
TECHNISCHE UND WIRTSCHAFTLICHE BEWERTUNG VON MODIFIZIERTEM SPRITZBETON IM TUNNELBAU

TECHNICAL AND ECONOMICAL TESTING OF MODIFIED SHOTCRETE IN TUNNEL CONSTRUCTION

Dr. Erik **Iglesias** und Dipl.-Ing. Volker **Wetzig**,
VersuchsStollen Hagerbach AG, Flums, Schweiz
Dr. Jürgen **Bezler** und Dipl.-Ing.(FH) Mareike **Xia**,
Wacker Polymer Systems GmbH & Co. KG, Burghausen, Deutschland

Rückprall ist ein wesentlicher Einflussfaktor zur Beurteilung der Qualität und des Leistungsvermögens einer Spritzbetonbaustelle. Der Rückprall verändert die Eigenschaften des Spritzbetons und muss entsorgt werden. Somit ist die Verringerung des Rückpralls sowohl ein technologisches als auch ein wirtschaftliches Ziel.

Ausgehend von langjährigen Erfahrungen mit Zusatzstoffen in Mörtelanwendungen wurden verschiedene Zusatzmittelsysteme für Anwendungen im Spritzbeton entwickelt und in umfangreichen 1:1-maßstäblichen Prüfungen untersucht. Die Erwartungen bezüglich Rückprallminderung konnten in den Untersuchungen vollumfänglich bestätigt werden. Der neu entwickelte Zusatzstoff wirkt zugleich verzögernd und verleiht dem Beton positive Zusatzeigenschaften. Parallel zu den technischen Untersuchungen wurden die wirtschaftlichen Auswirkungen dieses Zusatzstoffs auf den Spritzbetoneinsatz untersucht. Die Eigenschaften des zusätzlichen Zusatzstoffs im Spritzbeton erfüllen selbst hohe Anforderungen wie die der J2 Kurve.

Rebound is an important influencing factor for the quality of sprayed concrete and the efficiency of a construction site. Rebound modifies the characteristics of the shotcrete and has to be disposed. Therefore it is a technological and economical target to reduce the amount of rebound.

Based on many years of experiences with components for mortar application, different additions for the use in sprayed concrete were developed and tested in extensive full size trials. The reduction of the rebound during these trials exceeds all expectations. The new addition retards the setting of the concrete and adds other positive features to the concrete. Simultaneously to the technical investigation, the economical effect of the addition used in sprayed concrete was analyzed. The new addition fulfils highest requirements like the J2- early strength requirements.

1. Einleitung und Zielsetzung

Der in dieser Untersuchung zu betrachtende Zusatzstoff-Typ wird derzeit in vielen Anwendungen der Bauchemie verwendet. Da dieser Zusatzstoff die Adhäsion und die Thixotropie steigert, bestand Interesse, die Reaktionen dieses Zusatzmittels in Spritzbeton zu untersuchen. Erwartet wurde ein Einfluss auf den Rückprall des Spritzbetons.

Primäres Ziel der Untersuchung war somit die Festlegung desjenigen Zugabeanteils vom Zusatzstoff zu Spritzbetongemischen, bei denen die Rückprallquote reduziert wird und der Beton gleichzeitig die relevanten Betoneigenschaften erfüllt.

Die Untersuchungen beschränkten sich auf Nassspritzbeton. Für die laufende Untersuchung wurde eine relative Verbesserung der Rückprallquote eines Referenzbetons um 50 % postuliert.

Im Rahmen der Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen wurde die Bedeutung des Zusatzstoffs beleuchtet.

2. Versuchsplanung

2.1 Vorgehensweise

Für die Untersuchungsreihe wurde folgende schrittweise Vorgehensweise beschlossen:

1. Entwicklungsversuche
2. Anwendungsversuche
3. Wirtschaftlichkeitsuntersuchung auf Basis der Resultate aus den vorangegangenen Prüfungen

In den Entwicklungsversuchen wurden auf standardisierten Prüfflächen unterschiedliche Betonrezepturen appliziert, um die Effekte auf die Eigenschaften des Spritzbetons herauszuarbeiten. Mittels statistischer Versuchsplanung wurde eine Versuchsreihe untersucht, um aufgrund der gewonnenen Kennwerte Entscheidungen für die weitere Vorgehensweise zu treffen. Somit ergab sich der in Tab. 1 wiedergegebene Versuchsaufwand. Je Versuch wurden 2-3 m³ Beton gefertigt. Zur Sicherstellung eines homogenen Gemischs wurde nur der „Mittelstrahl“ verwendet. Durch die Bestimmung der Frühfestigkeit konnte eine Tendenzaussage bezüglich der mechanischen Festigkeit des Betons getroffen werden. Somit verkürzte sich die Zeit bis zu einer ersten Aussage.

Tab. 1: Geplanter Versuchsaufwand

	Anzahl Versuche	Anzahl Versuchsreihen	Bemerkung
Entwicklungsversuch	1	1	Festlegung der Referenzkennwerte
	5	2	Minimierung Rückprall
Anwendungsversuch	1	2	Zusatzstoffvarianten

In den Anwendungsuntersuchungen auf Realgestein sollte die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse der Entwicklungsversuche im Pilotfall dargestellt werden.

Alle Versuche erfolgten stets gegen einen Referenzbeton („0-Mischung“), der ohne Zusatzstoff hergestellt wurde. Bei Abweichungen in diesem Grundbeton musste die Rezeptur geändert werden. Die Versuche begannen mit dem Referenzbeton.

Die abschließende Wirtschaftlichkeitsuntersuchung auf Basis der betontechnologischen Untersuchungen zeigt das ökonomische Potential des modifizierten Betons auf.

2.2 Versuchsort

Die Entwicklungsversuche wurden in einem Seitenstollen des Brandstollens und die Anwendungsversuche wurden im Autobahnprofil des Versuchsstollens Hagerbach durchgeführt (Bild 1). Im Versuchsbereich herrschten konstante klimatische Bedingungen von etwa 16 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von etwa 85 % RF.

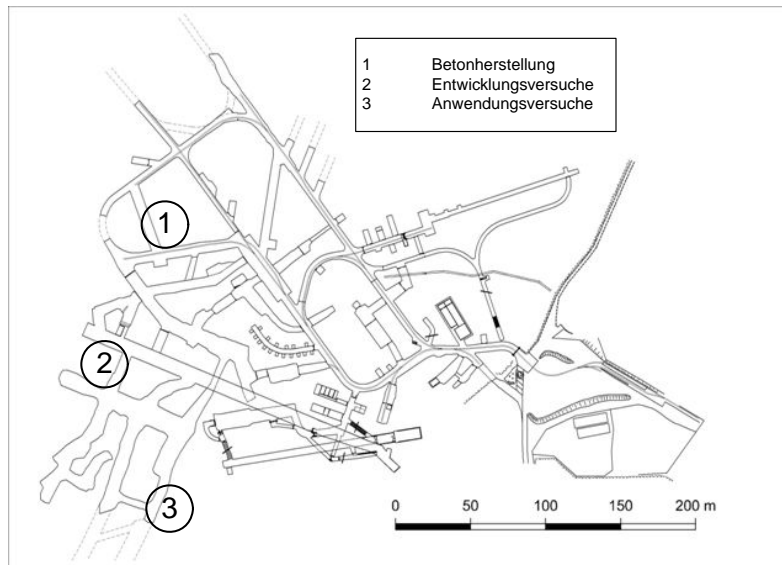


Bild 1: Versuchsstollen Hagerbach mit den Arbeitsorten.

