

# ENDBERICHT 2.FORSCHUNGSJAHR

<b>FFG Projektnummer</b>	<b>864581</b>	<b>FörderungsnehmerIn</b>	öbv-GmbH
<b>Bericht Nr.</b>	2	<b>Berichtszeitraum</b>	1.7.2017 30.6.2018
<b>Bericht erstellt von</b>	Prof. Wolfgang Kusterle, OTH Regensburg und Dr. Florian Mittermayr, TU Graz		

**Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten**

## 1. Ziele und Ergebnisse

- Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht?  
Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch?  
Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG.
- Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.
- Beschreiben Sie „Highlights“ und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

Spritzbeton erfüllt im Tunnelbau und in der Instandsetzung wichtige Aufgaben. Das vorliegende Forschungsprojekt arbeitet an der Entwicklung und Bereitstellung von Spritzbetonen, welche hinsichtlich Dauerhaftigkeit die geplante Lebensdauer von Tiefbauten auch bei chemischem Angriff erreichen können ohne Einschränkungen bezüglich Robustheit, Vortriebsgeschwindigkeit und Sicherheit der Mannschaft in Kauf nehmen zu müssen. Ressourcen sollen, im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und des Klimaschutzes, effizient und nachhaltig eingesetzt werden. Zur Erreichung der Ziele sind Grundlagenuntersuchungen zu den Reaktionsmechanismen bei der beschleunigten Hydratation und auch bei chemischen Angriffen, neue Prüfmethode, Labor- und Spritzversuche in unterschiedlichem Maßstab zielsicher auszuführen.

Das Erreichen dieser Ziele erfordert ein schrittweises Vorgehen im Projektzeitraum von 4 Jahren. Im ersten Forschungsjahr wurden die Grundlagen dazu gelegt, im zweiten Jahr wurden erste Großversuche durchgeführt und die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen sind im voll im Laufen. Die gesteckten Ziele im Zeitraum wurden erreicht.

Im 2. Forschungsjahr kann kurz hervorgehoben werden:

### Großspritzversuche

Es wurden 2 Großspritzversuche (GSV), nämlich Wietersdorf II und Zams II durchgeführt. Ziele waren bei den Trocken-Spritzversuchen Wietersdorf II die Vertiefung von Erkenntnissen mit Mischungen mit dichter Packung, der Einsatz von Rückprallminderern und Calciumaluminatzementen, bei den Nass-Spritzversuchen die Untersuchung der Performance eines eigens hergestellten CEM II-B-M Zementes und die Grenzen der Verarbeitbarkeit von Nass-Mischgut. Die Auswertung der Nassspritzversuche Zams I mit allen Kennwerten erfolgte ebenfalls im 2. FJ, wie die Weiterführung der Dauerhaftigkeitsuntersuchungen Wietersdorf I. Die Vorbereitung der Spritzversuche am ZaB (Zentrum am Berg, zab.unileoben.ac.at, gefördert durch ffg) fiel gleichfalls in den Berichtszeitraum.

Die Durchführung der Spritzversuche gelang mit Hilfe der industriellen Partner und dem eingespielten Forschungsteam hervorragend und fast alle Untersuchungsziele konnten erreicht und zum Teil übertroffen werden. Die Verarbeitungsgrenzen konnten gut herausgearbeitet werden, die geforderten Frühfestigkeiten wurden durch die neuen Mischungszusammensetzungen trotz reduzierten Portlandzementklinkergehalten gut erreicht, die 6 Stunden Festigkeiten konnten durch Feinstkalzit-Zusatz gesteigert werden. Für die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen wurden eine große Zahl an Bohrkernproben gewonnen. Die erzielten RV Werte liegen deutlich unter denen üblicher RV-Rezepte.

### Laboruntersuchungen

Im Labor wurden umfangreiche systematische Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit durchgeführt. Mit Hilfe der gewonnenen Erkenntnisse konnten wichtige Vorbereitungen für die Großspritzversuche getroffen werden. Die Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit im Labor sind abgeschlossen jedoch ist geplant, dass die angewendeten Methoden bei den kommenden GSV weiter zum Einsatz kommen.

An den in GSV erzeugten Proben werden umfangreiche Dauerhaftigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen der im 1. FJ. gespritzten Proben sind mit Ausnahme weniger Langzeitstudien zu Karbonatisierung und Thaumasit-Sulfatangriff abgeschlossen. Prüfungen an den im 2. FJ. durchgeführten Proben sind am Laufen. Die bisher durchgeführten Prüfungen an neu entwickelten Spritzbetonen sind hinsichtlich Dauerhaftigkeit sehr vielversprechend.

Untersuchungen zu Hydratation beschleunigter Bindemittelsysteme wurden im 2. FJ. intensiviert. Neben einem neu angeschafften isothermen Kalorimeter, kamen hochauflösende Methoden zur Feststoff- und Porenlösungscharakterisierung zum Einsatz. Es konnten neue Einblicke in die für Spritzbeton bedeutenden Reaktionen gewonnen werden.

Die Beurteilung der Nachhaltigkeit der Ausgangsstoffe ist weitgehend abgeschlossen. Im 2.FJ. wurde außerdem das Global Warming Potential der Mischungen der durchgeführten GSV berechnet. Die Einbeziehung „funktioneller Einheiten“ in die Berechnungen wurde gestartet.

### **Herausforderungen**

Bei folgenden Punkten traten Probleme auf an deren Lösung gearbeitet wird:

Die Wechselwirkung von EB-Bindemittel wurde auf die Versuche am ZaB verschoben, die Verdüsung des Erstarrungsbeschleunigers konnte erst optisch beurteilt werden.

Versuche unterschiedliche Reaktionsprodukte mit dem In-situ Raman zu charakterisieren stecken noch in der Entwicklungsphase.

Die Dauerhaftigkeitsergebnisse von Mischungen mit Metakaolin oder Silikastaub, waren teilweise noch nicht eindeutig, was der Grund zu weiteren Versuchen im Zuge von ZaB wurde. Die Wechselwirkung von unterschiedlichen Fließmittel-Typen mit Erstarrungsbeschleunigern konnte für die Großversuche pragmatisch gelöst werden, Detailuntersuchungen wurden noch aufgeschoben.

### **Organisatorisches und Verwertung**

Die Forschungsaufgaben wurden mit 4 Hauptgebieten (Betontechnologie, Hydratation, Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit) straffer strukturiert und die interne Kommunikation verbessert.

Die vorgesehenen Meetings mit den industriellen Partnern wurden durchgeführt und waren sehr gut besucht, 3 Newsletter zur Zwischeninformation sind versandt worden. Vielbeschäftigte industrielle Partner sind trotzdem noch nicht ganz optimal eingebunden, obwohl einzelne Vertreter der Partner gut in die Arbeiten integriert sind.

Eine beträchtliche Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen ist bereits erschienen und weitere sind in Vorbereitung. Die Arbeiten wurden auf mehreren Tagungen vorgestellt.

### **Fazit**

Mit dem motivierten Team junger Forscher in Zusammenarbeit mit Experten aus der Praxis konnte daher im 2. Forschungsjahr ein Schritt zur Erreichung der ambitionierten Ziele und damit in Richtung dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone gemacht werden.

## **2. Arbeitspakete und Meilensteine**

## 2.1 Übersichtstabellen

### Erläuterung:

Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut.

Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan

Aktuelle Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung

In Abbildung 1 ist der Balkenplan für das 2. FJ. und die angrenzenden Jahre angegeben. Die zeitliche Abfolge konnte gut eingehalten werden.

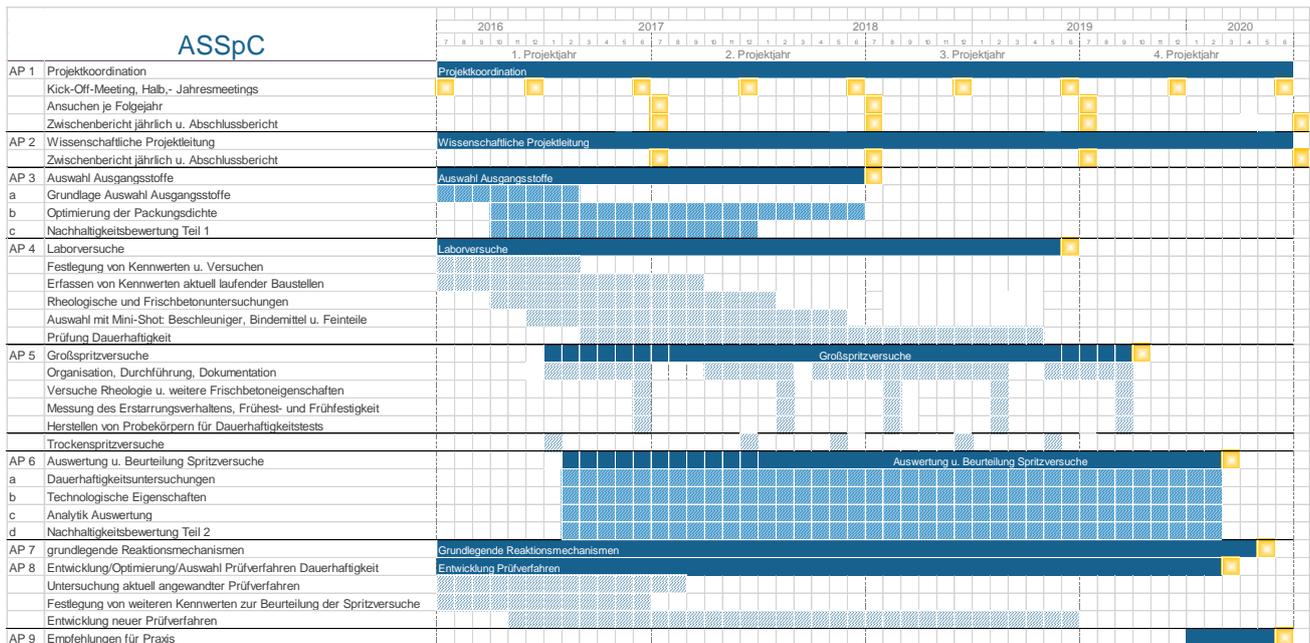


Abbildung 1: Balkenplan 2. FJ

Die Arbeitspakete sind in Tabelle 1 mit dem Fertigstellungsgrad nach dem 2. FJ. und den erreichten Ergebnissen gelistet und in Tabelle 2 sind Meilensteine detailliert angeführt.

**Tabelle 1: Arbeitspakete 2. FJ** (Abkürzung: **GSV**= Großspritzversuch)

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	<b>Projekt-koordination</b>	50%	7/16	6/20	7/16	6/20	Planmäßig alles erreicht
2	<b>Wissenschaftliche Projektleitung</b>	50%	7/16	6/20	7/16	6/20	Planmäßig alles erreicht/ Aufwand höher als geplant Regelmäßige Newsletter (bisher 6), 4 Klausurtagungen
3	<b>Auswahl Ausgangsstoffe und Leimentwicklung</b>	90%	7/16	6/18	7/16	10/19	AP3a Abgeschlossen. Weitere Stoffe können im Projektverlauf noch dazukommen. AP3b Untersuchungen zur dichtesten Packung für alle GSV durchgeführt AP3c Nachhaltigkeitsbewertungen für vorhandene Ausgangsstoffe durchgeführt; Bewertung wird für kommende GSV durchgeführt
4	<b>Betonrezeptur-entwicklung, Laborvorversuche und Spritzbetonversuche im Labormaßstab</b>	70%	7/16	6/19	7/16	10/19	Rheologische Grundlagenversuche abgeschlossen, Referenzrezepturen der Baustellen der GSV mitgeprüft, Untersuchungen Untermischbarkeit begonnen, Vorbereitung GSV mit MiniShot durchgeführt. Dauerhaftigkeitsproben bei GSV gewonnen
5	<b>Großspritz-versuche</b>	60%	12/16	10/19	12/16	11/19	Je der zweite Trockenspritzversuch und Nassspritzversuch wurden durchgeführt. 3. Nassspritzversuch am Zentrum am Berg vorbereitet (Durchführung 8/18)
6	<b>Auswertung und Beurteilung der Spritzbetonversuche</b> (Achtung: Unter-AP werden getauscht, siehe Erläuterung Pkt. 2.2)	40%	1/17	3/20	1/17	6/20	AP6a Dauerhaftigkeitsuntersuchungen der GSV laufen AP6b Technologische Eigenschaften für GSV ermittelt bzw. laufen AP6c Analysen laufen, wird in Zukunft unter AP6a behandelt AP6d Nachhaltigkeit am Spritzbeton in Bearbeitung
7	<b>Grundlegenden Reaktionsmechanismen</b>	40%	7/16	5/20	7/16	6/20	AP7a Untersuchungen an Laborproben und MiniShot-Proben durchgeführt und mit GSV verifiziert AP7b Analytik und Modellbildung an Proben von GSV laufen
8	<b>Neuentwicklung, Optimierung und Auswahl von Prüfverfahren und Analysenmethoden</b>	70%	7/16	3/20	7/16	3/20	Analytik zur Dechiffrierung der Reaktionsabläufe laufen und vom Dauerhaftigkeitsfragestellungen auch auf Hydratationsabläufe ausgeweitet
9	<b>Empfehlungen für die Praxis und ggf. Anpassungsvorschläge für Normen und Richtlinien</b>	20%	1/20	6/20	1/20	6/20	Zahlreiche Publikationen erschienen und in Vorbereitung Normempfehlungen im 4. FJ

**Tabelle 2: Meilensteine** (Blauer Text bereits im 1.FJ berichtet,

GSV= Großspritzversuch)

