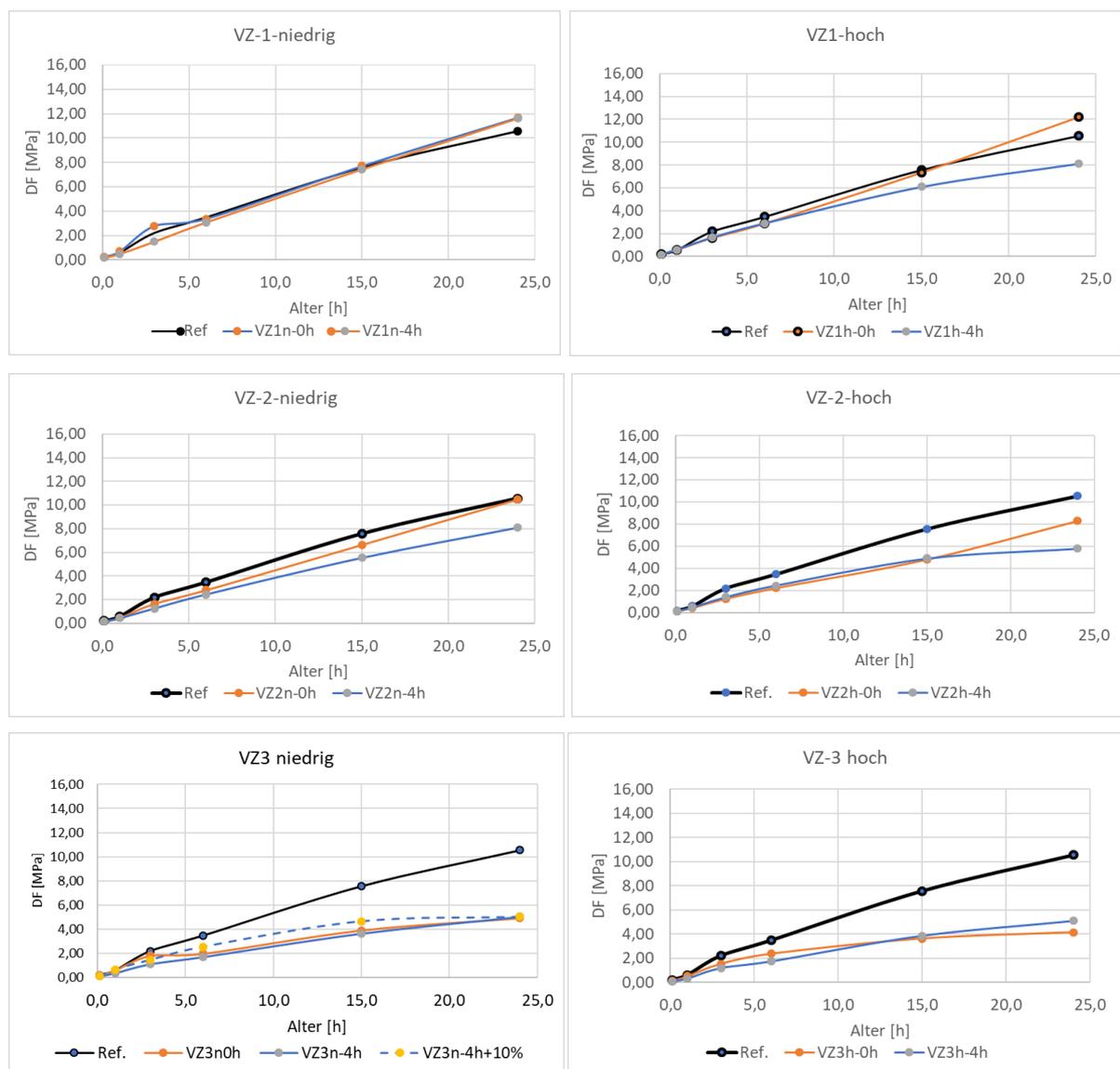


Bild 6a Teil 1: Zams-III Frühfestigkeitsentwicklung mit verschiedenen Verzögerern niedrig und hoch dosiert; J-Grenzen Frühfestigkeit