2.3 Versuchsgeräte

Die Herstellung des Betons erfolgte auf einer Betonmischanlage im Baustellenmaßstab. Die Betonbestandteile wurden in einem Ringtrommischer in Chargen à 1 m³ hergestellt. Alle Versuchsparameter wurden in einem Mischungsprotokoll erfasst.

Anschließend wurde der fertige Beton mit einem Fahrmischer mit Trommelmischer zum Versuchsfeld gefahren. Der Fahrmischer hat ein Fassungsvermögen von 3 m³ und die Drehzahl ist stufenlos regelbar.

Zur Applikation des Betons wurde eine Betonpumpe zur/zum Förderung, Pumpen und Spritzen von Nassbeton verwendet. Diese Pumpe erlaubt ein pulsfreies und gleichmäßiges Spritzen.

Für die Applikation des Spritzbetons wurde ein Teleskop-Spritzarm eingesetzt. Die Steuerung der Roboterdüse erfolgt mittels einer elektrischen Fernbedienung.

3. Entwicklungsversuch Ablauf und Ergebnisse

3.1 Einleitung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Entwicklungsversuche wiedergegeben und interpretiert. Den Schwerpunkt bilden die Kernaussagen bezüglich des Rückpralls und der Festigkeitsentwicklung. Gegebenenfalls werden zur Diskussion der Ergebnisse die Erkenntnisse weiterer Prüfungen hinzugezogen.

In den Bildern und Tabellen wird folgende Nomenklatur verwendet:

FLZ -FMVZ - 2.5 - 1

Zuerst steht der verwendete Zusatzstoff, also FLZ für den flüssigen Zusatzstoff und FSZ für den festen Zusatzstoff, dann folgt das verwendete Fließmittel, also FMVZ für ein Fließmittel mit verzögernder Wirkung und FM für ein Fließmittel, danach folgt als erste Ziffer der Zusatzstoffanteil vom Zementgehalt in Prozent und zum Schluss der Fließmittelanteil in Prozent.

3.2 Ausgangsstoffe und Rezeptur

Für die Versuche wurden folgende Zemente, Zusatzstoffe und -mittel verwendet (Tab. 2):

Tab. 2: Ausgangsstoffe für Entwicklungsversuche

Stoff	Typ	Bezeichnung
Zement	CEM I 52,5 R	CEM A
Gesteinskörnung	0/1	
	1/4	
	4/8	
Zusatzmittel	Beschleuniger	SBE
	Fließmittel	FMVZ
		FM
	Zusatzstoff	fest FSZ
		flüssig FLZ

Aufgrund vorangegangener Laborversuche wurde ein CEM I 52,5 R verwendet, um die Vergleichbarkeit mit diesen Versuchen zu gewährleisten.

Der gelieferte Zement hatte folgende Phasenzusammensetzung (Tab. 3):

Tab. 3: Phasenzusammensetzung des CEM I 52,5 R

Zementphase	Anteil im CEM I 52,5 R [%]
C ₃ S	68,6
C ₂ S	8,0
C ₃ A kubisch	3,6
C ₃ A orthorhombisch	1,6
C ₄ AF	11,3
freies CaO	0,5

Auffallend ist der hohe Anteil von Tricalciumsilikat, (C₃S), welcher eine schnelle Aushärtungscharakteristik des Zements erwarten lässt [2].

In den Entwicklungsversuchen wurden je 5 Rezepturen mit unterschiedlichem Zusatzstoff- und Fließmittelanteil definiert. Die Grundrezeptur bestand aus:

- 450 kg/m³ Zement
- 7 % Sand 0/1
- 58 % Sand 1/4
- 35 % Gestein 4/8
- w/z = 0,48

Der feste Zusatzstoffanteil und das Fließmittel wurden gemäß Tab. 4 variiert:

Tab. 4: Variation des festen Zusatzstoff- und des Fließmittelanteils FMVZ

Zusatzstoff fest [% von Zement]	FMVZ [% von Zement]
2,5	1,00
3,5	0,87
5,0	0,50
7,5	0,33
10,0	0,00

Die Variation des Feststoffanteils und des Fließmittels FMVZ kann Tab. 5 entnommen werden:

Tab. 5: Variation des festen Zusatzstoff- und des Fließmittelanteils des FMVZ

Zusatzstoff fest [% von Zement]	FMVZ [% von Zement]
1,7	0,83
2,5	1,00
3,3	1,17
4,2	1,33
5,0	1,50

In den Laborversuchen wurde ein Fließmittel ohne verzögernde Wirkung verwendet. Um dessen Verhalten mit den Zusatzstoffvarianten zu untersuchen, wurden zusätzliche Stichversuche mit diesem Fließmittel vereinbart (Tab. 6 und Tab. 7).

Tab. 6: Variation von flüssigem Zusatzstoff und Fließmittel FM

Zusatzstoff flüssig [% von Zement]	FM [% von Zement]
7,50	0,33
2,50	1,00

Tab. 7: Variation von festem Zusatzstoff und Fließmittel FM

Zusatzstoff fest [% von Zement]	FM [% von Zement]
5,00	1,50
1,70	0,83

3.3 Betonherstellung mit dem flüssigen Zusatzstoff

Um das Verhalten des flüssigen Zusatzstoffs kennen zu lernen, wurde zuerst die maximale Zusatzstoffdosierung von 10 % Zusatzstoff vom Zementgehalt gewählt.

Die Reihenfolge der Komponentenzugabe erfolgte wie bei bisherigen Spritzbetonversuchen:

1. Mischen aller „trockenen“ Komponenten:
 - a. Gesteinskörnung, wenn optisch homogen, dann
 - b. Zement
2. Zugabe aller Flüssigkeiten:
 - a. erst Wasser und Fließmittel in einem Tank mischen, dann
 - b. Wasser/Fließmittel-Lösung zu den festen Stoffen, und dann
 - c. der flüssige Zusatzstoff per Handzugabe

Bei Zugabe des flüssigen Zusatzstoffs konnte ein Ansteigen der Leistungsaufnahme des Mixers beobachtet werden. Nach einer stetigen Zunahme, sank die Leistungsaufnahme. Wenn der Zielwert der Leistungsaufnahme nicht erreicht wurde, wurde Wasser zudosiert.