Meilenstein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basis-termin	Aktuelle Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
1	• Projektbeginn (Kick-Off-Meeting)	5.7.16		5.7.16	
	• Workshops mit allen Projektteilnehmern	5.7.16 14.12.16 1.6.17 29.11.17 7.6.18		1.6.17  7.6.18	
	• Jährliche Zwischenberichte	30.6.17 30.6.18	15.8.17 22.8.18	15.8.17 22.8.18	Nach Abschluss 2. FJ
	• Präsentation der Zwischenergebnisse mit Diskussion Industriebeteiligung	1.6.17 7.6.18		1.6.17 7.6.18	
	• Notwendige Maßnahmen zur wissenschaftlichen Projektweiterführung	30.6.17 30.6.18		30.6.17 30.6.18	
	• Ansuchen für Folgejahre	30.6.17 30.6.18	15.8.17 22.8.18	15.8.17 22.8.18	Nach Abschluss 2. FJ
	• Erstellung Kommunikationsplattform	12.10.16		12.10.16	
	• Abschlussbericht	Nach 4. FJ			
2	• Berichte mit Auswertungen je Forschungsjahr	30.6.17 30.6.18	15.8.17 22.8.18	15.8.17 22.8.18	
	• Projektende: Wissenschaftlich-Technischer Abschlussbericht inklusive Empfehlungen für die Praxis	30.6.20	30.9.20		
	• Veröffentlichung der Ergebnisse, Dissemination in der Branche	30.6.20	30.9.20		
	• Dissertationen und Publikationen	30.6.20	30.9.20		Mehrere Publikationen veröffentlicht
3	• Auswahl und Beschaffung geeigneter Bindemittel, Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Gesteinskörnungen	2/17		1/17	
	• Optimierte Rezepturen für Labor- und Großspritzversuche	10/17	10/19		Laufend iterativer Vorgang
	• LifeCycleAssessment Ausgangsstoffe	10/17	12/17	12/17	
	• LifeCycleAssessment Spritzbeton	10/17	10/19		Laufend für GSV
	• Berichtserstellung für AP 3 für Zwischenberichte u. Endbericht		6/19		Teilberichte erledigt
4	• Entwicklung praxistauglicher Rezepturen, Ausloten Grenzen der Verarbeitbarkeit	6/19	10/19		Teilergebnisse liegen vor Verarbeitbarkeit abgeschlossen
	• Neue Erkenntnisse zu Kennwerten für praxistaugliche Spritzbetonrezepturen	6/19	10/19		Teilergebnisse liegen vor
	• Erkenntnisse zur Frühfestigkeitsentwicklung und ausreichend Proben für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen	6/19	10/19		Teilergebnisse liegen vor

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorauswahl der Ausgangsstoffe für Großspritzversuche</li> </ul>	6/19	10/19		Für GSV durchgeführt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 4 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	6/19	10/19		Zwischenberichte erledigt
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolgreiche Durchführung der Spritzversuche mit neu entwickelten Rezepturen (Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit)</li> </ul>	6/19	11/19		4 GSV abgeschlossen (ein weiterer im 3.FJ durchgeführt)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellung und Bereitstellung von geeigneten Probekörpern für Dauerhaftigkeitstests</li> </ul>	6/19	11/19		je GSV durchgeführt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 5 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	6/19	3/20		Teilberichte liegen vor
6	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfassung der entscheidenden Kenngrößen und Beurteilung des neu entwickelten Spritzbetons hinsichtlich Dauerhaftigkeit</li> </ul>	3/20	3/20		Gute Fortschritte erzielt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nachhaltigkeitsbewertung unter Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit</li> </ul>	3/20	6/20		Fortschritte erzielt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Verifizierung der Dauerhaftigkeit der entwickelten Spritzbetone und Gegenüberstellung mit Referenzen</li> </ul>	3/20	6/20		Gute Fortschritte erzielt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 6 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	3/20	6/20		laufende Dokumentation
7	<ul style="list-style-type: none"> <li>Identifizierung und Aufklärung der Reaktionsmechanismen im Hinblick auf die Dauerhaftigkeit des Spritzbetons</li> </ul>	5/20	6/20		Gute Fortschritte erzielt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erkennen bisher nicht berücksichtigter Einflussfaktoren</li> </ul>	5/20	6/20		laufend
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 7 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	5/20	6/20		Teilberichte liegen vor
8	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Erkenntnisse zur Festigkeitsentwicklung von Spritzbeton durch den Einsatz von Ultraschallgeräten</li> </ul>	3/20	6/20		Arbeiten laufen Untersuchungsmethoden beschränken sich nicht nur mehr auf Ultraschallgeräte sondern ein Multimethoden Ansatz wurde gewählt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Erkenntnisse zur Eignung von Prüfverfahren zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Spritzbeton</li> </ul>	5/20	6/20		Arbeiten laufen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfverfahren zur aussagekräftigen Überprüfung der Frühfestigkeit und Dauerhaftigkeit stehen zur Verfügung</li> </ul>	5/20	6/19		Großteils erledigt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 8 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	5/20	6/20		Teilberichte liegen vor
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenfassende Aufbereitung der Erkenntnisse für die Baupraxis</li> </ul>	6/20	6/20		Im 4. Projektjahr
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorträge und Publikationen</li> </ul>	6/20	6/20		Bereits viele vorhanden

	<ul style="list-style-type: none"> <li>Bekanntmachung und wenn möglich Einfließen der Ergebnisse in den Arbeitsgruppen der Regelwerke</li> </ul>	6/20	6/20		
--	--	------	------	--	--

## 2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.
- Konnten die Arbeitsschritte und -pakete gemäß Plan erarbeitet werden? Gab es wesentliche Abweichungen?
- Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik. Achtung: Änderungen an der Methodik und wesentliche Änderungen im Arbeitsplan erfordern eine Genehmigung durch die FFG.

Wie aus den Tabellen 1 und 2 ersichtlich, konnten fast alle geplanten Forschungsaktivitäten durchgeführt werden. Ein kleiner Teil an Aufgaben wurde vorgezogen oder verschoben.

### AP 1 und 2 Projektleitung und Projektkoordination

Neben vielen Einzelgesprächen, kleineren Diskussionsrunden und Baustellenbesuchen wurden folgende Treffen abgehalten:

Arbeitsgruppensitzungen

- Trockenspritzen, Wopfing, 2. 8. 2017
- Dauerhaftigkeit, Reaktionsmechanismen, Prüfverfahren, Alpbach, 12. 1. 2018

Zwischensitzung, Wien, 29. 11. 2017

Jahresabschlussitzung, Wien, 7. 6. 2018

Organisations-Kommunikationsworkshop, Graz, 12. 12. 2017

Forschungsteam-Klausur, Almtal 18.-20.9.2017

Forschungsteam-Klausur mit Werksbesuch, Wietersdorf 15.-16.3.2018

Außerdem wurden 3 Newsletter zur Information aller Vertreter der industriellen Partner versandt.

Über spezifische Versuchsdurchführungen wurden Berichte verfasst bzw. Bachelor- und Masterarbeiten erstellt.

### AP 3 Ausgangsstoffe und Leimentwicklung

#### AP 3a Auswahl Ausgangsstoffe

Zusätzlich zu den im ersten Forschungsjahr (FJ) erfolgten Untersuchungen wurden weitere Stoffe, die für die Großversuche mit eingesetzt wurden, nach den gleichen Kriterien geprüft. Die Spezifizierung erfolgt in den Berichten der Großspritzversuche (GSV).

#### AP 3b Optimierung der Packungsdichte

Die Methoden der Erstellung einer dichten Packung nach dem „Ma-S“ Verfahren, Mischenergie-Verfahren nach Marquardt kombiniert mit  $\beta_P$  (bzw. spread flow test) nach Okamura wurden weiter für die Vorbereitung der Mischungen der Großversuche herangezogen. Für die Berechnungen wurde zusätzlich das Modell CIPM (compaction interaction packing model) nach Fennis verwendet. Die guten Ergebnisse bei den Spritzversuchen bestätigen die Sinnhaftigkeit dieser Vorgehensweise.

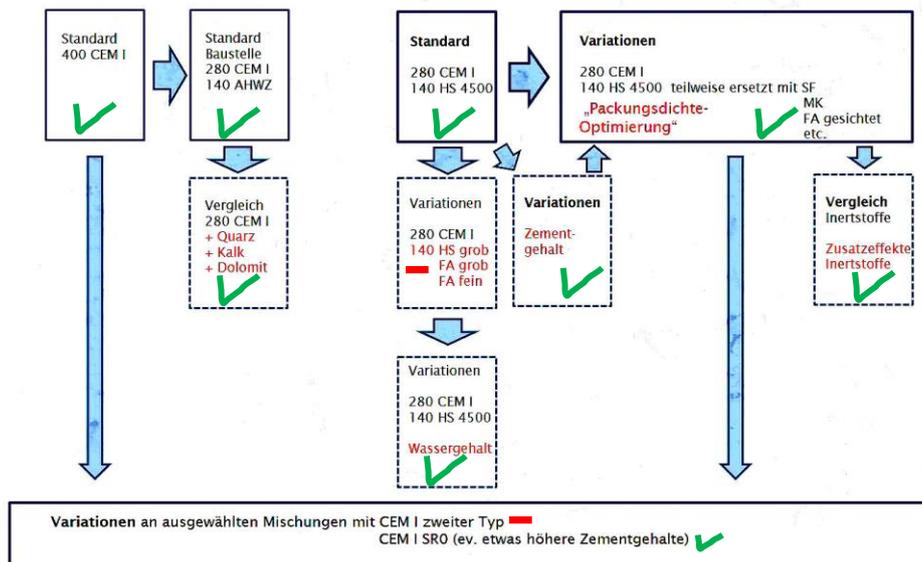
#### AP 3c Nachhaltigkeitsbewertung Ausgangsstoffe

Eine systematische Literatur-Recherche zum Life-Cycle-Assessment der Spritzbeton-Ausgangsstoffe, sowie deren LCA-Bewertungen war der Ausgangspunkt für die Nachhaltigkeitsbewertung im 1. FJ. Hier lag der erste Fokus auf gängigen Kennwerten, wie z.B. der CO<sub>2</sub>-äq. (GWP) und Primärenergie (PE) sowie einer Recherche der verwendeten Methoden zu deren Berechnung. Im 2. FJ wurden für die im Spritzbeton notwendigen Zusatzmittel und Zusatzstoffe noch genauere Daten erhoben. Die Untersuchungen zu den Allokationsmethoden wurden ausgeweitet. Die Auswirkung auf die Ergebnisse der Nachhaltigkeitsperformance der in den GSV verwendeten Rezepturen wurde jeweils berechnet (Details siehe auch 6d).

**AP 4 Betonrezepturentwicklung, Laborversuche und Kleinspritzversuche**

Die Betonentwicklung beginnt systematisch bei den Ausgangsstoffen, am Leim und Mörtel und endet in Spritzversuchen. Im zweiten Jahr ist ein guter Teil der Versuchsmatrix aus Abb. 2 abgearbeitet worden.

Mit den Kenngrößen der Ausgangsstoffe (Korngrößenverteilung KGV bzw. Partikelgrößenverteilung, Packungsdichte der Einzelstoffe) wurden optimale Mischungszusammensetzungen mit maximaler Packungsdichte berechnet (Anwendung CIPM mit einem software-tool) und in Versuchsreihen experimentell verifiziert bzw. falls erforderlich die Mischungsverhältnisse modifiziert.



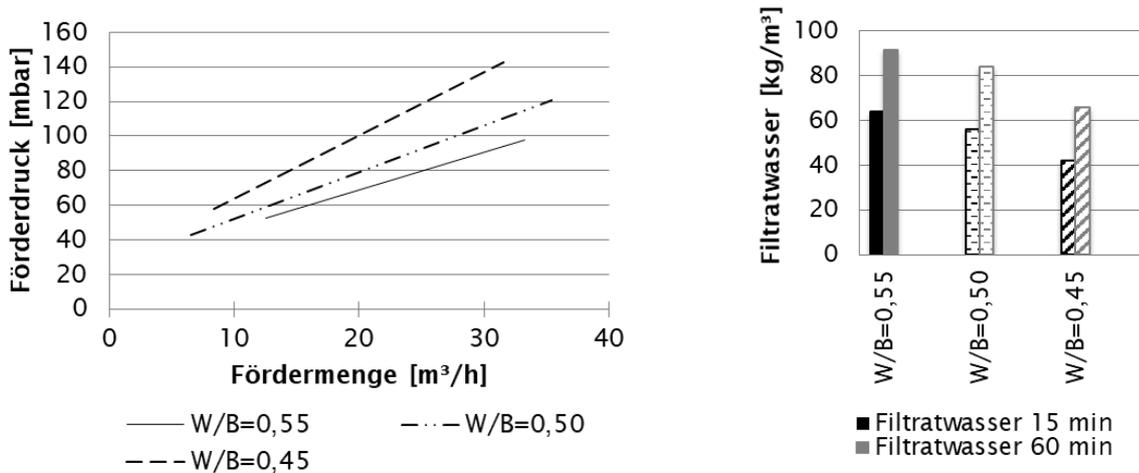
**Abbildung 2: Versuchsmatrix Laborversuche Nassspritzverfahren. Es wird bei Extremmischungen begonnen und bei Bedarf verfeinert.**

In anschließenden Versuchen am beschleunigten System (i.d.R. an Mörteln) wurde ermittelt, ob die definierten Zielgrößen (Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit) erreicht wurden. Wenn nicht, wurden die Zusammensetzungen (Stoffe, Mengenverhältnisse, W/B-Werte, Zusatzmittel) solange variiert, bis die Zielgrößen erreicht wurden (Iterationen). In Bezug auf die Dauerhaftigkeit wurden Stoffe und Mischungsverhältnisse gewählt, die eine Verbesserung erwarten lassen, was zu prüfen bleibt.