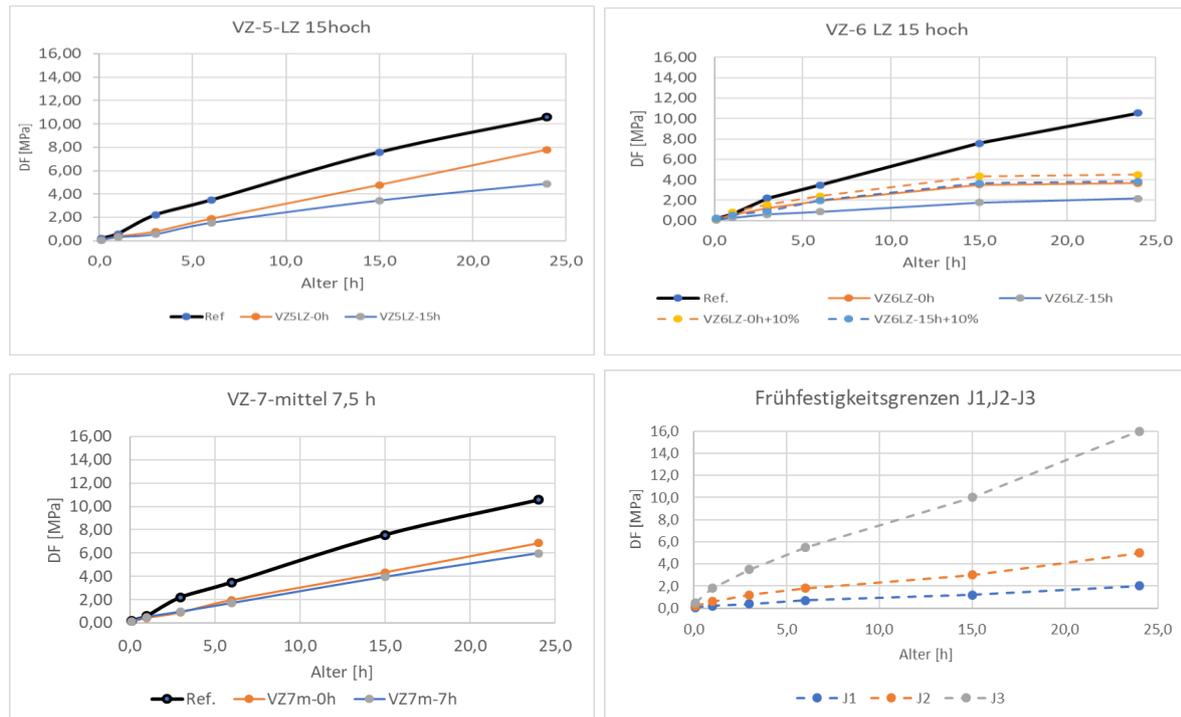


Bild 6a Teil 2: Zams-III Frühfestigkeitsentwicklung mit verschiedenen Verzögerern niedrig und hoch dosiert; J-Grenzen Frühfestigkeit