Der Mischprozess mit dem flüssigen Zusatzstoff zeigte keine Abweichungen von den bisherigen Verarbeitungsmethoden im VersuchsStollen Hagerbach. Die Mischzeiten wichen nicht von denen anderer Betone ab.

Sobald die Betonmischung optisch homogen war, wurde der Beton in den Fahrmischer abgelassen.

3.4 Verarbeitung des festen Zusatzstoffs

Gemäß den Erfahrungen bei der Verarbeitung des flüssigen Zusatzstoffs wurde im ersten Schritt eine analoge Vorgehensweise gewählt:

1. Mischen aller „trockenen“ Komponenten, Zement, Gesteinskörnung und fester Zusatzstoff, wenn optisch homogen, dann
2. Zugabe aller Flüssigkeiten, hier Wasser und Fließmittel

Dabei wurde beobachtet, dass der feste Zusatzstoff bei Kontakt mit der erdfeuchten Gesteinskörnung spontan verklumpt. Das dann zugegebene Wasser und Fließmittel löste die Brocken nicht auf. Auf diesem Weg ließ sich kein homogener Beton herstellen.

Daher wurde als zweiter Weg folgende Mischreihenfolge gewählt:

1. Mischen von Zement und Gesteinskörnung, mindestens 10 s bis optisch homogen,
2. Lösen von Fließmittel und Wasser in einem Tank, dann
3. Zugabe von Wasser und Fließmittel zu den Feststoffen, mindestens 3 min (Erfahrungswert bis Fließmittel mit Zement vollständig reagiert hat) bis optisch homogen und Leistungsaufnahme konstant im Bereich von 34 A bis 38 A, und schließlich
4. Zugabe von festem Zusatzstoff, Mischzeit ca. 3 min bis optisch homogen und Leistungsaufnahme konstant im Bereich von 34 A bis 38 A; ggf. kontrollierte Zugabe von Wasser

Auf diesem Weg konnte ein homogener und spritzfähiger Beton hergestellt werden.

4. Betonapplikation

Unmittelbar nach der Betonherstellung wurde die Mischung auf eine standardisierte Platte appliziert. Gegen eine Referenzmischung sollten die Effekte des Zusatzstoffs auf die Beton-eigenschaften unter realitätsnahen Bedingungen herausgearbeitet werden. Der Fokus lag auf der Festigkeitsentwicklung und dem Rückprall bezogen auf eine Referenzmischung ohne Additivzusatz.

Die erste applizierte Additivmischung war die Mischung FLZ-FMVZ-10-1. Um einen Einfluss des Fließmittels herauszufinden, wurde eine weitere Mischung mit der Zusammensetzung FLZ-FMVZ-10-0, also ohne Fließmittel, hergestellt.

Nach dem Auftragen des Spritzbetons wurden die Platten gewogen. Aus der Differenz zum ursprünglichen Gewicht der Platten ergibt sich die tatsächlich applizierte Masse.

Zur Vergleichbarkeit der Wiegewerte wird der Kennwert des relativen Rückpralls eingeführt:

$$RP_{rel.} = \frac{\frac{m_{gew}}{m_{Platte\ nachher} - m_{Platte\ vorher}}}{\frac{m_{gew,0}}{m_{Platte\ nachher,0} - m_{Platte\ vorher,0}}} \times 100$$

$RP_{rel.}$:= rel. Rückprall der 0 - Mischung [%]
 m_{gew} := Rückprall [kg]
 m_{Platte} := Masse der Platte [kg]
 Indizes : nachher/vorher nach bzw. vor dem Spritzversuch
 0 = Referenzmischung

5. Ergebnisse und Diskussion der Entwicklungsversuche

5.1 Einleitung

In dieser Versuchsreihe sollten die Effekte des Zusatzstoffs auf die Betoneigenschaften gegen eine marktnahe, willkürlich gewählte Referenzmischung unter realitätsnahen Bedingungen herausgearbeitet werden.

5.2 Effekt des Zusatzstoffs auf den Rückprall

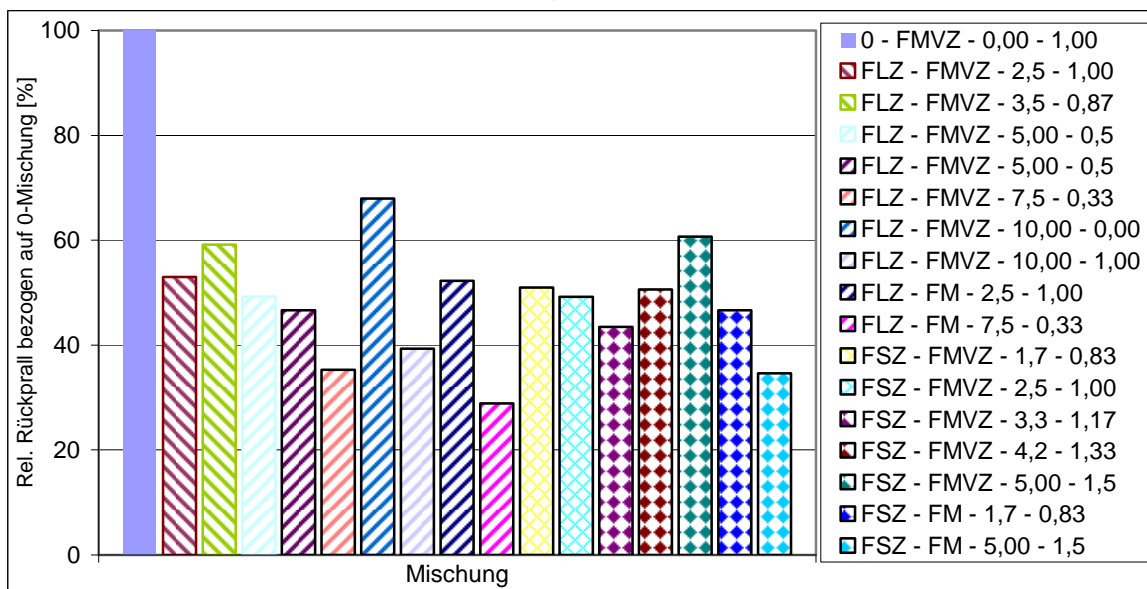


Bild 2: Relativer Rückprall bezogen auf 0-Mischungen

Die Zugabe des Zusatzstoffs, egal in welcher Variation, reduziert den Rückprall. Beide modifizierten Betone zeigen mit wachsendem Zusatzstoffgehalt einen sinkenden Rückprall bis zu einem Minimum, um dann wieder zu steigen. Den geringsten relativen Rückprall erreicht die Mischung FLZ-FM mit einem um 71 % reduzierten Rückprall gegenüber der 0-Mischung. Zwischen dem Zusatzstoff und Fließmittel existieren Wechselwirkungen, die auch den Rückprall beeinflussen. So zeigen alle Betone mit dem Fließmittel FM einen geringeren Rückprall als die Betone mit dem Fließmittel FMVZ (Bild 3).