**Verarbeitungseigenschaften**

Die Verwendung von neuen Zusatzstoffkombinationen und geringen Wassergehalten kann die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Spritzbeton erhöhen. Dabei werden die Grenzen der Verarbeitbarkeit und Spritzbarkeit erreicht. Übliche Frischbetonprüfungen, z.B. Ausbreitmaß, liefern zu geringe Informationen hinsichtlich der Pumpbarkeit und beurteilen stets die gesamte Betonmischung. Jedoch kommt vor allem der Zusammensetzung und Dicke der dünnen Gleitschicht an der Rohrwandung eine wesentliche Bedeutung zu. Für die Pumpbarkeit ist zudem eine ausreichende Stabilität der Mischungen unter Druck erforderlich. In den vorliegenden Versuchsreihen wurden ein Gleitrohrheometer und eine Filterpresse für die Beurteilung verwendet (Abbildung 3). Derzeit müssen noch intensivere Untersuchungen durchgeführt werden um

Verarbeitungsgrenzen, z.B. hinsichtlich kritischer Leimgehalte oder Blutwassermengen, für die Pumpbarkeit festzulegen.



**Abbildung 3: Vergleich Pumpprognose ermittelt mit Sliper und Filtratwasser ermittelt mit Betonfilterpresse der Rezepturen mit unterschiedlichen W/B-Werten**

Die Erkenntnisse aus dem Labor mussten in Großspritzversuchen bzw. Pumpversuchen verifiziert werden (siehe Bericht Großspritzversuche Zams II). Im Labor können hohe Pumpendrucke und Baustellenbedingungen nicht abgebildet und mit dem Sliper nicht erfasst werden. Jedoch zeigten die Laborversuche, dass vor allem die rheologischen Eigenschaften der Leimschicht und das Leimvolumen maßgeblichen Einfluss auf die Pumpbarkeit haben können.

#### Minishot

Das MiniShot-Verfahren samt der Pulsment Messung gestattete Spritzversuche im Kleinen und auch Untersuchungen zur Erfassung der Reaktionsabläufe. Dies wurde ausgenutzt um Mischungen der GSV Zams I nachzustellen und die Unterschiede genauer zu untersuchen (Siehe Galan, I., Thumann, M., Briendl, L., Röck, R., Steindl, F., Juhart, J., Mittermayr, F., Kusterle, W.: From Lab Scale Spraying to Real Scale Shotcrete and back to the Lab. 8<sup>th</sup> International Symposium on Sprayed Concrete – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support – Trondheim, Norway, 11. – 14. June 2018.)

## AP 5 Großspritzversuche

### Zams I

Ein vorgezogener Großspritzversuch für das Nassspritzverfahren wurde vom 19.-22.6.2017 in Zams im ersten FJ durchgeführt. Die Auswertung und Berichterstattung fällt aber in das gegenständliche 2. FJ. Der Versuch fand im Gelände der tba Zams statt. Die Ausgangsstoffe wurden teils vom Werk zudosiert, teils in Big-Bags eingewogen und zusätzlich aufgegeben. Der Auftrag erfolgte mit einer CIFA-Hittmayr Betonpumpe, die mit einem Spritzmanipulator kombiniert ist, im EVI-Stollen. Geprüft wurden die Frischbetonkennwerte, die Frühfestigkeiten und der Rückprallanteil. Die Prüfung und Auswertung der Bohrkerne liegt jetzt im Bericht Nassspritzversuche Zams 1 vor.

Ziel dieser Versuche war es Proben für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen zu gewinnen, um den Einfluss von Feinstkalzit und dichter Packung mit Zusatzstoffkombinationen zu testen. Dies ist gelungen. Wegen der geringen Versuchsanzahl konnten allerdings keine systematischen Variationen zu weiteren Fragestellungen durchgeführt werden, die später durchgeführt wurden.

In den, unter definierten Bedingungen, durchgeführten Spritzversuchen konnte folgendes gezeigt werden:

- Bei allen Mischungen, in welchen u.a. CEM SR0 enthalten war, gab es Schwierigkeiten mit

der Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit, Spritzbarkeit). Die Ursachen sind wahrscheinlich Überdosierungen beim Fließmittel, das mit dem Zement zu Nachverflüssigung neigte. (Bem.: In den Versuchen am ZaB konnte gezeigt werden, dass sich bei richtiger Einstellung der SR0 sehr gut eignet.)

- Feinstkalzit erhöht, wie in den Vorversuchen konstatiert, die Frühfestigkeit (6h Wert) auf mehr als das Doppelte gegenüber den Referenzrezepturen.
- Alle Bohrkernfestigkeiten zeigen eine mehr als ausreichende Festigkeit für die Spritzbeton-Festigkeitsklasse SpC 25/30. Darüber hinaus erreichten 6 der 8 Rezepturen sogar die Klasse SpC 30/37.
- Der Festigkeitsabfall zwischen FB-Würfel und BK zeigt eine ziemlich gute Korrelation mit dem Klinkergehalt. Je weniger Klinker umso höher wurde die EB-Dosierung bezogen auf den Klinkergehalt und in der Folge der Festigkeitsabfall. Bei CEM I hoch (90% Klinkergehalt) wurde ein Abfall von 9%, bei hohen Zusatzstoffgehalten (50% Klinker) ein Abfall bis 40% festgestellt. Damit besteht ein Problem mit der Richtlinie Spritzbeton, die den Festigkeitsabfall berechtigterweise bei der Beschleunigerbewertung auf 20% begrenzt.
- Rezepturen mit speziellen Zusatzstoffkombinationen und dichter Packung bringen einen vergleichmäßigten Verlauf der Festigkeitsentwicklung, sehr hohe Würfelfestigkeiten und zeigen bezüglich RV-Werten und WU ein hohes Dauerhaftigkeitspotenzial. Sie waren prinzipiell spritzbar, wiesen aber andere Verarbeitungseigenschaften auf als die Referenzmischungen, sodass sie teilweise etwas schwieriger zu spritzen waren. Die BK-Druckfestigkeiten sind trotzdem sehr gut und mehr als ausreichend.

**Tabelle 3: Übersicht der Ergebnisse der Spritzversuche, FM-Gehalt konstant**

Kurz- zeich.	Zu- sammen- setzung	DF 6h N/mm <sup>2</sup>	DF 28 N/mm <sup>2</sup>	$\rho_{28}$ kg/dm <sup>3</sup>	DF Würfel 28	$\rho_{28}$ Würfel	Abfall %	EB Dos. %	EB/CEM I-Gehalt %
Z1	100% SR0	7,2	55,5	2,415	61,4	2,474	9	8,03	8,1
Z2	CEM I + AHWZ	5,9	46,0	2,424	67,3	2,462	31	7,88	11,9
Z3	SR0 + 10 EGU	15,9	59,9	2,424	71,8	2,493	17	7,34	8,3
Z4	CEM I + 5 EGU	14,4	41,1	2,421	67,4	2,468	39	8,22	8,7
Z5	CEM I + HÜS + Q1 + 100	4,7	45,9	2,417	75,1	2,445	39	6,88	12,7
Z6	SR0 + HÜS + Q1 + EGU	7,4	54,2	2,400	95,6	2,468	43	10,56	17,8
Z7	CEN I + HÜS + 100 + EGU+ SF	6,3	40,2	2,399	69,9	2,411	40	8,08	14,9
Z8	SR0 + HÜS + 10 EGU	6,4	52,4	2,377	85,8	2,524	39	Abbruch	n.b.

Kurz- zeich.	Leistung Hübe/min	DF 90 N/mm <sup>2</sup>	Rück- prall %	Spritz- bild	E- Modul kN/mm <sup>2</sup>	WU mm	RV kg/to	BM Kg/m <sup>3</sup>	W/B-Wert (vor Pumpe)
Z1	14	67,5	12,3	brauch bar	43,0	8,0	0,60	406	0,478
Z2	13	58,2	13,8	gut	43,4	5,0	0,39	411	0,450
Z3	13	70,2	11,3	schlec ht	42,9	12,5	0,68	402	0,456
Z4	12	59,0	11,7	gut	40,1	27,5	0,64	410	0,472
Z5	14	58,5	9,9	brauch bar	45,0	6,7	0,32	409	0,462
Z6	9	60,5	16,3	schlec ht	41,8	5,7	0,36	402	0,451
Z7	13	53,1	11,0	brauch bar	41,8	15,5	0,32	397	0,506
Z8	11	64,7	n.b.	schlec ht	39,8	20,0	0,44	401	0,470

### Wietersdorf II

In den zweiten Trockenspritzversuchen mit Spritz-Bindemittel (Wietersdorf II) wurden folgende Aufgabenstellungen bearbeitet

- Auswirkungen der Mischung von Portlandzement (Spritz-Bindemittel bzw. C<sub>3</sub>A-freier Zement SR0) mit weiteren Stoffen auf Spritzbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit
- Möglichkeit Zement SR0 zu beschleunigen
- Zusatzstoffkombinationen in dichter Packung mit Hüttensand, CAC (Calciumaluminatzement) und mikrofeinen Zusatzstoffen
- Wirkung verschiedener Rückprallminderer

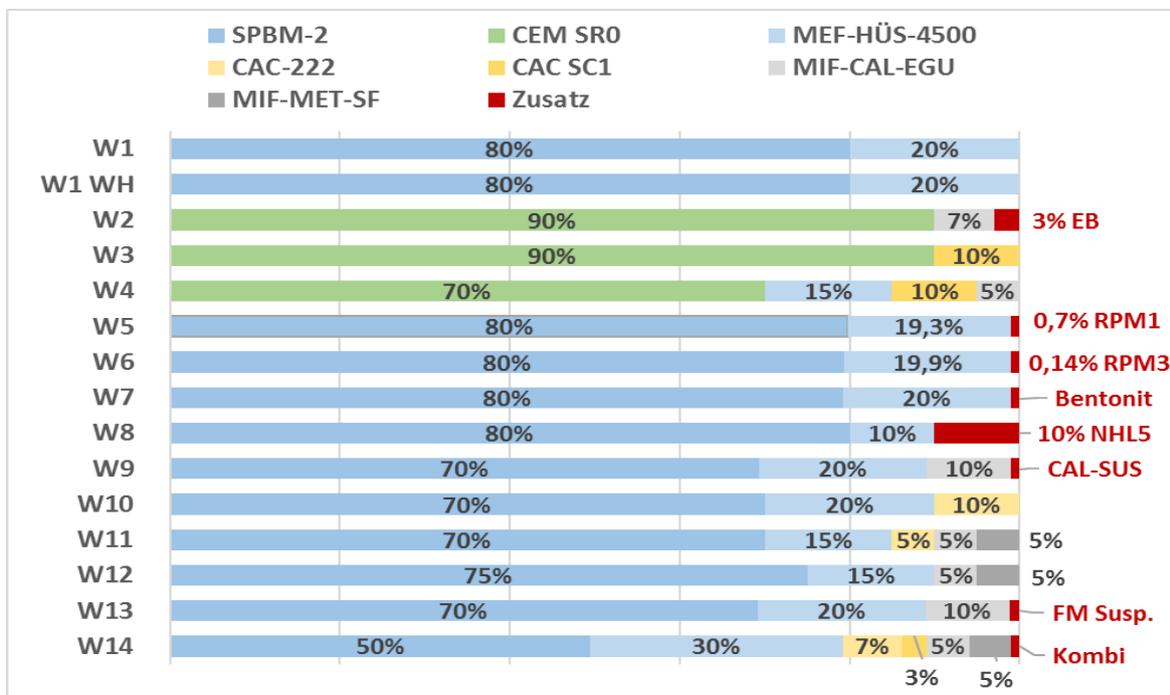


Abbildung 4: Mischungsübersicht grafisch

Tabelle 4: Ergebnisse der Prüfungen und Messungen vor Ort

Mischg. Nr.	Beschreibung	Spritzbild	Ges. Wasser W	Binde mittel B	W/B aus Messung	Staub-messung	Rück prall	Frühfestig keit 10 min	Frühfestig keit 6h	Festigkeit 28d
			l	kg		mg/m <sup>3</sup>	%	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
W1	Ref SPBM80-HÜS20	etwas weich	28,6	47,5	0,60	4,7	15,4	1,0	1,8	46,7
W1 WH	WH Ref SPBM80-HÜS20	gut	23,4	47,5	0,49	6,4	17,6	1,2	3,0	60,9
W2	Ref SR090-CAL7-EB3	?	22,3	47,3	0,47	6,4	19,4	0,05	4,0	66,3
W3	SR090-CAC(SC1)10	schön	23,1	47,2	0,49	5,8	17,6	1,1	4,5	66,3
W4	SR070-CAC(SC1)10-HÜS15-CAL5	schön	22,1	47,4	0,47	6,7	15,9	2,1	8,0	78,2
W5	SPBM80-HÜS19-RPM1	k.A.	24,3	47,9	0,51	7,0	18,1	1,2	3,0	60,2
W6	SPBM80-HÜS20-RPM3	k.A.	22,2	47,6	0,47	6,8	18,5	1,1	4,5	57,5
W7	SPBM80-HÜS20-RPM4	k.A.	28,44 *	47,7	0,60	14,5	22,1	0,7	1,9	43,1
W8	SPBM80-HÜS10-NHL10	k.A.	23,6	47,6	0,50	7,6	16,4	1,0	5,0	48,8
(W9)	SPM70-HÜS20-CAL10 FM	k.A.								
W10	SBM70-CAC(222)10-HÜS20	Eher trocken	19,3	47,6	0,41	9,1	29,7	2,0	8,8	60,3
W11	SBM70-CAC(222)5-HÜS15-CAL5-MET5	schön	21,6	47,6	0,45	8,5	25,5	1,0	2,5	57,5
W12	SPM75-HÜS15-CAL5-MET5	gut	23,6	47,6	0,50	8,4	18,7	1,0	3,0	69,8
W13	SPM70-HÜS20-CAL10 FM	Eher nass, Material sackt ab, steift aber dann an.	18,3	48,0	0,38	9,6	23,0	1,0	5,1	74,8
W14	SPBM50-CAC(222)7-CAC(SC1)3-HÜS30-CAL5-MET5-RPM3-FM	Etwas unregelmäßig	22,4	48,5	0,46	8,5	16,9	0,9	4,5	63,2



**Abbildung 5: Versuchsstand, Abstand Düse zu Kisten 2m; Neigung Kisten 13° gegen Vertikale**

Die Ergebnisse können folgend zusammengefasst werden:

- Trockenmischgüter aus Spritz-Bindemittel bzw. C<sub>3</sub>A-freier Zement SR0 mit weiteren Stoffen konnten auf ihre Spritzbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit untersucht werden. Dabei wurde der Klinkeranteil bis auf 50% reduziert.
- Mischungen mit Zement SR0 wurde mit Beschleuniger und geringen Anteilen Calcium-

aluminatzement getestet. Dabei wurden Frühfestigkeiten deutlich im J3 Bereich erreicht.