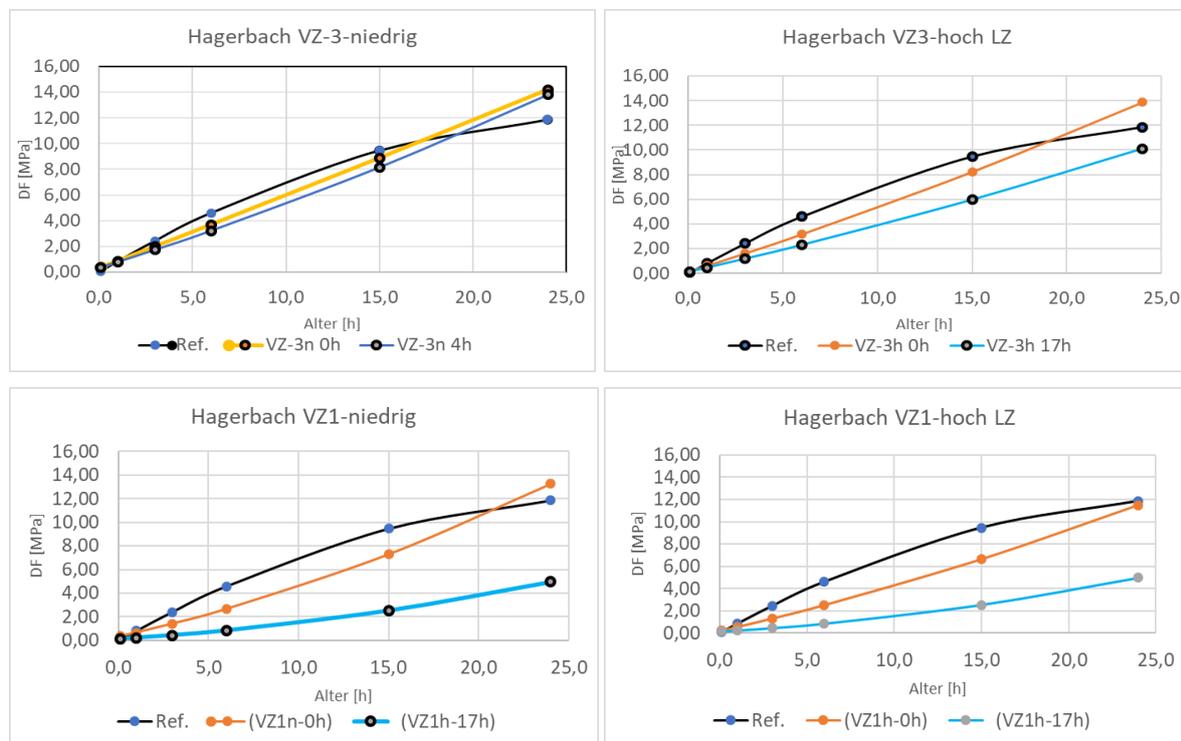


Bild 6b: Hagerbach Frühfestigkeiten mit zwei Verzögerern niedrig und hoch dosiert.

Aus den Ergebnissen lässt sich ablesen, dass Verzögerer zu ganz frühen Zeiten (Messbereich Penetrometer) bis zu einer Stunde kaum oder nur wenig Einfluss auf die Frühfestigkeit zeigen. In der Folge kann es aber besonders bei hohen Dosierungen zu beträchtlichen Einbußen in

der Frühfestigkeitsentwicklung führen. Die Festigkeitsminderung geht dabei parallel zur Höhe der Dosierung.

Eine beträchtliche Temperaturabhängigkeit kann am Beispiel des Verzögerers VZ3 beobachtet werden. Während bei kalter Witterung eine bedeutende Frühfestigkeitsminderung gemessen wurde, zeigten beim selben Verzögerer die Ergebnisse von Hagerbach bei 20°C praktisch keine Einbußen in der Frühfestigkeit.

Der Verzögerer VZ1 zeigt hingegen kaum eine Temperaturabhängigkeit in der Festigkeitsentwicklung, sehr wohl aber mit der Höhe der Dosierung.

Gravierend sind die Auswirkungen bei Langzeit-Verzögerern (VZ5 und VZ6). Es ist mit Festigkeitsverlusten bis auf ein Drittel gegenüber Verzögerer-freien Mischungen zu rechnen. Da nützt auch die Erhöhung von Beschleunigerzugaben kaum etwas, wie an den strichlierten Kurven beim Versuch Zams-III zu sehen ist. Hier wurde die EB-Dosierung von 7% auf 10 % erhöht, was zu kaum mehr als 1 N/mm<sup>2</sup> Festigkeitssteigerung reichte.

Es ist aber nicht auszuschließen, dass die beträchtlichen Festigkeitseinbußen zu frühen Zeiten auch der tiefen Temperatur geschuldet sein könnten. Die begrenzte Versuchszeit hat es nicht zugelassen, alle Verzögerer bei 20°C in Hagerbach zu testen.

Die Haltezeit zeigte hingegen kaum Einflüsse auf die Frühfestigkeit, wenn man davon absieht, dass bei den Versuchen mit kalter, feuchter Witterung die Erhöhung des W/B-Wertes auf Grund Kondenswasserbildung zu einer Herabsetzung der Festigkeit führte.

Trotzdem erfüllen mit Ausnahme der Langzeitversuche bei kalter Witterung fast alle Versuche die Frühfestigkeitsklasse J2. In der Praxis sollte also nicht ohne Bedacht auf die Folgen, verzögerter Beton eingesetzt werden. Zumindest sollte die Dosierung nicht über das unbedingt notwendige Maß hinausgehen.

Interessanterweise konnten für den Temperatureinfluss überraschend geringe Differenzen festgestellt werden. Im Mittel war die Frühfestigkeitsentwicklung in Hagerbach bei 20°C gegenüber Zams-III bei 2°C nur um ca. 25 % erhöht.

### 8.3 Pumpenkennwerte und Viskosität (Sliper)

Sowohl bezüglich der Pumpenkennwerte als auch der Viskosität und Filtratwasserabgabe konnten keine signifikanten Unterschiede festgemacht werden. Man kann also guten Gewissens feststellen, dass Verzögerer keinen merkbaren Einfluss auf die Verarbeitbarkeit nach sich ziehen.

Es konnten allerdings im Labor bei hohen Verzögerer-Dosierungen bei zwei Produkten (VZ2 und VZ5) ein leichter bis mäßiger Verflüssigungseffekt gemessen werden, der sich allerdings im Praxisversuch kaum auswirkte.

Es war auch festzustellen, dass manche Verzögerer-Typen (VZ1; VZ3) sich nicht für eine Langzeitverzögerung über 10 Stunden eignen, da hierbei eine deutliche Verminderung des Ausbreitmaßes zu erwarten ist, welches durch weitere Fließmittelzugabe zu korrigieren wäre.