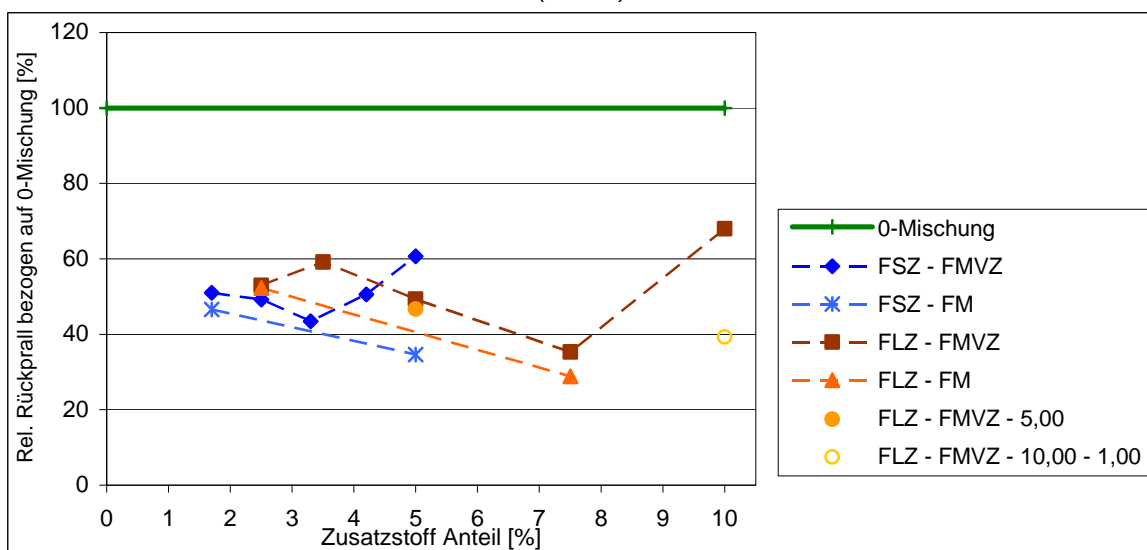


Bild 3: Relativer Rückprall versus Zusatzstoffgehalt

5.3 Effekt des Zusatzstoffs auf die Festigkeitsentwicklung

In Bild 4 sind die Festigkeitsverläufe der zusatzstoffmodifizierten Betone und des Referenzbetons wiedergegeben. Die Referenzmischung zeigt über den gesamten Messzeitraum der Frühfestigkeit einen konstanten Verlauf. Zur Orientierung ist die J1 und die J2 Kurve eingezeichnet [1]. Die Erreichung dieser Festigkeitsanforderung war nicht Ziel der Auswahl der Referenzmischung, weil keine Festigkeitsanforderung definiert wurde. Anpassungen an die Festigkeit erfolgen üblicherweise auf der Baustelle durch Parametervariation wie beispielsweise Veränderung des Beschleunigeranteils oder -typs.

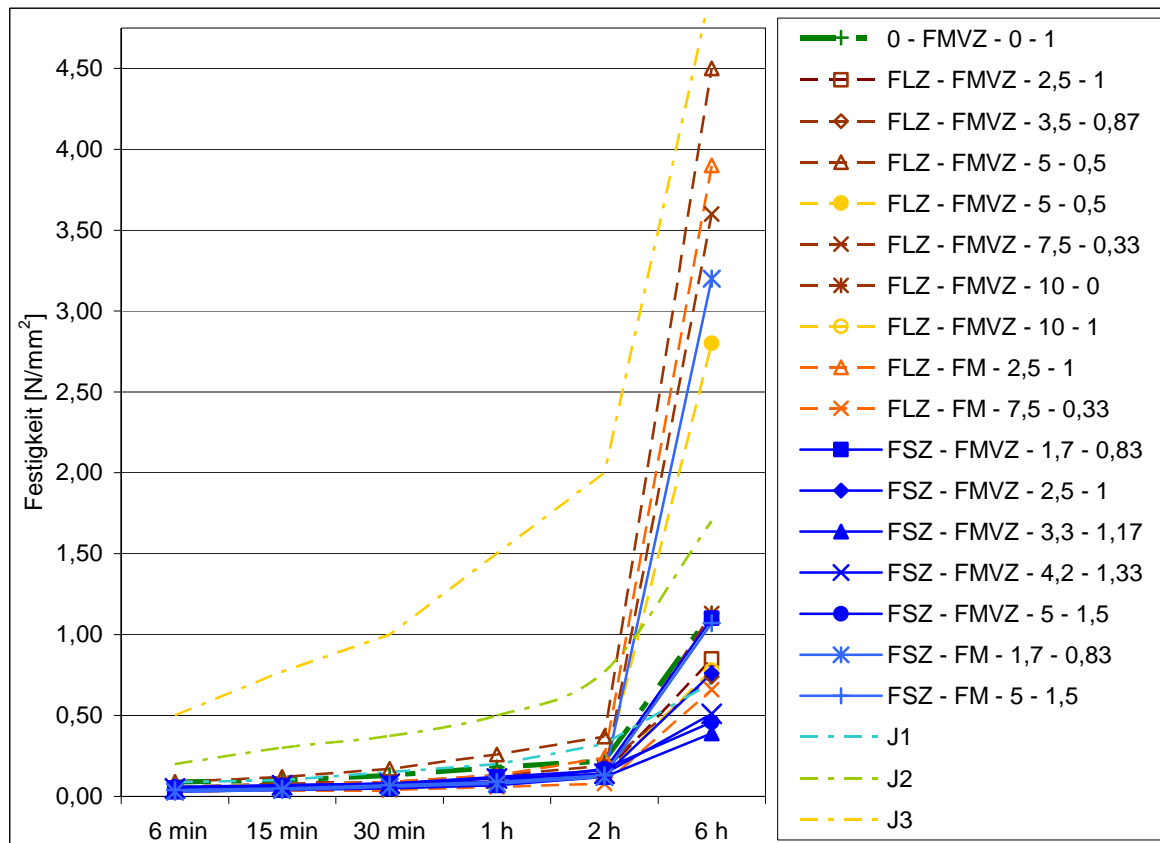


Bild 4: Vergleich Frühfestigkeitsentwicklung mit J-Kurven

Die durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass während den ersten zwei Stunden die Mischung mit 5% flüssigem Zusatzstoff vom Zementgehalt und 0,5 % FMVZ vom Zementgehalt über der Festigkeitsentwicklung der Referenzmischung lag.