- Zusatzstoffkombinationen in dichter Packung mit Hüttensand, CAC (Calciumaluminat-zement) und mikrofeinen Zusatzstoffen ergaben Spritzbetone sehr hoher Dauerhaftigkeit und mit niedrigen RV-Werten.
- Besonders Mischungen mit kleinen Anteilen Metakaolin zeigten sehr geringe RV-Werte.
- Mit und ohne Rückprallminderer wurden keine signifikanten Unterschiede im Rückprallanteil festgestellt.

## Zams II

Vom 23.-27.4. 2018 fanden Spritzversuche in Zams statt (ZAMS II). Als Bindemittel wurde ein speziell für die Versuche erstellter Premix aus CEM I, Hüttensand, Metakaolin und Feinstkalzit verwendet. Die Auswahl des Bindemittels ergab sich aus den Ergebnissen von zahlreichen Vorversuchen und den Großspritzversuchen im ersten Forschungsjahr. Bei diesen Versuchen kam ein Sika Spritzmobil mit integrierter EB-Dosierung zum Einsatz (Abb.6)

Ein Schwerpunkt der 2. Großspritzversuche lag auf der Untersuchung von Einflussparametern hinsichtlich der Verarbeitbarkeit, insbesondere unterschiedlicher Leim-, Luft und Wassergehalte. Insbesondere sollten folgende Aspekte bei unterschiedlichen Leistungen, EB-Gehalten, W/B-Werten, Leimvolumina, Bindemittelgehalten und Sanden (carbonatisch und silikatisch) untersucht werden:

- Pumpbarkeit
- Spritzbildbegutachtung
- Rückprallentwicklung
- Frühfestigkeitsentwicklung
- Festbetoneigenschaften

Die Rezepte sind in Tabelle 5 angeführt. Zum Vergleich der Versuche wurde eine im Einsatz für Großtunnelprojekte befindliche Spritzbetonrezeptur der tba Zams gespritzt.



**Abbildung 6: Spritzmobil Sika PM500C**

**Tabelle 1: Rezepturen Großspritzversuche Vergleich SOLL – IST (Rezeptur A9 enthält 4,2% Stabilisierer)**

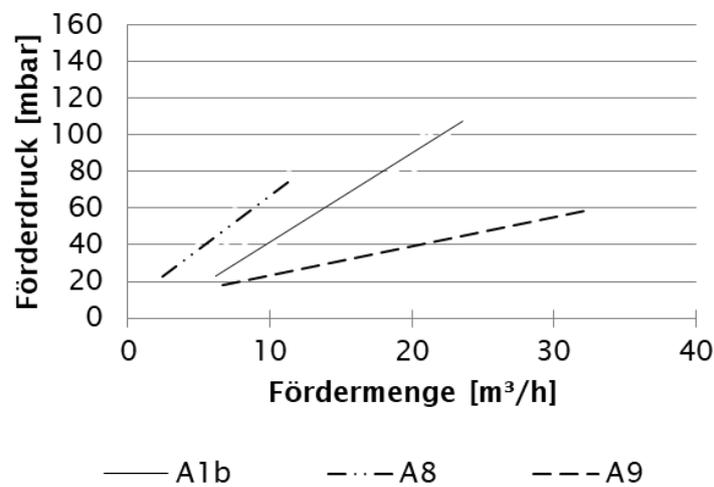
V.Nr.	Beschreibung		Zement	GK 0/4	GK 4/8	GK < 0,125 mm	Wasser	Fließmittel	Luftporenbildner
			[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]	[kg/m³]
A1a	Referenz	Soll	420	1374	458	132	201	2,52	0,00
		Ist	409	1355	453	130	200	2,47	0,00
A2(1b)	Referenz	Soll	420	1374	458	132	201	2,52	0,00
		Ist	398	1370	441	130	197	2,40	0,00
A3	LV verringert, Luft erhöht	Soll	339	1374	458	132	163	2,71	1,36
		Ist	303	1403	407	130	155	2,41	1,21
A4	W/B erhöht	Soll	400	1374	458	132	208	2,40	0,00
		Ist	400	1372	452	131	208	2,40	0,00
A5 (o.W.n.)	LV verringert, Luft erhöht	Soll	380	1367	456	131	183	2,66	1,14
		Ist	380	1356	461	131	182	2,67	1,14
A5	LV verringert, Luft erhöht	Soll	380	1367	456	131	183	2,66	1,14
		Ist	375	1339	455	129	192	2,63	1,13
A6	Referenz mit erhöhter Luft	Soll	420	1235	412	119	201	2,31	1,68
		Ist	403	1243	400	118	196	2,22	1,61
A7	ABM verringert	Soll	420	1374	458	132	201	1,68	0,00
		Ist	410	1335	443	128	197	1,63	0,00
A8	Urgestein Sand	Soll	420	1283	458	77	201	2,94	0,00
		Ist	415	1274	455	76	200	2,91	0,00
A9	tba Mischung	Soll	420	1355	452	126	204	5,46	0,63
		Ist	423	1376	444	127	205	5,50	0,63

Die Förderbedingungen wurden genau dokumentiert (Tabelle 6) und für die meisten Mischungen erfolgte eine rheologische Untersuchung mit Ausbreitmaß, Trichterauslaufzeit und dem Rohr-Rheometer Sliper (Abbildung7), sowie die Prüfung der Filtratwassermenge.

**Tabelle 6: Pumpendrucke und Angaben zu Spritzvorgang**

V.-Nr. (Rezept)	Beschreibung	Kolbenhöhe	Spritzzeit	Fördermenge voreingestellt	Pumpendruck
		[ ]	[mm:ss]	[m³/h]	[bar]
A1 (1a) 6%	Kisten	13	01:21	12	45
A1 (1a) 8%	Kisten	15	01:34	12	50
	Stollen (Gitter)	22	02:16	12	60
	Ortsbrüst	66	06:44	12	60
A2 (1b)	Kisten	16	01:35	12	70
7%	Stollen (Gitter)	58	05:38	12	70
	Außenbereich	18	01:45	12	70
A3 (2) ABRUCH KEIN PUMPEN MÖGLICH					
A4 (4)	Kisten	13	01:35	12	52

	Stollen (Gitter)	37	02:35	16	63
	Außenbereich	58	n.b.*	16 - 20	73 (20)
A5	Außenbereich	25	02:00	12 auf 8	> 200
	Kisten	23	04:23	6	> 200
	Außenbereich	70	n.b.*	6	> 200
A6	Kisten	21	02:02	12	57
	Stollen (Gitter)	23	01:32	20	71
	Außenbereich	68	04:17	25,5 - 16,5	76 (25,5)
A7	Kisten	18	01:43	12	66
	Außenbereich	97	n.b.*	12-25,5	84 (15)
A8	Kisten	20	01:55	12	63
	Stollen (Gitter)	39	03:38	12	63
	Außenbereich	63	n.b.*	20-25,5	105 (25,5)
A9	Kisten	23	02:09	12	49
	Stollen (Gitter)	36	03:28	12	49
	Außenbereich	59	n.b.*	20	57 (20)
	Außenbereich	12	n.b.*	25,5	66 (25,5)



**Abbildung 7: Pumpprognosen ermittelt mit Sliper der Rezepturen A1b, A8, A9**

Die Ergebnisse sind in einem eigenen Bericht dokumentiert und auszugsweise in Tabelle 7 wiedergegeben. Die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen laufen noch.

**Tabelle 7: Übersicht Ergebnisse Zams II**

Rezept	Zusammensetzung	Zement kg/m <sup>3</sup>	Leim l/m <sup>3</sup>	Wasser l/m <sup>3</sup>	ABM cm	Luftgehalt	Filtratw. 15 min	Fließgrenze (Sliper)	Viskosität (Sliper)
1a 6%	Referenz	420 CEM II M	401	201	63,5	1,3	155	-0,46	3,74
1a 8%	Referenz	420	401	201					
1b 7%	Referenz	420	401	201	62,0	1,2	145	-1,11	3,59
2	LV verringert, Luft erhöht	339	401	201	56,5	8,7	80	0,76	4,70
4	W/B erhöht	400	401	208	63,0	2,9		-0,54	2,60
5 (o.W.N.)	LV verringert, Luft erhöht	380	405	183	52,5	6,5	100	-0,16	6,02
5				+10				0,38	2,78
6	Referenz mit erhöhter Luft	420	461	201	64,0	8,7	140	0,16	2,17
7	ABM verringert	420	401	201	37,0	3,2	110	0,98	3,60
8	Silikatische Gesteinsk.	420	384	201	49,0	4,2	120	0,52	4,46
9	tba-Mischung	420	407	204	64,0	6,6	290	0,47	1,22
Kurzzeich.	Leistung Hübe/min	Pumpdruck	J	DF 6h N/mm <sup>2</sup>	DF 28 N/mm <sup>2</sup>	$\rho_{28}$ kg/d m <sup>3</sup>	WU mm	RV kg/to	Rückprall %
1a 6%	13	45	J2	2,2	49,2	2,4		0,29	9,9
1a 8%			J2	3,6	54,0	2,42		0,27	
1b 7%	16	70	J3	5,2	65,4	2,41	6	0,28	11,1
2	Abbruch	>200							
4	13	52	J2	2,8	54,5	2,40	4	0,29	7,6
5 (o.W.N.)	Abbruch								
5	23	>200	J2	3,3	66,5	2,39		0,28	
6	21	57	J2	3,7	55,6	2,42	7	0,28	6,0
7	18	66	J2	3,6	65,4	2,35		0,30	
8	20	63	J2	4,7	49,0	2,43	10	0,32	11,6
9	23	49	J1	2,9	57,0	2,40	12	0,74	9,6

Die erforderlichen Frühfestigkeiten wurden mit dem CEM II-B-M (S,L,Q) reduziertem Portlandzementklinkergehalten gut erreicht, die 6 Stunden Festigkeiten konnten durch Feinstkalzit-Zusatz

und dichte Bindemittelpackung gesteigert werden. Die Mischungen mit  $420 \text{ kg/m}^3$  dieses Bindemittels ließen sich auch gut spritzen (bis auf jene, bei denen man bewusst die Grenzen auslotete) und der Rückprall war sehr gering. Für die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen wurden eine große Zahl an Bohrkernproben gewonnen. Die erzielten RV Werte liegen deutlich unter denen üblicher RV-Rezepte. Für die Verarbeitung konnten notwendige Leimgehalte festgelegt werden. Die Einführung von Feinluft erwies sich als positiv, sie hilft aber nicht, wenn zu wenig Leim in der Mischung enthalten ist. Das Ausbreitmaß ist nicht zwingend das alleinige Maß für gute Verarbeitbarkeit. Sliper Messungen und Filterpresse geben wertvolle zusätzliche Informationen.

### ZaB

Die Spritzversuche am Zentrum am Berg (Erzberg) wurden im Berichtszeitraum vorbereitet und fanden vom 30.7. bis 2. 8. In Eisenerz statt. Daher wird im 3. FJ darüber berichtet.

Ziele sind der Vergleich von Dauerhaftigkeitsaspekten, speziell Sulfat/Thaumasit von Mischungen mit Metakaolin oder Silikastaub, der Einfluss des Alkali- und Sulfatgehaltes in den Mischungen mit Zementen mit unterschiedlichen  $C_3A$ -Gehalt und Beschleunigern mit unterschiedlichem Aluminiumgehalt, Aluminium/Sulfat-Verhältnissen und unterschiedlicher Dosierung, sowie der Vergleich zu Mischungen ohne Feinkalzit. Außerdem wurden erfolgreich  $75 \text{ m}^3$  einer optimierten Mischung im Vortrieb gespritzt.



**Abbildung 8: Blick vom Versuchsgelände des ZaB über den Erzabbau nach Eisenerz.**



**Abbildung 9: Spritzen von Kisten im Portalbereich (Versuchsgelände des ZaB)**

### AP 6 Auswertung und Beurteilung der Spritzbetonversuche

Im Arbeitspaket 6 bedarf es einer Umstrukturierung: Das laufende Arbeitspaket 6b wird vorgeeicht und damit 6a „Technologische Eigenschaften“. Das laufende Arbeitspaket 6c „Analytik und

Auswertung“ wird in das neue Arbeitspaket 6b „Dauerhaftigkeit“ integriert, AP6d wird damit AP6c „Nachhaltigkeitsbewertung Teil II (Spritzbeton)“.

### AP 6a Technologische Eigenschaften

Teile der Ergebnisse wurden unter Punkt 5 vorweg berichtet. Zusammenfassend kann gesagt werden:

#### Trockenspritzverfahren

Für die zwei Versuchsserien Wietersdorf I und II liegen alle Ergebnisse vor. Die Ergebnisse, zeigen, dass durchaus Potential besteht, die Spritz-Bindemittel mit intelligent ausgewählten Zumahl-/Zusatzstoffen zu vermischen ohne die hohen Frühfestigkeiten zu sehr abzumindern und dass es gleichzeitig möglich ist den RV-Wert signifikant zu reduzieren.

Neben den oben unter 2.2. angeführten Ergebnisse sind hier die die Ergebnisse der Verarbeitbarkeit, der Frühfestigkeiten und der 90 Tage Festigkeiten in den folgenden Abbildungen 10 bis 12 wiedergegeben. Die Zuordnung zu den Mischungen findet sich in Tabelle 4 und Abbildung 4.