### 8.4 Dauerhaftigkeit

#### 8.4.1 RV-Test

Die Ergebnisse des reduzierten Versinterungspotenzials zeigten mit im Mittel 0,4 kg Ca /to Spritzbeton einen gegenüber den bisherigen 3 Großspritzversuchen mit Werten von im Mittel 0,3-0,4 kg/to einen geringfügig aber nicht signifikant erhöhten Wert. Ein negativer Verzögerer-Einfluss ist daher praktisch auszuschließen.

#### 8.4.2 Wasserundurchlässigkeit

Die Ergebnisse der Wassereindringtiefe gemäß ONR 23202 lagen auch hier im gewohnten Bereich von 6-10 mm, sodass von einem Verzögerer-bedingten Einfluss nicht gesprochen werden kann.

#### 8.4.3 Carbonatisierungstiefe

Carbonatisierungstiefen wurden nur in Zams-III gemessen.

Tab. 7: Karbonatisierungsraten verschiedener Mischungen

Mischung	Beschreibung	Karbonatisierungsrate [mm/√d]	W/B	Bemerkung
M0W	Ref. ohne VZ	1,13	0,49	
M2a	VZ1 hoch 0h	1,02	0,48	
M2b	VZ1 hoch 4h	1,03	0,46	
M4b	VZ5 LZ 15h	1,75	0,54	W/B-Erhöhung durch Kondenswasser
M5b	VZ2 hoch 4h	1,28	0,51	
M7b	VZ3 hoch 4h	1,24	0,52	
M8b	VZ6 LZ 15h	1,93	0,54	W/B-Erhöhung durch Kondenswasser

Ein Einfluss der Carbonatisierungstiefe infolge Verzögerer-Einsatz kann aus den Ergebnissen nicht abgeleitet werden. Die Karbonatisierungsrate korreliert vor allem mit dem W/B-Wert (Bild 7).

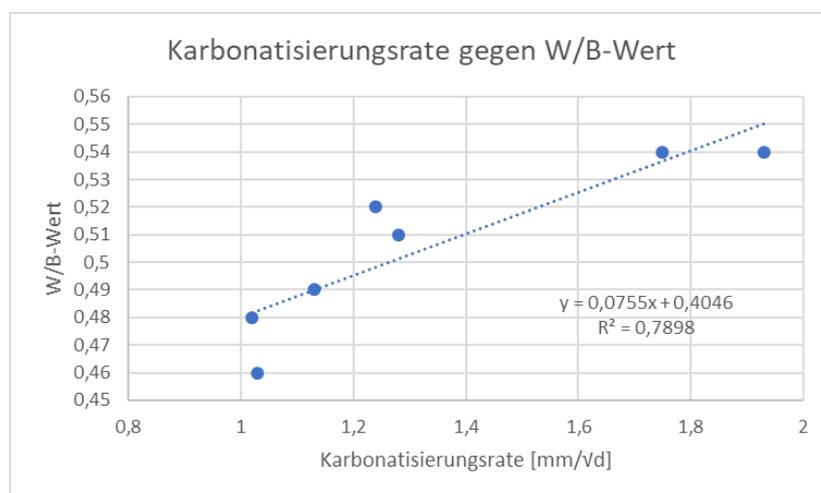


Bild 7: Karbonatisierungsrate in Abhängigkeit vom W/B-Wert

#### 8.4.4 Sulfat/Thaumasit-Beständigkeit

Bis zum Zeitpunkt des Redaktionsschlusses konnten aus den Längenänderungen und Massenzunahmen der in 5 %-iger Natriumsulfat-Lösung gelagerten Proben keine Hinweise auf Schädigungen infolge Verzögerer-Einsatz festgestellt werden (Bilder 8 und 9). Die Lagerungsdauer betrug etwa 140 von den vorgesehenen 150 Tagen.