Innerhalb der ersten Stunde liegen alle anderen Mischungen unterhalb der Festigkeitsentwicklung der Referenzmischung. Nach einer Stunde springt die Festigkeit der Mischung FLZ-FM-2.5-1 über die Festigkeit der Referenzmischung.

Nach 2 h zeigen folgende Mischungen einen sprunghaften Festigkeitsanstieg, weit über dem Festigkeitsniveau der Referenzmischung:

1. Beide Betone mit 5 % festem Zusatzstoff vom Zementgehalt und 0,5 % FMVZ vom Zementgehalt
2. FLZ-FMVZ-7,5-0,33
3. FLZ-FM-2,5-1 und
4. FSZ-FM-1,7-0,33

Nach 6 h lagen alle oben erwähnten Mischungen über der Festigkeit der Referenzmischung und im Bereich zwischen J2 und J3. Somit zeigt sich in Entwicklungsversuchen die Tendenz zur Erfüllung dieser anspruchsvollen ÖVBB Richtlinie bei gleichzeitig vorsichtiger Dosierung des Beschleunigers. Die Dosierung lag mit 5 % Beschleuniger am unteren Dosierbereich.

5.4 Zusammenfassung der Entwicklungsversuche

In den Entwicklungsversuchen konnte aufgezeigt werden, dass der Zusatzstoff den Rückprall signifikant mindert. Durch den Rückprall verliert der Spritzbeton Gesteinskörnung, und damit steigt der Zementgehalt des applizierten Spritzbetons. Mit wachsendem Zementgehalt des Betons steigt im Allgemeinen die Festigkeit. Daher ist in der Regel mit steigendem Rückprall mit steigender Endfestigkeit zu rechnen. Diese Erwartung wird tendenziell erfüllt (Bild 5).

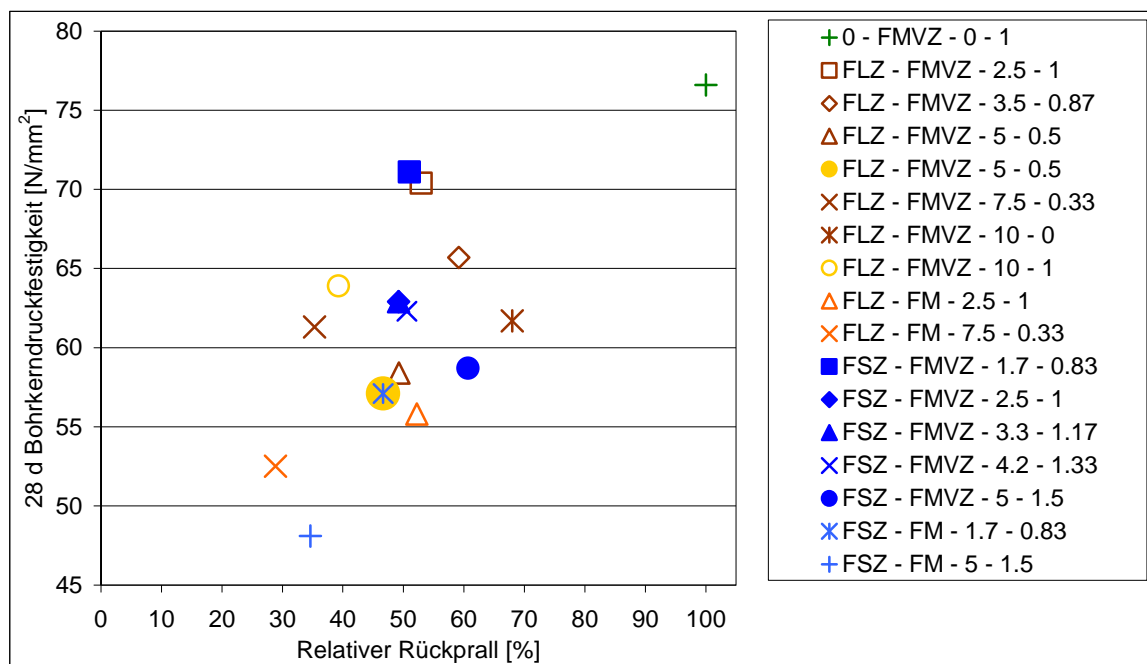


Bild 5: 28 d Bohrkerndruckfestigkeiten als Funktion des Rückpralls

In diesem Zusammenhang wird deutlich, dass die mit Fest- und Flüssigzusatzstoff modifizierten Mischungen mit höchstem Zusatzstoffanteil und reinem Fließmittel den geringsten Rückprall und damit auch erwartungsgemäß die geringste Festigkeit aufweisen.

In den Entwicklungsversuchen zeigte sich vom Festigkeitsverlauf die Mischung mit 5 % festem Zusatzstoff am günstigsten. Diese Mischung ließ sich am längsten verarbeiten und wies ein ähnliches oder besseres Anfangsausbreitmaß als die Referenzmischung auf. Bei den Rückprallwerten erfüllte diese Mischung das Ziel den Rückprall gegenüber der Referenzmischung zu halbieren. Die mit flüssigem Zusatzstoff modifizierten Betone waren am günstigsten zu verarbeiten.

Daher wurden die Anwendungsversuche mit der Mischung FLZ-FMVZ-5-0.5 durchgeführt.

6. Anwendungsversuch

6.1 Einleitung

In der nun folgenden Phase der Anwendungsuntersuchungen sollte die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse unter den bisherigen Randbedingungen im Pilotfall dargestellt werden. In

dieser Versuchsreihe sollte einerseits das Optimierungspotential der Festigkeitswerte und die Übertragbarkeit auf einen Standardbeton gezeigt werden.

6.2 Versuchsablauf

Es wurden 2 Spritzversuche mit 5 % festem Zusatzstoff vom Zementgehalt und 0,5 % FMVZ vom Zementgehalt, einmal mit Zement CEM I 52,5 R und einmal mit Zement CEM I 42,5 N durchgeführt. Auf je einem Versuchsfeld wurden je 1 m³ der Betonmischung mit 5 % Beschleuniger, analog zu den Entwicklungsversuchen, sowie mit 8 % Beschleuniger appliziert. Der empfohlene Dosierbereich des Erstarrungsbeschleunigers liegt zwischen 4 % und 10 % vom Zementgehalt, wobei die obere Grenze praktisch nicht zur Anwendung kommt.

Die Betonherstellung und die Applikation des Spritzbetons erfolgten mit denselben Maschinen, Materialien, Methoden und Menschen. Die Variation bestand in der Anwendung des Zements CEM I 42,5 N und in der Beschleunigerdosierung.

6.3 Betonherstellung

Für die Versuche wurden die gleichen Ausgangsstoffe wie in den Entwicklungsversuchen verwendet. Zusätzlich wird ein Zement CEM I 42,5 N verwendet. Die Rezeptur entspricht der Rezeptur der Entwicklungsversuche.