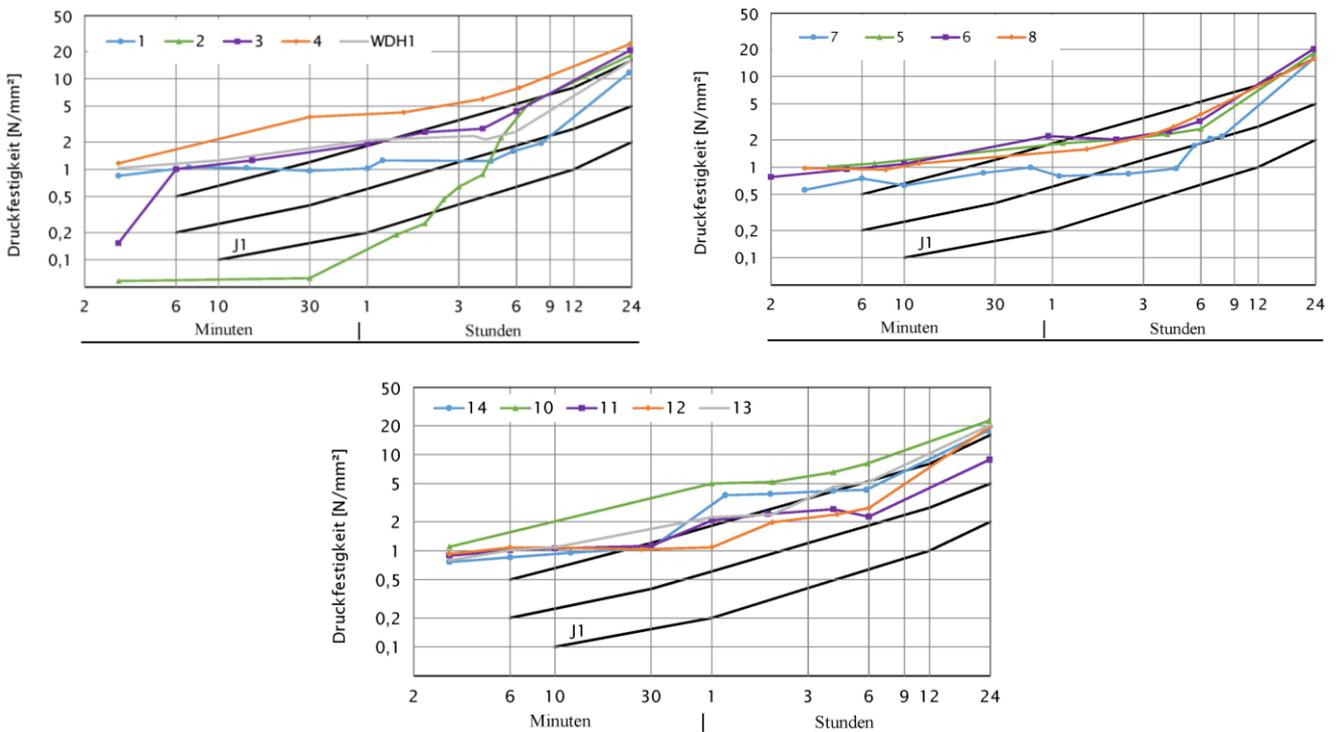


Abbildung 10: Frühfestigkeiten der Trockenspritzbetone

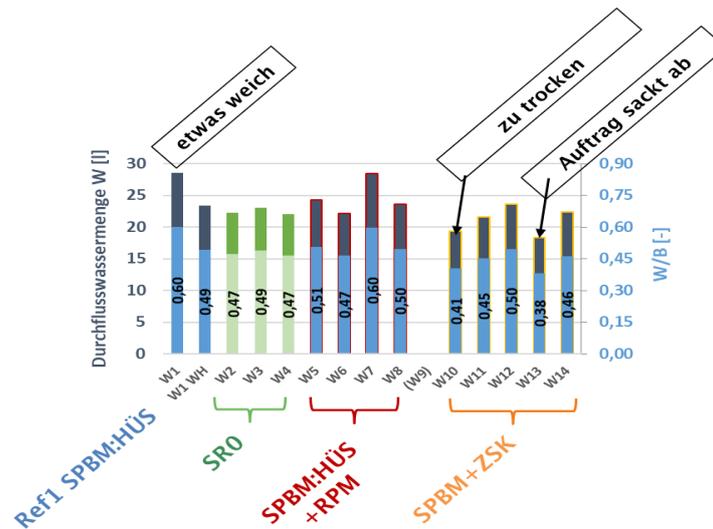


Abbildung 11: Wassermengen und W/B-Werte im Bezug zur Verarbeitbarkeit

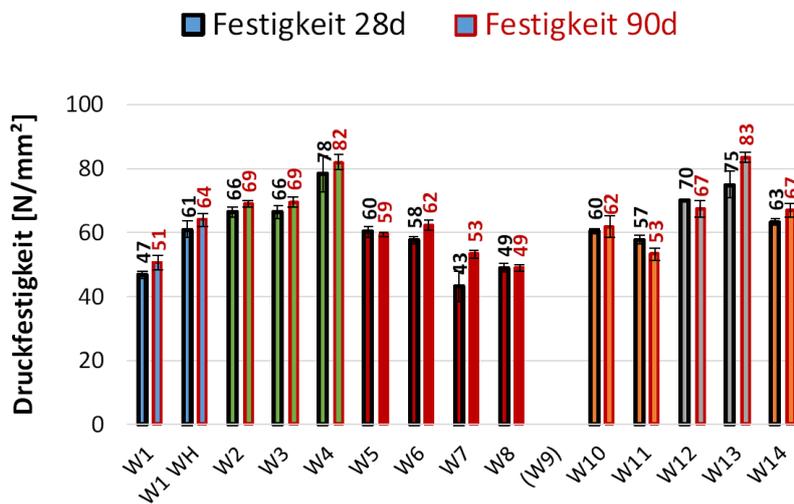


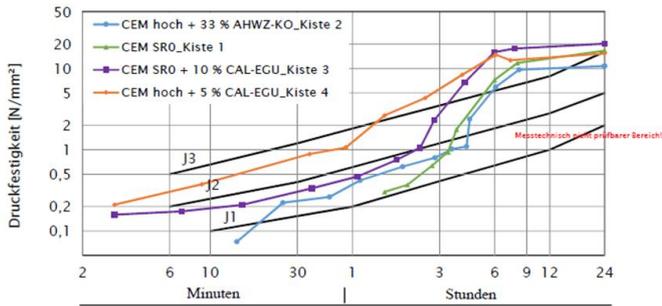
Abbildung 12: 28 d und 90 d Druckfestigkeiten (blau=Referenz, grün = Mischungen mit SR0, rot = mit RPM, orange/grau= mit Zusatzstoffkombinationen), Angabe der einfachen Standardabweichung (±) als Fehlerindikator

### Nassspritzversuche

Für die Versuchsserie Zams I liegen alle Ergebnisse vor, von Zams II sind diese zum Teil noch in Ausarbeitung. Die Ergebnisse, zeigen, dass mit optimierten Bindemittel auf Basis Portlandzement oder C<sub>3</sub>A-armen Portlandzement mit Hüttensand, Feinstkalzit und einem sehr feinen Puzzolanischen Zusatzstoff ein sehr gut verarbeitbarer Spritzbeton mit exzellenten Festbetoneigenschaften und hoher Dauerhaftigkeit hergestellt werden kann.

Neben den oben unter 2.2. angeführten Ergebnisse sind hier die Ergebnisse der Frühfestigkeiten und der Festigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten für Zams I in den folgenden Abbildungen 13 bis 15 wiedergegeben. Die Zuordnung zu den Mischungen findet sich in Tabelle 3 und Tabelle 7.

Frühfestigkeit Spritzversuche Zams 19-22.06.2017



Frühfestigkeit Spritzversuche Zams 19-22.06.2017

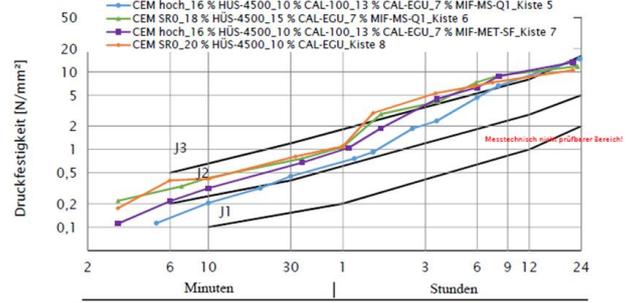


Abbildung 13: Frühfestigkeiten Zams I

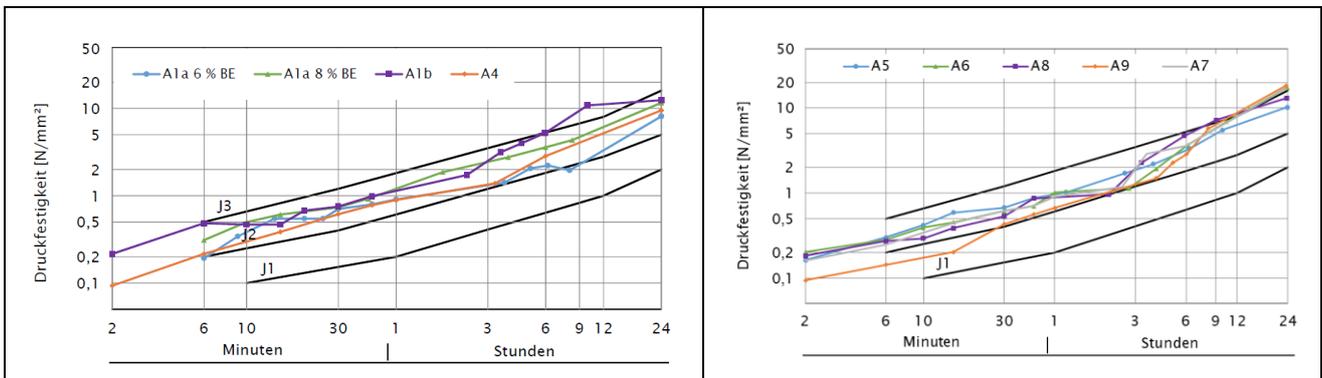


Abbildung 14: Frühfestigkeiten Zams II

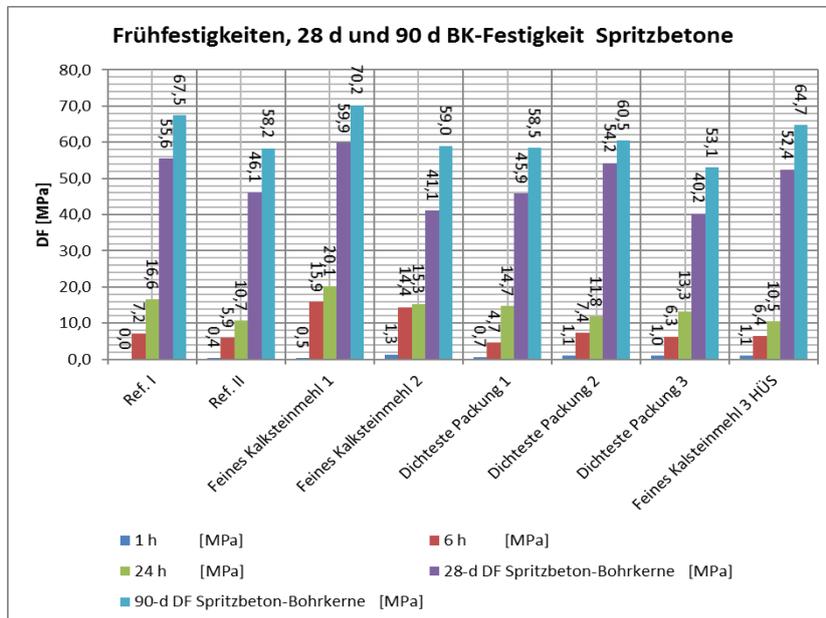
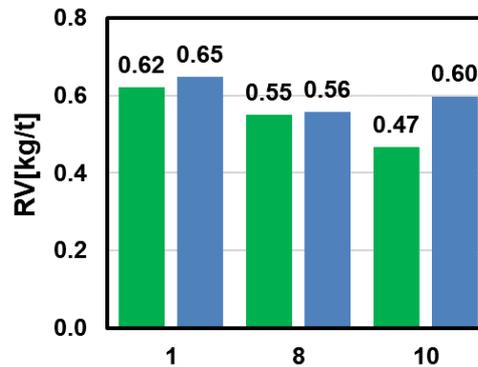


Abbildung 15: Gegenüberstellung der Festigkeiten zu unterschiedlichen Zeitpunkten, Zams I (von Zams II noch nicht alle Zeitpunkte verfügbar)

**AP 6b Dauerhaftigkeitsuntersuchungen (Experimente, Analytik und Auswertung)**

Die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen wurden den jeweiligen GSV zugeordnet. Sie werden daher teilweise auch in AP 5 schon besprochen. Für Wietersdorf I und Zams I liegt ein eigener Bericht bei, die Untersuchungen Wietersdorf II und Zams II sind noch nicht abgeschlossen.

Bei den Trockenspritzmischungen (Wietersdorf I) zeigte die Zugabe von Silikastaub nicht den gewünschten Effekt einer Reduktion des RV-Wertes bei der Prüfung nach 56 Tagen. Da die puzzolanische Reaktion über längere Zeit abläuft, wurde der Auslaugversuch nach 560 Tagen bei der Referenzmischung (1) und den Mischungen mit Silikastaub (8) bzw. Flugasche (10) wiederholt. Die Ergebnisse zeigten nur bei der Mischung 10 (mit Flugasche) eine deutliche Reduktion des RV-Wertes zwischen 56 und 560 Tagen.