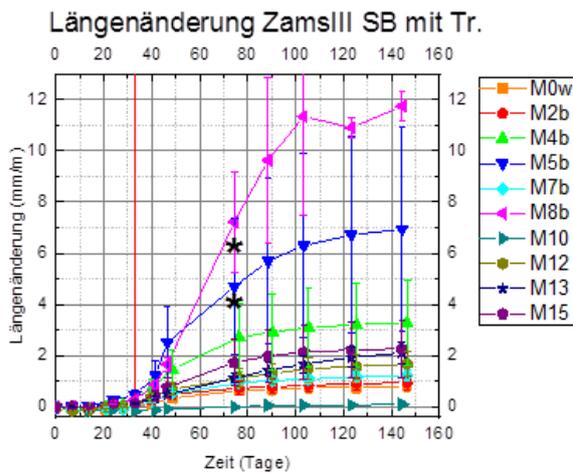


Bild 8a: Längenänderung SB mit EB

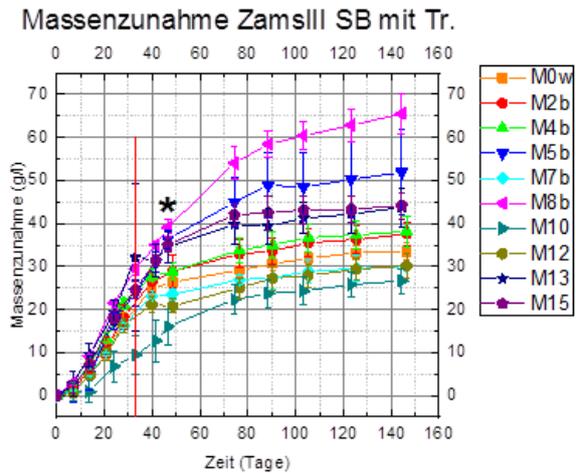


Bild 8b: Massenzunahme SB mit EB

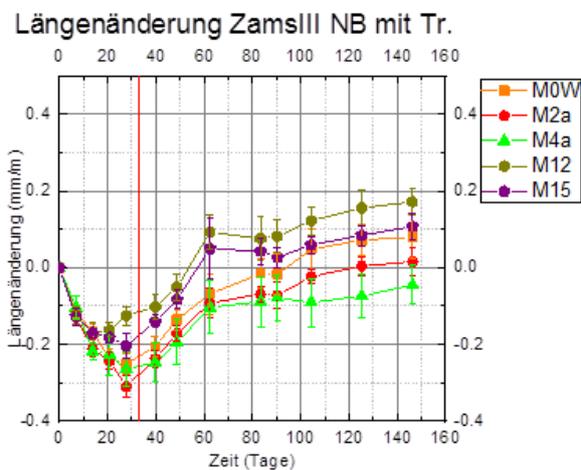


Bild 9a: Längenänderung Null-Beton ohne EB

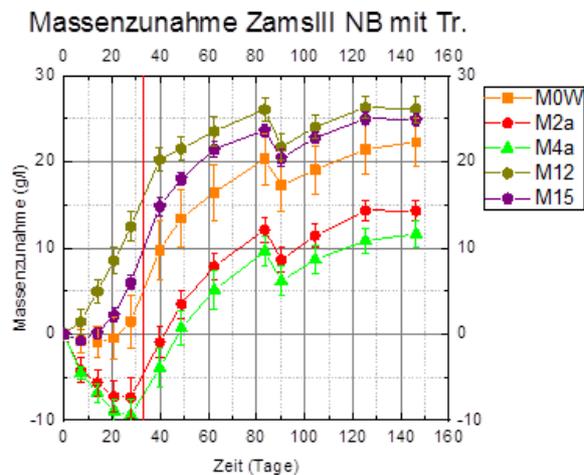


Bild 9b: Massenzunahme Nullbeton ohne EB

Aus den bisherigen Ergebnissen ist abzuleiten, dass eine Beständigkeit gegenüber Sulfat/Thaumasitangriff auf alle Fälle dann vorliegt, wenn die Grenze der Längenänderung bei 1,5 mm/m angesetzt wird. Dem gemäß liegen die Langzeit verzögerten Proben M4b und M8b und die hoch dosierten, wie M4b und M5b außerhalb dieses Bereichs.

Die mäßige Beständigkeit lässt sich aber nicht den Verzögerern zuordnen, wie der Vergleich zu den Nullproben zeigt, die alle trotz Verzögerer-Gehalt ausnahmslos beständig sind.

Bei den niedrig dosierten Verzögerern scheint sich auch bei den beschleunigten Proben keine Auswirkung auf die Sulfat/Thaumasit-Beständigkeit zu manifestieren.

## 9. Diskussion

Von allen Einflüssen, die Verzögerer verursachen können, muss in erster Linie die Beeinträchtigung der Frühfestigkeitsentwicklung im Bereich von 1 bis 24 Stunden beachtet werden. Bei moderater Dosierung zeigt sich entweder keine oder nur eine unwesentliche Absenkung der Frühfestigkeit. Je höher die Dosierung ausfällt, umso mehr macht sich die Festigkeitsminderung bemerkbar.

Eine Erhöhung der Beschleunigerzugabe kann dieses Manko nur zu einem kleinen Teil wieder wettmachen und ist auf Grund der bekannten Nachteile hoher Beschleunigerdosierungen nicht zu empfehlen.