Als Zusatzstoff wird der feste Zusatzstoff mit einer Dosierung von 5 % vom Zementgehalt und als Fließmittel FMVZ mit einer Dosierung von 0,5 % vom Zementgehalt zugegeben.

Mit dieser Rezeptur wurde je eine Charge mit 3 m³ Beton mit CEM I 52,5 R und mit CEM 42,5 N hergestellt.

7. Ergebnisse der Anwendungsversuche

In dieser Versuchsreihe sollte an Hand einer ausgewählten Mischung die Übertragbarkeit der Erkenntnisse der Entwicklungsversuche auf die Baustellenrealität gezeigt werden.

Für die Versuche gilt folgende Nomenklatur:

1. Abkürzung für Zementtyp, also CEM-A für CEM I 52,5 R bzw. CEM-B für CEM I 42,5 N,
2. Gefolgt von einer Ziffer für die Beschleunigerdosierung

Da 2 CEM I 52,5 R Mischungen hergestellt wurden, wird für die 2. Mischung ein /2 hinter der Abkürzung CEM-A gesetzt.

Ein weiteres Ziel war es, die Normkonformität des zusatzstoffmodifizierten Spritzbetons aufzuzeigen. Daher wurde in dieser Versuchsreihe ein „Standardzement“ des Schweizer Marktes verwendet, der im VersuchsStollen Hagerbach üblicherweise gebraucht wird. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihe beziehen sich auf die Werte der 0-Mischung aus den Entwicklungsversuchen.

Analog zu den Entwicklungsversuchen konnte der Rückprall signifikant gesenkt werden. Zur Darstellung des Potentials zeigt Bild 6 den Rückprall bezogen auf den tatsächlichen Rückprall der Standardmischung.

Die zweite Betonmischung CEM I 52,5 R zeigte mit steigender Beschleunigerdosierung einen steigenden Rückprall. Diesem Trend entgegen verhielten sich die CEM I 42,5 N- Be-

tone und die 1. Mischung mit CEM I 52.5 R. Die erste Betonmischung mit CEM I 52.5 R hatte einen höheren Zementanteil als die 2. Mischung.

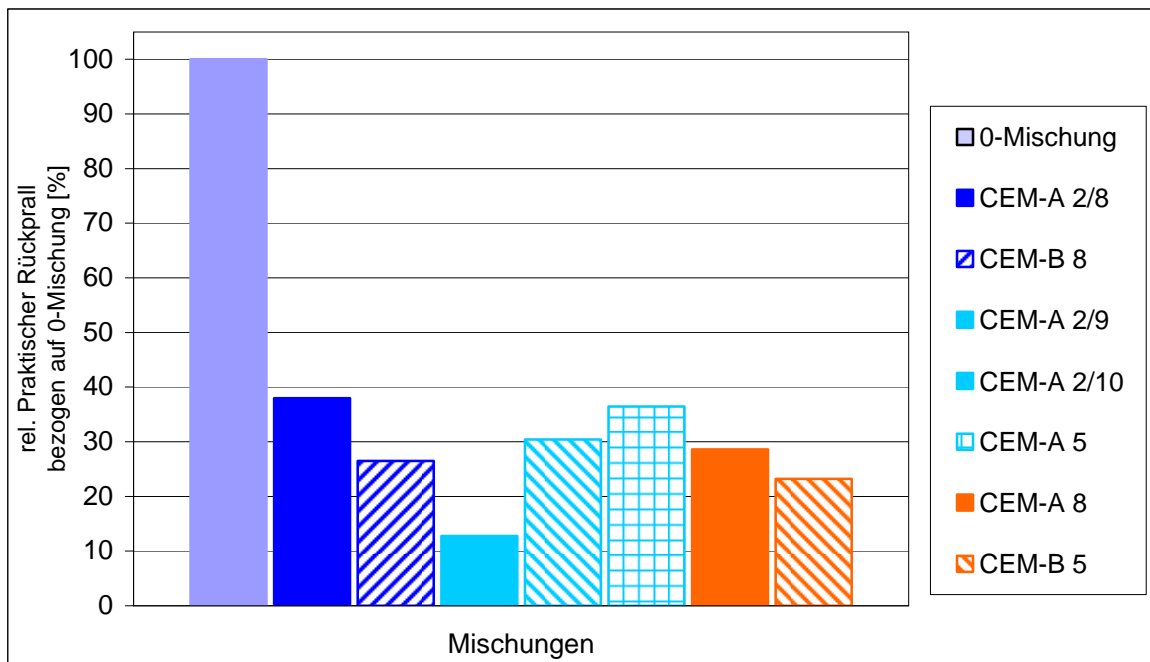


Bild 6: Relativer Rückprall bezogen auf Rückprall der 0-Mischung

Der Verlauf der Festigkeiten der Mischungen auf Basis CEM I 52.5 R entspricht dem Verlauf in den Entwicklungsversuchen (Bild 7). Nach 2 h trat wieder ein sprunghafter Anstieg der Festigkeit auf. Der auf CEM I 42,5 N basierte Beton zeigte eine kontinuierliche Festigkeitsentwicklung, wie dies für diesen Beton üblich ist.