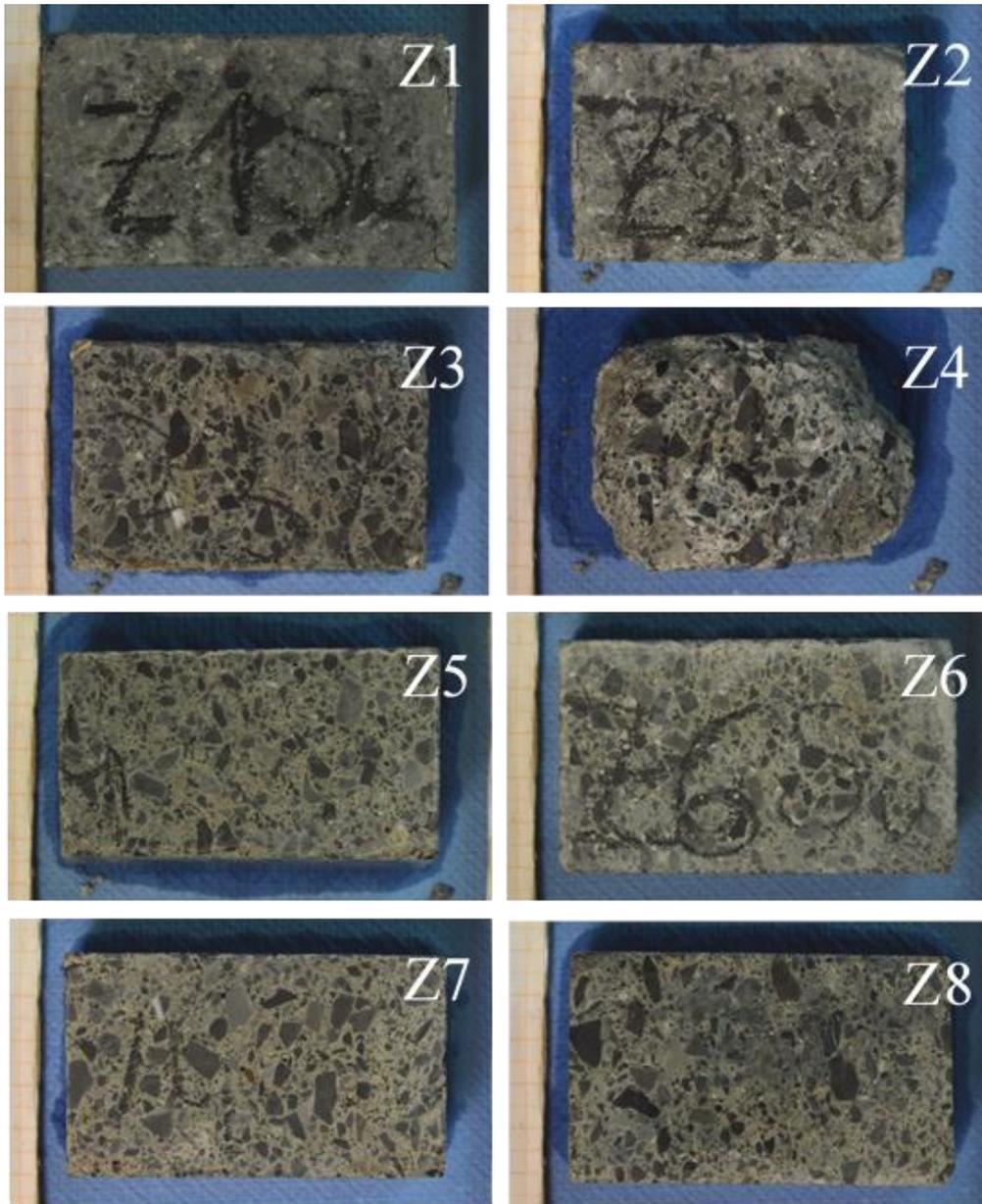
**Abbildung 16: Ergebnisse RV nach 560 Tagen (grün) im Vergleich zu den Ergebnissen nach 56 Tagen (blau)**

Bei den Nassspritzmischungen (Zams 1; Z1-Z8) wurden die RV-Versuche nur nach 56 Tagen durchgeführt und liegen in einem Bereich von 0,32-0,68 kg/t. Die beschleunigten Karbonatisierungsraten (2% CO<sub>2</sub>) liegen zwischen 0,6 – 1,5 mm/√d und die Cl-Diffusionskoeffizienten in einem Bereich von 2,0 – 7,5 \* 10<sup>-12</sup> m<sup>2</sup>/s. Weitere Analysen wie z.B. mittels Thermogravimetrie zeigen, dass Karbonatisierung und RV-Ergebnisse stark abhängig vom Portlanditgehalt sind. Sekundär ist natürlich auch die Porenstruktur von Bedeutung. Bei der Ca-Auslaugung zeigt sich auch eine Korrelation zu den Cl-Diffusionskoeffizienten bedingt durch den umgekehrt gerichteten Prozess der Diffusion aus bzw. in den Bohrkernen. Dies deutet auf eine untergeordnete Rolle der Ab- bzw. Adsorption von Cl-Ionen beim Vergleich des Cl-Transportes in diesen 8 Mischungen hin. Beim Vergleich der Ergebnisse hat sich für diese 8 Nassspritzmischungen gezeigt, dass je niedriger der RV-Wert ist, desto niedriger ist auch der Chlorid-Diffusionskoeffizient aber desto höher ist die Karbonatisierungsrate. Das bedeutet, dass die Substitution des Zements mit Metakaolin, Silikastaub, Kalksteinmehl und AHWZ (Z5-Z8) zu einer Verbesserung des RV-Wertes und des Cl-Diffusionskoeffizienten aber zu einer Verschlechterung bei der Prüfung der beschleunigten Karbonatisierungsrate geführt hat.

Die Prismen von Zams I zeigen nach 10-monatiger Auslagerung in Sulfatlösung bei niedriger Temperatur erste Schädigungen an Ecken und Kanten, mit der Ausnahme der Probe Z5 die noch keine Schäden zeigt und der Probe Z4, die bereits stark geschädigt ist. Die Mischungen von Wietersdorf I weisen nach 5-monatiger Auslagerung noch keine sichtbaren Schädigungen auf. Der Längenänderungstest zeigt, dass Mischungen mit Zusatz von Metakaolin bzw. mit nicht-C<sub>3</sub>A-freiem Zement und geringen Zusatzstoffgehalten die höchsten Dehnungen erfahren, wohingegen die Expansion für Mischungen mit großen Mengen an hydraulischen und puzzolanischen Zusatzstoffen geringer ist. Der anscheinend negative Einfluss von Metakaolin wird zukünftig tiefergehend untersucht werden. Eine mögliche Erklärung hierfür wären bisher nicht berücksichtigte Einflüsse durch die bei der Längenänderung verwendeten Trocknungszyklen. Im Zuge der angelaufenen Dauerhaftigkeitstests für die Betone der neuesten Spritzversuche aus dem Frühjahr 2018 (Zams II) wird der Einfluss von Metakaolin durch zusätzliche Auslagerungstests ohne Trocknungszyklen weiter untersucht.

Die Untersuchungen von Ausgangsstoffen, Endprodukten und regelmäßig entnommenen Flüssigkeitsproben im Zuge der Pulvertests zeigen, dass der Auflösung und/oder Umwandlung von Portlandit, AFm-Phasen und C-S-H die Neubildung von Ettringit und Calcit gegenübersteht. Dieser Vergleich der Ergebnisse mit den Resultaten der Längenänderungsprüfung offenbart den Zusammenhang zwischen chemischer Beständigkeit gegen Sulfatangriff und Expansion der Prismen. Die Mischungen mit den höchsten Expansionswerten im Längenänderungstest bilden im

Pulvertest überdurchschnittlich viel Ettringit. Allerdings muss für einen aussagekräftigen Vergleich der beiden Methoden auch die Porosität und Porengrößenverteilung berücksichtigt werden.



**Abbildung 17: Prismen der Spritzbetone von Zams I nach 10 monatiger Auslagerung bei Thaumasilagerung (2% Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> + Gips + Kalzit bei 5°C)**

Die gemessenen Porositäten sind innerhalb der 8 Mischungen von Zams I sehr ähnlich; die Porengrößenverteilung zeigt allerdings deutliche Unterschiede. Der Modalwert der Porengrößenverteilungskurve ist für Z1, Z2, Z5 und Z6 deutlich geringer; hingegen ist der Kapillarporenanteil (10 – 10000 nm Durchmesser) für die Mischungen Z1, Z3 und Z4 (geringe/keine Zusatzstoffe) deutlich erhöht.

### AP 6c Nachhaltigkeitsbewertung, Teil 2 Spritzbeton

Bei der Nachhaltigkeitsbewertung wurde nach der Beurteilung des Global Warming Potentials (GWP) nach der additiven Aufsummierung der Einflüsse der einzelnen Ausgangsstoffe der Mischungen (Abb. 18) auch die Situation nach dem Spritzvorgang mit Berücksichtigung der Rückprallverluste und dem zusätzlich an der Düse zugegebenen Erstarrungsbeschleuniger gegenübergestellt (Abb. 19). Deutlich ist dabei eine Verschiebung der Bewertung zu erkennen.

Die rot markierten Versuche schneiden besonders gut bezüglich ihres GWP ab. Im Laufe im 3. FJ werden auch „Functional Units“ (z.B. kg CO<sub>2eq</sub>/ Frühfestigkeit) in die Betrachtungen mit einbezogen werden.

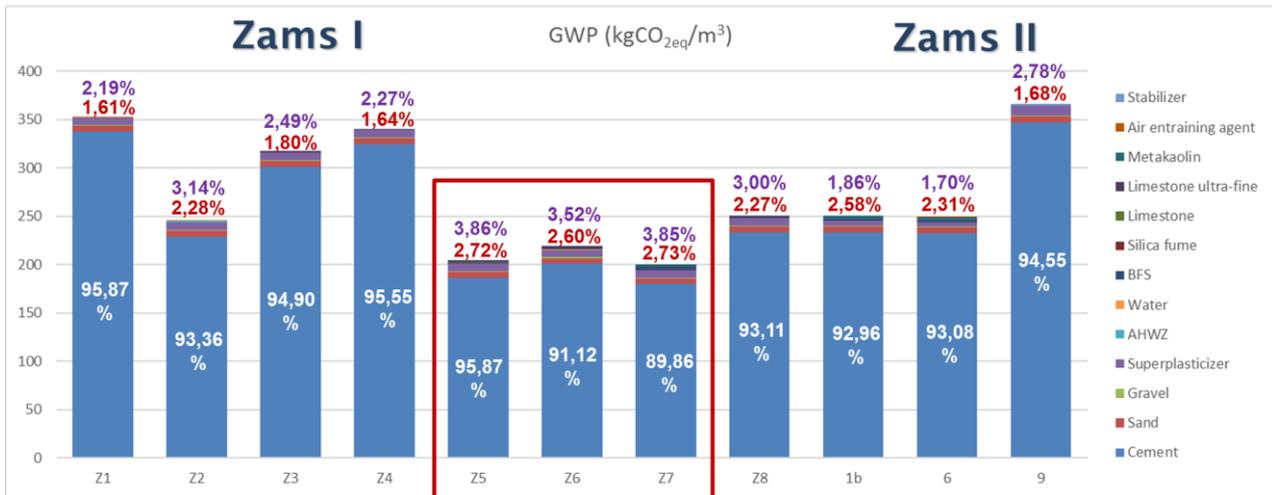


Abbildung 18: Berechnung Global Warming Potential der Mischgüter von Zams I und Zams II

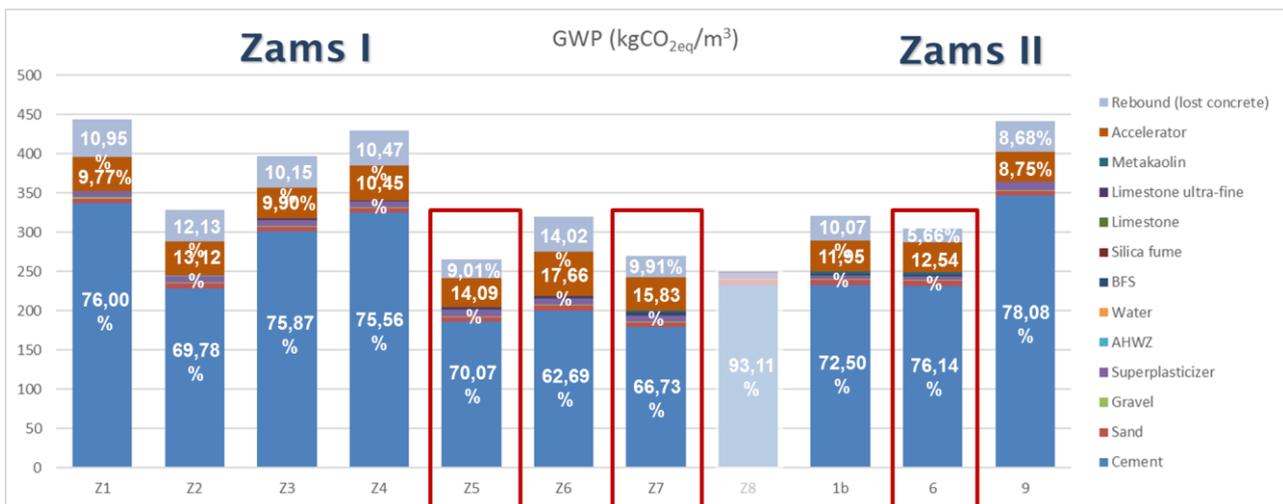


Abbildung 19: Berechnung Global Warming Potential des aufgetragenen Spritzbetons der Versuche Zams I und Zams II

### AP 7 Grundlegende Reaktionsmechanismen

Die grundlegenden Reaktions- und Schädigungsmechanismen werden mit neuen Methoden erforscht, um später die Kenntnisse für die Herstellung von dauerhaften Spritzbetonen zu erweitern.