Einzelne Verzögerer-Typen zeigen eine bedeutende Abhängigkeit der Frühfestigkeitsentwicklung von der Außentemperatur. Es gibt aber auch Verzögerer-Typen, die eine solche Abhängigkeit von der Temperatur nicht oder wenig zeigen, dafür aber empfindlich auf Überdosierung sind.

Es sollte in der Praxis also gut überlegt werden, ob und welche Verzögerungsdauer gebraucht und eingestellt wird. Eine prophylaktisch übermäßig lange Verzögerung des Spritzbetons, die für alle Eventualitäten reicht, sollte unbedingt vermieden werden.

Wenn es sich baupraktisch nicht vermeiden lässt, lange Verzögerungszeiten anzuwenden, muss man sich im Klaren sein, gewisse Einbußen an Frühfestigkeitsentwicklung hinnehmen zu müssen. Die Endfestigkeit und auch die Dauerhaftigkeit wird offensichtlich kaum oder gar nicht negativ beeinflusst, sodass in dieser Hinsicht keine Qualitätsminderung zu erwarten ist.

## 10. Ursachen der Festigkeitsminderung durch Verzögerer

Mittels thermischer (Thermoanalyse) und mineralogischer Analyseverfahren (XRD) wurde an Hand von Zementleimproben über die Zeit die Phasenentwicklung beobachtet.

Dabei wurden drei Verzögerer-Typen (VZ3, VZ5 und VZ6) mit Zementleim aus den Versuchen Zams-III und Hagerbach (CEM II/B-M(S,L,Q) 42,5 R) mit einem W/B 0,5 mit den gleichen Verzögerer-Dosierungen wie beim Großversuch angemischt, mit 7% Beschleuniger versetzt und über die Zeit einer Phasenanalyse unterzogen.

Neben  $C_3S$ ,  $C_2S$  und Portlandit wurden auch die Verläufe von Ettringit, Monocarbonat und Hemicarbonat mittels XRD-Rietveld-Verfeinerung bestimmt. Der Portlandit-Verlauf wurde auch mittels Thermoanalyse bestimmt. Die amorphen Anteile konnten unter Zusatz von 10%  $CaF_2$  als innerem Standard nach Westphal [3] ermittelt werden. Die Ergebnisse sind in **Bild 10** dargestellt.

Am Ettringit-Verlauf erkennt man deutlich, dass die Verzögerer-freie Probe zu frühen Zeiten bis 8 Stunden um bis zu 40 % mehr Ettringit bildet als die verzögerten Proben. Der Verlauf des amorphen Anteils (zur Hauptsache CSH-Phasen), der zu Beginn höher ausfällt, zeigt in die selbe Richtung. Dies ist wohl die Erklärungen dafür, dass die verzögerten Proben weniger Frühfestigkeit ausbilden.

Noch eine Auffälligkeit war zu beobachten, die die Entwicklung von Portlandit ( $Ca(OH)_2$ ) betrifft. Nach etwa zwei Tagen weicht die Portlandit-Bildung der Nullprobe deutlich von jener der verzögerten Proben ab, sie wird geringer. Da jedoch der  $C_3S$ -Verbrauch, der üblicherweise direkt mit der Portlandit-Bildung korreliert, unauffällig ist, muss davon ausgegangen werden, dass das im Bindemittel enthaltene Metakaolin ohne Verzögerer besser wirkt und mehr Portlandit bindet. Warum zu ganz frühen Zeiten der Verlauf von Portlandit zwischen Thermoanalyse und Rietveld-Verfeinerung zwar in der gleichen Größenordnung, aber nicht parallel verläuft, konnte nicht zufriedenstellend ermittelt werden. Es lag wohl an der Unsicherheit der Analyseverfahren, was die absolute Höhe betrifft.

Die verzögerten Proben bilden bis auf VZ3 etwas mehr Hemicarbonat als die Null-Probe. Der Einbau von Feinstcalcit scheint durch die Verzögerer-Wirkung begünstigt zu sein. Was das für Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit des Spritzbeton hat, kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt nicht gesagt werden.



Bild 10: Phasenentwicklung an beschleunigtem Zementleim mit und ohne Verzögerer.

Beim Monocarbonat sticht ebenfalls der Verzögerer VZ3 etwas heraus, indem diese Proben um ein Drittel mehr bildet als die übrigen Proben.

## 11. Dank

Diese Untersuchung als Teil des Forschungsprogramms zur Entwicklung neuer dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone (FFG-ÖBV-Forschungsprojekt Advanced and Sustainable Sprayed Concrete ASSpC) wurde durch großzügige Förderung der FFG (Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft) gemeinsam mit den Industriepartnern ermöglicht. Dafür sei unser ergebenster Dank ausgesprochen.