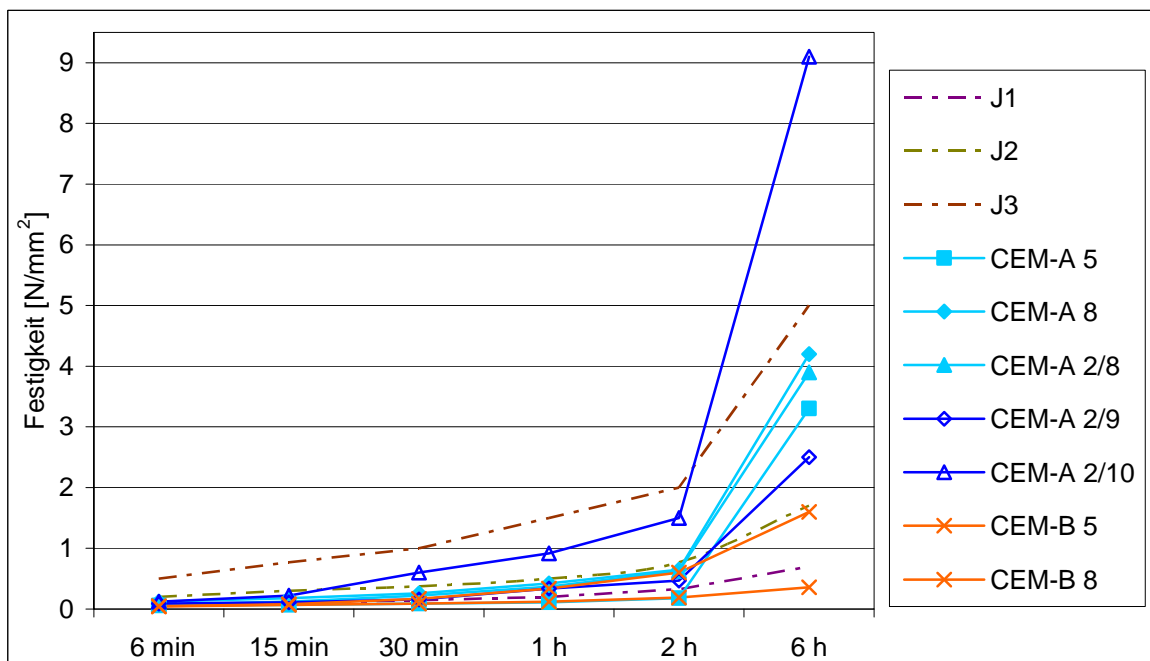


Bild 7: Frühfestigkeiten im Vergleich zu J-Kurven

In den Anwendungsversuchen wurde die Beschleunigerdosierung variiert, um den Effekt auf die Festigkeitsentwicklung zu zeigen. Wie zu erwarten, führte eine Erhöhung des Beschleunigeranteils zu einer Steigerung der Frühfestigkeit. Dabei sind Festigkeiten erreicht worden, die zum Teil oberhalb der J3 Kurve liegen. Mit 8 % Beschleunigeranteil lag der mit CEM I 42,5 N gebundene Beton nahe an der J2 Kurve.

Bei Betrachtung des Frühfestigkeitsverlaufs der Betone mit CEM I 52.5 R bestätigt sich die Erwartung, dass die Mischungen mit höherem Zementgehalt eine höhere Festigkeit aufwiesen.

Auf dem Markt sind darüber hinaus weitere Beschleuniger erhältlich, die das Potential besitzen eine schnellere Festigkeitsentwicklung zu ermöglichen. Somit kann prognostiziert werden, dass mit einem Zusatzstoffmodifizierten Beton hohe Festigkeitsanforderungen erfüllbar sind. Je nach Anwendungsfall gilt es dann Baustellenrezepturen zu finden.

8. Wirtschaftliche Bewertung des technischen Potentials

Im Folgenden sollen erste, grundsätzliche Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit von Spritzbetonanwendungen unter Zuhilfenahme des neuen Zusatzstoffs und auf der Basis der Versuchsergebnisse angestellt werden. Hierbei kommt dem Einfluss einer Verminderung des Rückpralls durch den neuen Zusatzstoff eine entscheidende Bedeutung zu.

Die Kalkulation basiert auf folgenden Grössen:

1. Mittlerer Einheitspreis (EP) für Spritzbeton (A)
2. Mittlerer EP für Transport Rückprall innerhalb Baustelle (B)
3. Mittlerer EP für Abtransport/Deponierung Rückprall (C)
4. Mittlere Arbeitsleistung zur Verarbeitung von 1 m³ Spritzbeton im Mittel (p) 0.65 h/m³

Für die folgenden rechnerischen Abschätzungen wurden folgende Einheitspreise (EP) angesetzt:

Tab. 8: Kalkulationbasis

Mittlerer Einheitspreis Spritzbeton Referenz (A ₁)	196	CHF/m ³
Mittlerer Einheitspreis Spritzbeton PS (A ₂)	246	CHF/m ³
Transport Rückprall zur Deponie inkl. Deponierung (C)	25	CHF/m ³
Transport Rückprall innerhalb Baustelle (B)	2	CHF/m ³
Arbeitsleistung	0,65	h/m ³

Für die preislichen Abschätzungen ist es zunächst erforderlich die Menge des sogenannten Ausgangsgemischs (V_{ausgang}) in Abhängigkeit vom Rückprall (r) zu berechnen, d.h. die Menge an Spritzbeton, die notwendig ist, um tatsächlich 1 m³ Spritzbeton an der Wand applizieren zu können:

$$V_{\text{ausgang}} = 1 + \frac{r}{1 - r}$$

Mit dem mittlerem Einheitspreis des Spritzbetons ergeben sich die Kosten (K_{ausgang}) für die Lieferung Ausgangsgemisch zu

$$K_{\text{ausgang}} = V_{\text{ausgang}} \cdot A_n$$

Mit dem Volumen des Rückpralls

$$V_{\text{rückprall}} = V_{\text{ausgang}} \cdot r$$

und den obigen Einheitspreisen für Transport, Entsorgung und Deponie resultieren die entsprechenden Aufwendungen K für

$$K_{\text{rückprall}} = V_{\text{rückprall}} \cdot C$$

Transport Rückprall innerhalb Baustelle (B)

$$K_{\text{rückprall}} = V_{\text{rückprall}} \cdot B$$

Zusätzlich kann mit der angenommenen Arbeitsleistung p der Zeitbedarf (T_{ausgang}) für die Applikation der Spritzbeton-Ausgangsmischungen vom Typ Standard, CEM-B 5, CEM-B 8 und CEM-A 5 abgeschätzt werden zu

$$T_{\text{ausgang}} = p \cdot V_{\text{ausgang}}$$

Die Zusammenfassung der Ergebnisse zeigt Tab. 9:

Tab. 9: Zeit- und Kostendifferenz

	0-Mischung	CEM-A 5	CEM-B 8	CEM-B 5
Rückprall	13,0%	5,2%	4,1%	3,2%
Ausgangsmischung [m ³]	1,149	1,055	1,043	1,033
Rückprall [m ³]	0,149	0,055	0,043	0,033
liefern Ausgangsmischung [CHF/m ³]	225,3	259,4	256,5	254,1
Entsorgung Rückprall Baustelle [CHF/m ³]	0,30	0,11	0,09	0,07
Entsorgung Rückprall Deponie [CHF/m ³]	3,74	1,37	1,07	0,83
Arbeitsaufwand [Mann-h/m ³]	0,75	0,69	0,68	0,67
Kostendifferenz [CHF/m ³]	0	-34,2	-31,2	-28,8
Kostendifferenz [%/m ³]	0	-13,9	-12,7	-11,7
Zeitdifferenz [min/m ³]	0	3,7	4,2	4,5

Bezogen auf den EP des Spritzbetons ergeben sich, nach einer grundlegenden Betrachtung und unter Zugrundelegung der in Tab. 9 dargestellten Kalkulationswerte zuerst keine Vorteile, sondern Mehraufwand. Bei der zeitlichen Betrachtung kann unter Zugrundelegung der Randbedingungen von zeitlichen Einsparungen in einem Bereich von ca. 3,7 min/m³ (Mischung CEM-A 5) bis 4,5 min/m³ (Mischung CEM-B 5) ausgegangen werden.

Um den zeitlichen Gewinn monetär auszudrücken werden die in Tab. 9 ermittelten Werte auf eine fiktive Tunnelbaustelle übertragen. Als Beispiel dient eine Tunnelbaustelle einer Kantonalstraße mit Sicherheitsstollen und Lüftung im Rohbau.