#### AP 7a: Hydratation Spritzbeton

Zusammenfassend konnten aus den Untersuchungen des Jungen Spritzbetons folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

- Sehr feine Kalkstein- und Dolomitmehle (im Folgenden auch Feinstkalkzit oder Feinstdolomit genannt) erhöhen die Frühfestigkeit und beschleunigen die Hydratation in Zusammenhang mit alkalifreien Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> Erstarrungsbeschleunigern. Dieser Effekt ist umso höher, je größer die volumenspezifische Oberfläche der pulverförmigen Stoffe. Es wurde für den verwendeten Zement und konstantem W/B =0,5 und W/Z=0,83 ein logarithmischer Zusammenhang zwischen der 6h DF und der volumenspezifischen Oberfläche der Feinstoffe festgestellt

(Abbildung 20). Auf die Endfestigkeit (28 Tage) haben die als inert geltenden Zusatzstoffe dabei keinen Einfluss.

- Die dormante Periode wird durch die Zugabe von Feinstkalkzit verkürzt.
- Die Frühfestigkeit von beschleunigten Mörteln ähnlicher Mischungszusammensetzung kann mittels Kalorimeter (kum. Hydratationswärme) mit hoher Genauigkeit vorausgesagt werden.
- Mit der zeitaufgelösten Messung im Röntgendiffraktometer (in situ XRD) kann die Änderung der Kristallphasen während der Hydratation verfolgt und analysiert werden (Abbildungen 21 und 22).
- Ultrafeines Kalksteinmehl trägt zur „Stabilisierung“ von Ettringit (verzögerte Umwandlung in Monosulfat) und zur Ausbildung von Monocarbonat bei. Die Erkenntnisse dazu aus der Literatur treffen auch für beschleunigte Systeme zu.

Folgende weiterführende Untersuchungen sollen weitere Erkenntnisse erbringen: Systematisches Auspressen und Analyse der Porenlösung an beschleunigten Mörtelproben mit PZ-Quarz-Mikrofüller Anteilen im Bindemittel um Zusammenhänge zwischen fester und flüssiger Phase des erhärtenden Bindemittelleims herzustellen.

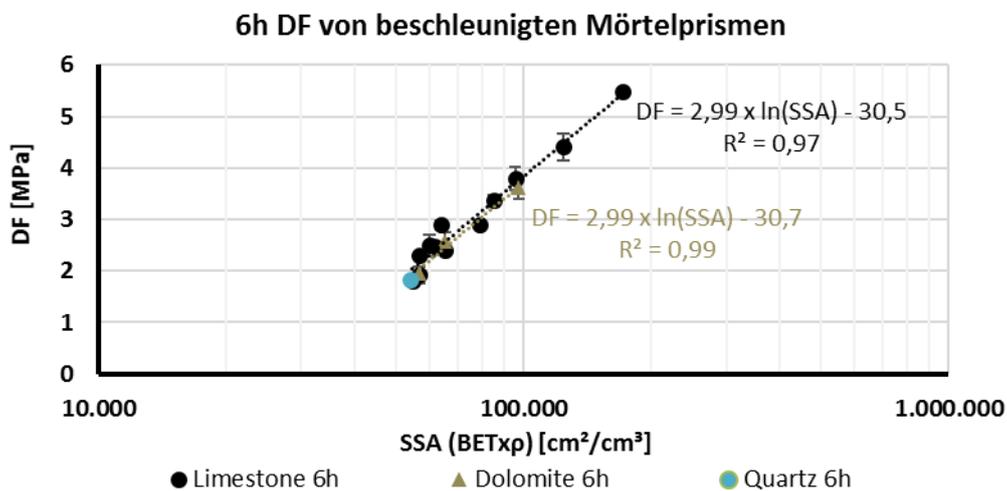
Thermogravimetrie (TG) zur Bestimmung von Portlandit, und CaCO<sub>3</sub> Anteilen zu verschiedenen Zeitpunkten.

Morphologie der Hydratphasen von beschleunigten Leimproben im Rasterelektronenmikroskop. Analyse der Porenradienverteilung während der Hydratation in Abhängigkeit des EB- Anteils an abgestopften Leim- und Mörtelproben mittels Quecksilberdruckporosimetrie (MIP).

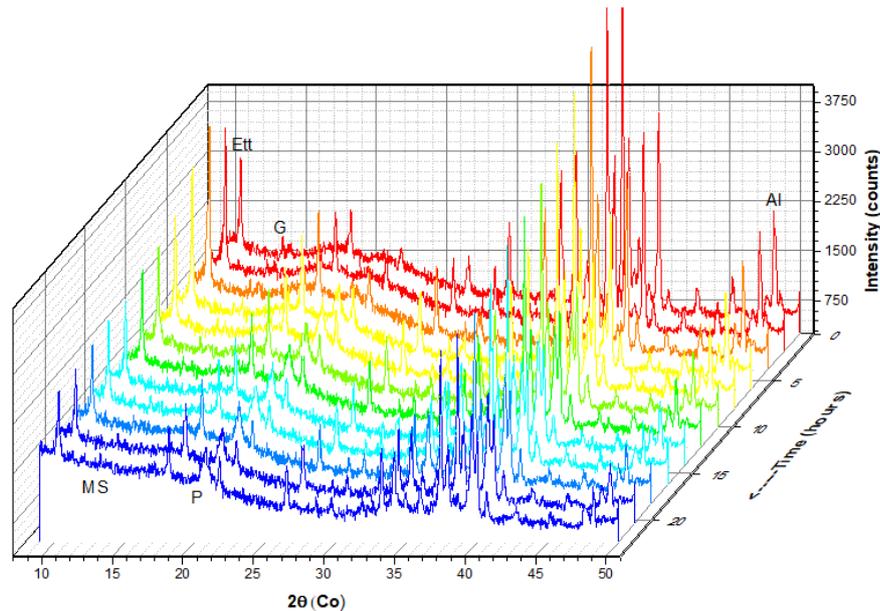
Verfolgen der Hydratationswärmeentwicklung direkt bei EB- Zugabe im Kalorimeter mittels speziellen Probenbehältern (internal mixing unit).

Untersuchungen zur Untermischung/Verteilung des EB im Labor und auf der Baustelle gespritzten Proben.

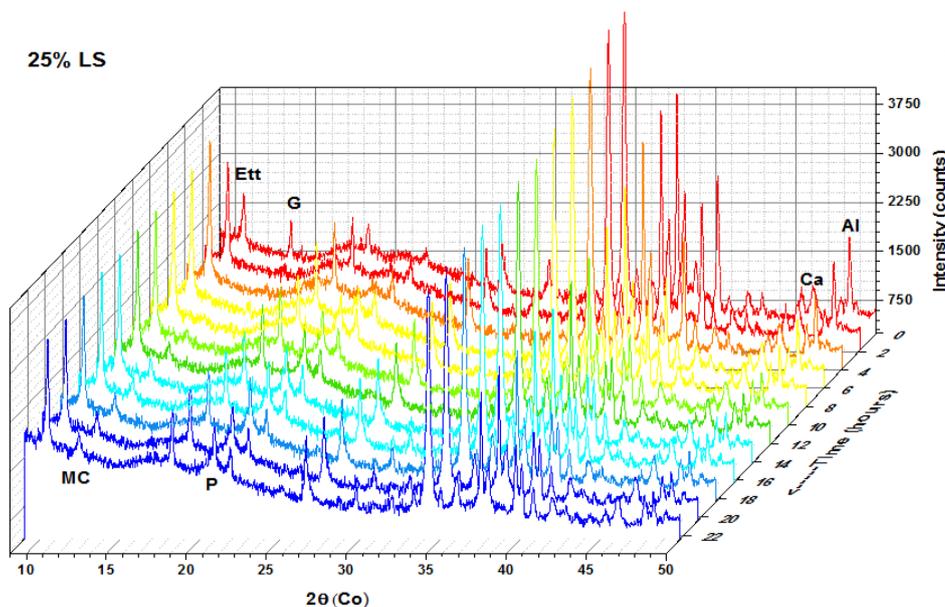
Details siehe Bericht Hydratation.



**Abbildung 20: Zusammenhang zwischen der Volumens-bezogenen Oberfläche der Körnung im Mörtel und der 6h Frühfestigkeit**



**Abbildung 21: In Situ XRD einer beschleunigten Leimprobe mit 100% Portlandzement (Ett = Ettringit; MS = Monosulfat; G = Gips; Ca = Calcit; Al = Alit; P = Portlandit)**



**Abbildung 22: In Situ XRD einer beschleunigten Leimprobe mit 75% Portlandzement und 25% Feinstkalzit (Ett = Ettringit; MC = Monocarbonat; G = Gips; Ca = Calcit; Al = Alit; P = Portlandit, LS = Limestone)**

**AP 7b: Dauerhaftigkeit**

Nachdem im 2. FJ große Mengen an unterschiedlichen gespritzten Proben vorlagen und geprüft wurden, konnten Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an den im GSV erzeugten Proben durchgeführt werden. Viele der Problemstellungen sind daher unter AP 6b behandelt.

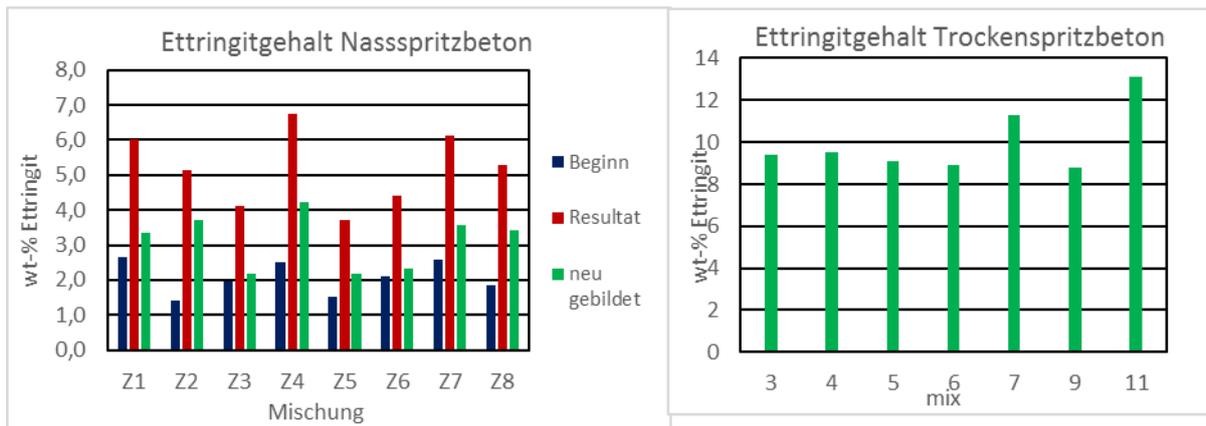
Da bei normalen Proben die Dauerhaftigkeit immer durch die Dichtigkeit der Matrix und die „Verletzlichkeit“ des Materials zusammen beeinflusst wird, wurden zusätzlich Untersuchungen an fein aufgemahlene Pulvern in z.B. sulfathaltigen Lösungen durchgeführt. So wird der Einfluss der Mikrostruktur verändert. 20 g des Pulvers wurden mit 400 ml einer 1%-igen Na<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-Lösung in Reaktionsgefäßen unter Rühren vermischt. Die Entwicklung von ausschlaggebenden

Fluidparametern wie pH, elektrischer Leitfähigkeit, Temperatur und Ionenkonzentrationen wurde durch regelmäßige Probenahme (10 sec, 1 min, 4 min, 15 min, 30 min, 1 h, 2 h, 6 h, 1 Tag, 3 Tage, 7 Tage) dokumentiert.

Die Analyse der Fest- und Flüssigphasen zeichnet insgesamt folgende Prozesse nach

- Lösung/Umwandlung von Portlandit, AFm-Phasen, C-S-H
- Bereitstellung von Ca und Al in der Flüssigphase
- Neubildung von Ettringit (Abbildung 23) und Calcit
- Entfernung von Ca, Al und  $\text{SO}_4$  aus der Flüssigphase

wobei sich diese Prozesse auch zeitlich überlappen können.



**Abbildung 23: Während des Tests neu gebildeteter Ettringit in den Nass- und Trockenspritzbetonproben (Zams I und Wietersdorf I), bestimmt durch Rietveld-Verfeinerung. Für die Nassspritzbetonmischungen ist auch die Menge an Ettringit zu Beginn des Tests und die danach bestimmte Gesamtmenge an Ettringit angegeben.**

Die Abnahme der Sulfatkonzentration in der Lösung und die Zunahme des Sulfatgehalts der Feststoffe ist ein Maß für die Neubildung von Ettringit. Es ergibt sich stets eine gute lineare Korrelation ( $R^2 > 0.7$ ) zwischen der Menge an aus der Lösung entferntem Sulfat und der Menge an aufgenommenem Sulfat bzw. der Menge an neu gebildetem Ettringit.

## AP 8 Neuentwicklung, Optimierung und Auswahl von Prüfverfahren und Analysemethoden

Bereits im ersten FJ wurde versucht die besten Prüfmethode für die Beurteilung der verschiedenen Angriffe zu verwenden. Beim Sulfatangriff und Sulfat/Thaumasitangriff zeigte sich z.B. dass mit einem Prüfverfahren nicht das Auslangen gefunden werden kann.

Für diese Angriffe wurden an gespritzten und ungespritzten Proben

- das SIA 262-1 Verfahren mit verschiedenen Modifikationen in den Lagerungsbedingungen
- das Pulververfahren, wie unter AP 7 beschrieben
- die Thaumasit/Sulfatauslagerung wie unter AP 6b beschrieben

Für die Chloriddiffusion kamen ebenfalls der verschiedene Methoden zur Anwendung

- Bohrkernauslagerung in Chloridlösung mit Scheibenabtrennung und potentiometrischer Bestimmung
- Ermittlung der Chlorideindringung an Prismen mittels Mikrosonde
- Pulvertests für Chlorid-Sorptionsverhalten.

Weitere Details für beide Bereiche finden sich im Dauerhaftigkeitsbericht.