## 12. Literatur

- [1] Rickert, J.:  
Einfluss von Verzögerern auf die Hydratation von Klinker und Zement. Influence of retarders on the hydration of clinker and cement. In: Thielen, G. (Hrsg.) VDZ Betontechnische Berichte 2001-2003, 71ff. Düsseldorf.
- [2] Röck, R.:  
Zwischenbericht Projekt ASSpC zur Wirkung von Verzögerer 28.11.2019.
- [3] Westphal, T.:  
Quantitative Rietveld-Analyse von amorphen Materialien. Dissertation;  
Universität Halle-Wittenberg, 2007.

## 13. Zu den Autoren

Dr. phil. Rudolf Röck  
Studium Chemie und Physik an der Universität Innsbruck; Leiter F&E im Zementwerk Schretter&Cie;  
Postdoc UNI Ibk Institut f. Konstruktion und Materialwissenschaften  
[rudolf.roeck@uibk.ac.at](mailto:rudolf.roeck@uibk.ac.at)

Dr. phil. Andreas Saxer  
Studium Physik an der Universität Wien und Innsbruck, Assistenzprofessor am Institut für Konstruktion und Materialwissenschaften UNI Innsbruck  
[andreas.saxer@uibk.ac.at](mailto:andreas.saxer@uibk.ac.at)

Dipl.-Ing. Dr. techn. Joachim Juhart  
Senior scientist – AG mineralische Baustoffe/Betontechnologie, Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit TVFA Technische Universität Graz  
[joachim.juhart@tugraz.at](mailto:joachim.juhart@tugraz.at)

Dipl.-Ing. Lukas Briendl  
Studium der Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz, seit 2018  
Universitätsassistent am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit TVFA der TU Graz  
[lukas.briendl@tugraz.at](mailto:lukas.briendl@tugraz.at)

MSc Marlene Sakoparnig  
Studium der Erdwissenschaften an der Karl Franzens Universität Graz, seit 2017 Projektassistentin am  
Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz  
[m.sakoparnig@tugraz.at](mailto:m.sakoparnig@tugraz.at)

Dr. rer. nat. Florian Mittermayr  
Studium der Geowissenschaften an der Universität Innsbruck, Doktorat an der TU Graz am Institut für  
Angewandte Geowissenschaften, seit 2013 am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der  
TU Graz  
[f.mittermayr@tugraz.at](mailto:f.mittermayr@tugraz.at)

Dr. Isabel Galan

Studium Physik und Materialwissenschaften, Doktorat an der Universität Complutense Madrid, Spanien, seit 2017 Postdoc am Institut für Angewandte Geowissenschaften an der TU Graz

[igalangarcia@tugraz.at](mailto:igalangarcia@tugraz.at)

MSc Florian Roman Steindl

Studium der Erdwissenschaften (Mineralogie und Kristallographie) an der Universität Wien, seit 2017 Doktoratsstudent und Universitätsprojektassistent an der TU Graz

[florian.steindl@tugraz.at](mailto:florian.steindl@tugraz.at)

Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Wolfgang Kusterle Studium an der Universität Innsbruck, Mitarbeit im Ingenieurbüro (Brückenbau), Dozent an der Universität Innsbruck. Beratungstätigkeit für Spritzbeton, Baustoffe im Tunnelbau, Betoninstandsetzung, Faserbetone, Brandschutz im Tunnelbau und Betontechnologie. 2001 bis 2020 Prof. für Baustoffkunde an der OTH-Regensburg

[wolfgang@kusterle.net](mailto:wolfgang@kusterle.net)

#### 14. Anhang-1 Am Versuch beteiligte Personen



*Bild 11a: Teilnehmer am Spritzversuch Zams-III*



*Bild 11b: Teilnehmer am Spritzversuch Hagerbach*

## 15. Anhang-2: Prismen - Methode für beschleunigte Mörtel

### Methode zur Bestimmung der Festigkeitsentwicklung beschleunigter Mörtel

**Prinzip:** Herstellung von 4x4x16 cm Prismen in einem angepassten Verfahren und Prüfung der BZ/DF nach vorgegebenen Prüfterminen.