Der Berechnung liegen die in Tab. 10 wiedergebenden Annahmen zugrunde.

Tab. 10: Randbedingungen der Beispielsbaustelle

Tunnelquerschnitt	84	m ²
Umfang Tunnelgewölbe (Felsoberfläche)	20	m
Tunnellänge	2'600	m
Dicke Spritzbeton gemäß Plan	0,2	m
Mittlerer EP Rohbau Kantonalstraßentunnel	100'000	CHF/d

Der zeitliche Vorteil führt zu dem in Tab. 11 dargestellten Gewinn.

Tab. 11: Resultierender Gewinn auf einer Beispielbaustelle

	0-Mischung	CEM-A 5	CEM-B 8	CEM-B 5
m ³ Spritzbeton, theoretisch - ohne Rückprall	10'400	10'400	10'400	10'400
Ausgangsmischung - inkl. Rückprall [m ³ Spritzbeton]	11'954	10'968	10'845	10'744
Kosten Liefern Spritzbeton [CHF]	2'582'069	2'917'528	2'884'672	2'857'851
Kosten für Transport Rückprall innerhalb Baustelle [CHF]	3'108	1'136	889	688
Kosten für Spritzbeton (Rückprall)-Entsorgung [CHF]	38'851	14'204	11'116	8'595
Gesamtkosten Spritzbeton [CHF]	2'624'028	2'932'868	2'896'677	2'867'134
ERSPARNIS für Spritzbeton [CHF]	0	-308'840	-272'649	-243'106
Zeitersparnis beim Spritzbetonauftrag [Tage]	0	42,2	47,0	50,8
Kostensparnis Baustelle [CHF]	0	4'223'907	4'699'593	5'079'054
Nettogewinn [CHF]	0	3'915'066	4'426'944	4'835'948

Somit zeigt sich, dass der monetäre Mehraufwand des modifizierten Spritzbetons durch die Zeitersparnis und der daraus resultierenden Ersparnis in einen nennenswerten Gewinn gewandelt wird.

9. Zusammenfassung

Drei Fragestellungen sollten in dieser Untersuchung betrachtet werden:

1. Kann die Zugabe von dem Zusatzstoff den Rückprall senken?
2. Erfüllen die zusatzstoffmodifizierten Spritzbetone anspruchsvolle Festigkeitsanforderungen?
3. Welches wirtschaftliche Potential ergibt sich aus dem technischen Potential?

Sowohl in den Entwicklungsversuchungen als auch in den anschließenden Anwendungsversuchen konnte aufgezeigt werden, dass die Verwendung des Zusatzstoffs den Rückprall mit einem CEM I 52.5 R Beton als auch mit dem CEM I 42,5 N Beton senkt.

In den Entwicklungsversuchen konnte der Rückprall um bis zu 71 % gegenüber der 0-Mischung reduziert werden. Dies korrespondiert mit einer Senkung des Rückpralls der CEM I 52.5 R-Betone in den Anwendungsversuchen unter schwierigsten Auftragsbedingungen am realen Fels um 73.5 %. Die Mischung CEM-A 2/8 senkte den Rückprall um 87 %.

In den Anwendungsuntersuchungen konnte bewiesen werden, dass sowohl mit einem CEM I 52.5 R Beton als auch mit dem CEM I 42,5 N Beton die Festigkeitsanforderungen der J-Kurven mit einem herkömmlichen Beschleuniger erreicht werden können. Die Festigkeitsverläufe der CEM I 52.5 R Betone mit 5 % flüssigem Zusatzstoff vom Zementgehalt und 0.5 % vom Zementgehalt Fließmittel mit verzögernder Wirkung in den Entwicklungsversuchen entsprechen den Verläufen in den Anwendungsversuchen. Das in den Entwicklungsversuchen gezeigte Potential dieser Rezeptur konnte in den Anwendungsversuchen bestätigt werden. In den Anwendungsversuchen konnte mit dieser Rezeptur und der Verwendung eines marktüblichen Zements unter Erhöhung des Beschleunigeranteils nach 30 min eine hohe Frühfestigkeitsanforderungen erfüllt werden.

Aus unserer Sicht ist ein Markttransfer mit einem CEM I 42,5 N basierten Beton zu beginnen. Als Zusatzstoff sollte auf Basis dieser Untersuchung mit dem festen Zusatzstoff begonnen werden. Der Anteil des festen Zusatzstoffs sollte um die 5 % liegen. Der Rückprall hat in diesem Bereich ein Minimum. An diesem Punkt konnte eine Verbesserung der Konsistenz und der Verarbeitbarkeit erreicht werden. Die erreichte Festigkeit ist mit dieser Dosierung auch für anspruchsvolle Anwendungen geeignet.

Aufgrund der vorangegangenen Ausführungen und Berechnungen ist bei Verwendung des neuen Zusatzstoffs unter bestimmten Voraussetzungen z. T. nennenswertes Einsparpotenzial in finanzieller Hinsicht infolge Zeit- und Materialverbrauchsreduktion zu erwarten.

Die modifizierten Betone besitzen ein interessantes technisches und wirtschaftliches Potential. Die bisherigen Untersuchungen zeigen einen marktkonformen Reifegrad. Durch weitere eingehende Untersuchungen gilt es dieses vollständig auszuschöpfen.

10. Literatur

- [1] Österreichischer Betonverein:
Richtlinie Spritzbeton. Januar, 2004.
- [2] Weigler, H.; Karl, S.:
Beton. ISBN 3-433-01332-2, Ernst & Sohn Verlag, Berlin, 1989.

Die Autoren

Dr.-Ing. Erik Iglesias

Studium des Maschinenwesens und Dissertation an der RWTH Aachen, seit Juli 2007 Projekt-ingenieur und –leiter Forschung & Entwicklung in der VersuchsStollen Hagerbach AG
eiglesias@hagerbach.ch

Dipl.-Ing. TU Volker Wetzig

Studium des Bergbaus an der TU Clausthal, seit 1988 in der VersuchsStollen Hagerbach AG in div. leitenden Funktionen, seit 1994 Geschäftsbereichsleiter Forschung & Entwicklung
vwetzig@hagerbach.ch

Dr. Jürgen Bezler

Studium der Chemie an der Universität Würzburg und Business Administration am Henley Management College (UK), seit 2007 Leiter der Anwendungstechnik Europa/NME „Construction Polymers“ bei Wacker Chemie AG
jürgen.bezler@wacker.com

Dipl.-Ing. (FH) Mareike Xia

Studium der Bauchemie an der Fachhochschule Hildesheim/Holzminde, seit 2007 in der Anwendungstechnik „Construction Polymers“ bei Wacker Chemie AG
mareike.xia@wacker.com