## AP9 Empfehlungen

### Zusammenfassende bisherige, nicht endgültige Ergebnisse für die Praxis:

- Ein Teil des Spritz-Bindemittels kann gut mit abgestimmten Zusatzstoffen beim Trocken-spritzverfahren ersetzt werden. Eine Beschleunigung von SR0-Zementen ist mit abgestimmten kleinen Mengen an Calciumaluminatzementen sehr effektiv. Die Rückprallminderer konnten nicht überzeugen. Zusatzstoffkombinationen in potenziell dichter Packung mit Hüttensand, CAC und mikrofeinen Stoffen ergaben Spritzbetone sehr hoher Dauerhaftigkeit mit niedrigen RV-Werten. Weitere Auswirkungen auf Dauerhaftigkeit sind in Prüfung.
- Frühfestigkeiten im J3 Bereich mit Spritz-Bindemittel oder SR0 + Calciumaluminatzement möglich.
- Rezepturen mit speziellen Zusatzstoffkombinationen und dichter Packung bringen bei beiden Spritzverfahren einen vergleichmäßigten Verlauf der Festigkeitsentwicklung, sehr hohe Festigkeiten und zeigen bezüglich RV-Werten und WU ein hohes Dauerhaftigkeitspotenzial.
- Feinstkalzit kann effektiv die Frühfestigkeiten anheben. Eine Kombination mit anderen Zusatzstoffen ist meist sinnvoll. Eventuelle Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit sind zu beachten.
- Metakaolin ist ein interessanter neuer Zusatzstoff für Spritzbeton. Mischungen mit kleinen Anteilen Metakaolin zeigten sehr geringe RV-Werte.
- Spritzbetone mit CEM II-B-M Zementen, die für Spritzbeton optimiert sind, zeichnen sich durch gute Verarbeitbarkeit und Spritzbarkeit aus. Sie erreichen die erforderlichen Frühfestigkeiten und sehr gute Festbetoneigenschaften und Dauerhaftigkeiten.
- Forderungen an niedrigen RV-Wert und niedrige Karbonatisierung sind gegenläufig.
- Für die Verarbeitung konnten notwendige Leimgehalte festgelegt werden. Diese sind u.A. aber von den lokal verfügbaren Gesteinskörnungen abhängig. Die Einführung von Feinluft erwies sich als positiv für Verarbeitung und Rückprall, sie hilft aber nicht, wenn zu wenig Leim in der Mischung enthalten ist. Das Ausbreitmaß ist nicht zwingend das alleinige Maß für gute Verarbeitbarkeit. Sliper-Messungen und Filterpresse geben wertvolle zusätzliche Informationen.
- Je weniger Klinker im Mischgut umso höher wurde die EB-Dosierung bezogen auf den Klinkergehalt und in der Folge der Festigkeitsabfall.
- Die Verflüssigerauswahl ist genauso wichtig wie die Abstimmung des EB auf das Bindemittel.
- MiniShot ist ein effektives Hilfsmittel für Vorversuche im Labor.
- Nachhaltigkeitsbetrachtungen sind stark von gewählten Ansatz abhängig. Beschleunigerdosierung und Rückprallanteil sind starke Einflussfaktoren.

## 3. Projektteam und Kooperationen

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne SchlüsselmitarbeiterInnen und externe Partner/Dritteleister)?
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein.  
Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

Folgende Mitarbeiter/innen sind im Forschungsprojekt neu tätig

### Dissertanten:

Lukas Briendl

### Postdocs:

Marcella Ruschi Mendes Saade – Gastwissenschaftlerin

Die Arbeiten wurden neu in 4 Hauptgebiete (Betontechnologie, Hydratation, Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit) aufgeteilt.

Die unter dem Partner VÖZ mitarbeitende Firma TIWO wurde mit 1.1.2018 von der Baumit GmbH übernommen. Das Engagement im Forschungsprojekt bleibt aufrecht.

## 4. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?
- Wie werden die im Projekt geschaffenen Prototypen weiter verwendet?

Bei den Spritzversuchen Zams II wurde ein Versuchs-Bindemittel gemäß Normenbezeichnung CEM II/B-M (S,L,Q) 42,5 R eingesetzt, wie man es später produzieren könnte. Bei den Spritzversuchen am ZaB werden ebenfalls Bindemittelkombinationen getestet, die später als CEM II/B-M oder als neue Type AHWZ, zusammen mit CEM I eingesetzt werden könnten.

Die Erprobung des Slipers zur Beurteilung der Pumpbarkeit ist so weit fortgeschritten, dass dieses Prüfverfahren in eine Neuauflage der öbv-RL Spritzbeton möglich wäre.

### Studentische Abschlussarbeiten:

- Landler, A.: Arbeitstitel: Synthese von C- A-S-H Phasen in Anwesenheit von Kobalt, Chrom und Zink. M.Sc-Arbeit am Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Graz.
- Briendl, L.: Optimierung der Frühfestigkeit von dauerhaftem und ressourceneffizientem Nassspritzbeton. M.Sc-Arbeit am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, 12/2017.
- Stöger, J.: Environmental Comparison of Base Materials for Sprayed Concrete, M.Sc-Arbeit am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, 2017.
- Hödl, M.: A literature review of calcium leaching and sintering related to dry-mix-shotcrete. Masterprojekt am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie, TU Graz, 01/2018
- Kempf, J.: Verarbeitbarkeit von Spritzbeton – Nassmischgut, Einfluss des Leimgehalts, des Feinteilgehalts und der Zementart. Bachelorarbeit OTH Regensburg, 9/2017.
- Kurz, D.: Workability of advanced shotcrete systems – effect of different cementitious materials and fines. Masterarbeit OTH Regensburg, 8/2017.
- Götz, L., Haug, D.: Untersuchungen zur Pumpbarkeit von Nass-Mischgut von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential. Bachelorarbeit OTH Regensburg, 1/2018.
- Viellehner, M.: Arbeitstitel: Untersuchungen zur Verarbeitung von Nass-Mischgut. Bachelorarbeit OTH Regensburg, 9/2018.

### Publikationen abgeschlossen:

- Thumann, M., Kusterle, W.: Durable and Sustainable Shotcrete - Requirements Concerning Workability and Early Strength Development. In: Mähner, D. et al. (Hrsg.): Shotcrete for Underground Support XIII, September 3 – 6, 2017, Irsee, Germany, ECI, 2017.
- Sakoparnig, M., Baldermann, A., Thumann, M., Mittermayr, F., Kusterle, W.: Bestimmung der experimentellen Calcium-Auslaugung an Spritzbetonbohrkernen: Methodenvergleich und Update. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Berichtsband (CD-ROM) der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12. 1. 2018, Eigenverlag, 2018.
- Mittermayr, F., Thumann, M., Baldermann, A., Lindlar, B., Stenger, Ch., Huber, H., Bauer, E., Scheutz, R., Kusterle, W.: Instandsetzung Bosruck-Eisenbahntunnel: Entwicklung von Spritzbeton mit erhöhtem Widerstand gegen Thaumasil-Sulfatangriff. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Berichtsband (CD-ROM) der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12. 1. 2018, Eigenverlag, 2018.
- Kusterle, W., Thumann, M., Mittermayr F.: ASSpC- ein Forschungsprogramm für den Spritzbeton von Morgen. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Berichtsband (CD-ROM) der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12. 1. 2018, Eigenverlag, 2018.
- Stauffacher, A., Galan, I., Juilland, P., Thumann, M., Stenger, Ch., Baldermann, A., Mittermayr, F., Lindlar, B., Kusterle W.: Einfluss von Hüttensand und ultrafeinem Kalksteinmehl auf die Hydratation von Jungem Spritzbeton. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Berichtsband (CD-ROM) der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12. 1. 2018, Eigenverlag, 2018.
- Juhart J.; Briendl, L., Mittermayr F., Thumann, M., Röck, R., Kusterle W.: Optimierte Eigenschaften von Spritzbeton durch kombinierte Zusatzstoffe. In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton-Technologie 2018. Berichtsband (CD-ROM) der 12. Fachtagung in Alpbach, 11.+12. 1. 2018, Eigenverlag, 2018.
- Kusterle, W. Thumann, M.: Neue Trends in der Spritzbeton-Technologie an ausgewählten Beispielen. Tagungsunterlagen DBV—Regionaltagung, München-Ottobrunn, 27.2.2018.

- Saade, M.R.M., Passer, A. & Mittermayr, F.: A Preliminary Systematic Investigation onto Sprayed Concrete's Environmental Performance. *Procedia CIRP*, 69, 2018. pp.212–217. Available at: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2212827117308880>.
- Galan, I., Stauffacher, A., Mittermayr F., Thumann M., Kusterle W., Juillard, P., Stenger C., Lindlar, B.: Estudio de las reacciones de hidratación temprana en el hormigón proyectado. HAC2018, Congreso Iberoamericano de Hormigón Autocompactante y Hormigones Especiales, Valencia, 5 y 6 de Marzo de 2018.
- Steindl, F., Baldermann, A., Galan, I., Sakoparnig, M., Mittermayr, F.: Removal of heavy metal ions during C-S-H precipitation – CASH II, Dübendorf, Schweiz, 22. – 24. April 2018.
- Galan, I., Thumann, M., Briendl, L., Röck, R., Steindl, F., Juhart, J., Mittermayr, F., Kusterle, W.: FROM LAB SCALE SPRAYING TO REAL SCALE SHOTCRETING AND BACK TO THE LAB. 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPRAYED CONCRETE – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support – Trondheim, Norway, 11. – 14. June 2018.
- Thumann, M., Kusterle, W.: Pumpability of wet mix sprayed concrete with reduced clinker content. 8<sup>th</sup> INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SPRAYED CONCRETE – Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support – Trondheim, Norway, 11. – 14. June 2018.

#### Publikationen in Bearbeitung:

- Review paper: Durability of Shotcrete (Leitung: Isabel Galan)
- Review paper: Shotcrete and Concrete Production in Life Cycle Assessments: A Systematic Literature Review (Leitung: Marcella Saade)
- Research paper: Sprayed concrete's life cycle environmental performance (Leitung: Marcella Saade)
- Thumann, M., Briendl, L., Sakoparnig, M., Steindl, F.R., Kusterle, W.: Spritzbetonforschung für dauerhaftere und nachhaltigere Tunnels. In. 4. Grazer Betonkolloquium, 20.+21. 9. 2018, TU Graz.
- Juhart, Briendl, Mittermayr, Röck, Thumann, Kusterle: Mischungsentwicklung von nachhaltigem Spritzbeton mit kombinierten Zusatzstoffen. In. 4. Grazer Betonkolloquium, 20.+21. 9. 2018, TU Graz.
- Steindl, F., Baldermann, A., Galan, I., Sakoparnig, F., Dietzel, M., Mittermayr, F.: A new test for combined Ca-leaching and sulphate resistance of cementitious materials – ICCRRR 2018, Kapstadt, Südafrika, 19. – 21. November 2018.
- Steindl, F., Baldermann, A., Galan, I., Dietzel, M., Mittermayr, F.: New testing methods for assessing the resistance of shotcrete to sulfate attack. In. Proc. 15<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2019), September 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2019, Prague.
- Juhart, J., Briendl, L., Röck, R., Galan, I., Thumann, M., Mittermayr, F., Kusterle, W.: PERFORMANCE OPTIMIZATION OF SHOTCRETE BY COMBINED FILLERS. In. Proc. 15<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2019), September 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2019, Prague.
- Mittermayr, F., Galan, I., Baldermann, A., Röck, R., Juhart, J., Kusterle, W., Passer, A., Saade, M.: "ASSpC" Shotcrete research for the needs of tomorrow. In. Proc. 15<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2019), September 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2019, Prague.
- Galan, I., Briendl, L., Steindl, F., Röck, R., Thumann, M., Friedle, R., Juhart, J., Baldermann, A., Mittermayr, F., Kusterle, W.: Hydration processes of accelerated systems governing early strength development. In. Proc. 15<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2019), September 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2019, Prague.
- Baldermann, A., Sakoparnig, M., Steindl, F., Thumann, M., Saxer, A., Galan, I., Mittermayr, F.: Advanced durability testing methods for shotcrete – examples from construction sites and laboratory tests. In. Proc. 15<sup>th</sup> International Congress on the Chemistry of Cement (ICCC 2019), September 16<sup>th</sup> – 20<sup>th</sup>, 2019, Prague.

## 5. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

- Die Abrechnung erfolgt direkt im eCall bzw. bei bis Sept. 2015 eingereichten Projekten via Excel. Im eCall wird Ihnen automatisch die für Sie richtige Variante präsentiert.
- Beachten Sie den FFG Kostenleitfaden ([www.ffg.at/kostenleitfaden](http://www.ffg.at/kostenleitfaden)) und Ausschreibungsdokumente.
- Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.

Wie bereits im Forschungsansuchen vermerkt, erfolgen die Inkindleistungen unregelmäßig über die Projektdauer verteilt. Durch den Aufbau des Programms in Vorversuche, Großversuche und Dauerhaftigkeitsversuche fallen im 2. FJ und 3. FJ auch noch große Inkindleistungen der industriellen Partner an. Aus dem ersten Jahr ist noch ein Überschuss von € 41.875 an Inkindleistungen vorhanden. Im 2. FJ sind € 57.525 an Inkindleistungen erbracht worden. Wir bitten den Überschuss auf das 4. FJ anrechnen zu können, da dann hauptsächlich

Laborleistungen anfallen.

## 6. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.

keine

## 7. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch Richtlinien – Anhang zu 5.3., 5.3.5), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei dem/der Förderungsnehmer/in
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- Weitere Förderungen für dieses Projekt

keine

## 8. Anhang

- Bericht Zams I
  - Bericht Dauerhaftigkeitsbericht Wietersdorf I und Zams I
  - Bericht Wietersdorf II
  - Bericht Zams II
  - Bericht Verarbeitung
  - Bericht Hydratation
  - Bericht Nachhaltigkeit
- 
- Ausgewählte Publikationen gemäß Liste Pkt. 4