#### Rezeptur des Mörtels:

Material	Masse [g]	Bemerkung
Sand 0-4 mm	1200	Gesteinskörnung wie für Spritzbeton vorgesehen
Summe Bindemittel	600	Kein k-Wertkonzept anwenden!
Wasser	300	Falls gewünscht auch andere Menge
Fließmittel nach Wunsch	3,0 – 6,0	Sollbereich ABM: 25-30 cm Hägermann Tisch
Verzögerer		Für gewünschte Verzögerung falls erforderlich
Beschleuniger	36	Falls gewünscht auch andere Menge

#### Vorgangsweise zur Herstellung des Mörtels und der Prismen:

Der Wasseranteil der Zusatzmittel Fließmittel und Verzögerer werden auf den W/B-Wert angerechnet. Der Wasseranteil der Beschleuniger wird hingegen **nicht** dem Wasseranteil hinzugerechnet, zumal das bei der Herstellung von Spritzbeton ebenfalls nicht geschieht.

Als Bindemittel gelten alle Bestandteile, die als Bestandteile von AHWZ gem. ÖNORM-B 3309 oder als Zumahlstoff für Zement nach ÖNORM-EN 197-1 zulässig sind.

#### Erforderliche Geräte:

- Mörtelmischer gemäß ÖNORM-EN 196-1 mit Mischerschale und Mischpaddel.
- Schaber aus Metall oder Kunststoff, der der Krümmung der Mischerschale angepasst ist, sodass ein Zusammenkratzen und Herausheben des Mörtels vorteilhaft ermöglicht wird.
- Geeignete Rutsche, die so geformt ist, dass alle Trockenkomponenten darin Platz finden und in den laufenden Mischer zugeführt werden können. Alternativ ist auch ein aufgesetzter Trockenguttrichter zulässig.
- Rütteltisch gemäß ÖNORM-EN 196-1 oder Vergleichbares (z.B. Rütteltisch für Betonwürfel gem. ONR 23303)
- Prismenformen gemäß ÖNORM-EN 196-1, die vor Gebrauch mit geeignetem Schalöl oder Rüböl satt mit einem Pinsel eingestrichen werden, ohne dabei Ansammlungen von Öl am Formenboden zu verursachen.
- Lineal 30 bis 50 cm lang aus Stahl zum Abziehen.

#### Mörtelherstellung:

- Ausgangsstoffe im Normklima vorlagern.
- Positionierung der notwendigen Gerätschaften in der Weise, dass ein schneller Arbeitsablauf möglich ist.
- Wasser gemeinsam mit Fließmittel in die Mischerschale vorlegen.

- Trockenkomponenten (Sand, Zement, AHWZ, Füller etc.) mittels einer geeigneten Rutsche in den mit niedriger Stufe laufenden Mischer zugeben und 2 Minuten im Schnellgang mischen.
- Mörtel mit dem Schaber zusammenkratzen und darauf achten, dass keine Anbackungen an der Schalenwand verbleiben und weitere 30 Sekunden im Schnellgang mischen.
  - Falls Verzögerer eingesetzt werden, eine Wartezeit von mindestens 5 Minuten einhalten, dann den Verzögerer zugeben und weitere 30 Sekunden im Schnellgang mischen.
- Beschleuniger in einem Guss dem im Schnellgang laufenden Mischer zugeben und 15 Sekunden mischen.
- Unmittelbar nach Mischende Mischer abstellen und sofort Mischerschale abheben und mittels Schaber die auf dem eingeschalteten Rütteltisch vorbereiteten Prismenformen in mindestens zwei Schichten füllen, verdichten und sofort danach mit Lineal abziehen. Die Gesamtdauer des Vorgangs Mischen, Einfüllen, Verdichten und Abziehen soll 40 Sekunden nicht überschreiten.
- Lagerung der Prismenformen bis zur Prüfung der Frühfestigkeit (1-6 Stunden) im Feuchtlager bei 20 +/- 1,5°C und >90% rel. LF.

#### **Ausschalen und weitere Behandlung der Prismen:**

- Das Ausschalen der Prismen ist je nach Bindemittel frühestens nach einer Stunde möglich, in fast allen Fällen aber nach 5 Stunden, sodass in jedem Fall eine Frühfestigkeitsbestimmung nach 6 Stunden möglich ist.
- Prismen mit Verdichtungsfehlern oder stark reduzierter Frischmörteldichte sind zu verwerfen.
- Die ausgeschalteten Prismen werden beschriftet, gewogen und auf Biegezug- und Druckfestigkeit nach EN 196-1 geprüft. Die Prismen, die für spätere Prüftermine (24h, 28d) vorgesehen sind, werden bis zur Prüfung im Wasser bei 20 +/- 1,5°C gelagert.
- Pro Prüftermin sind mindestens zwei, besser jedoch drei Prismen vorzusehen. Die 2-3 Prismen sind dabei nach Möglichkeit jeweils aus verschiedenen Prismenformen zu entnehmen.