

# ENDBERICHT 3. FORSCHUNGSJAHR

<b>FFG Projektnummer</b>	871055	<b>FörderungsnehmerIn</b>	öbv-GmbH
<b>Bericht Nr.</b>	3	<b>Berichtszeitraum</b>	1.7.2018-30.6.2019
<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.

Im zyklischen Tunnelvortrieb und in der Betoninstandsetzung übernimmt Spritzbeton als Baustoff wichtige Aufgaben. Das Forschungsprojekt ASSpC beschäftigt sich mit der Entwicklung und dem Einsatz von Spritzbetonen mit erhöhter Dauerhaftigkeit, um die geplante Lebensdauer von Tiefbauten auch bei chemischem Angriff erreichen zu können. Dabei soll es keine Einschränkungen bezüglich Robustheit, Vortriebsgeschwindigkeit und Sicherheit der Mannschaft geben. Darüber hinaus sollen Ressourcen, im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung und des Klimaschutzes, effizient und nachhaltig eingesetzt werden. Um diese Ziele zu erreichen sind Grundlagenuntersuchungen zu den Reaktionsmechanismen der beschleunigten Bindemittelhydratation durchzuführen, neue Prüfmethode zu erproben, 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 Großspritzversuche durchgeführt und die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen gestartet, im dritten Forschungsjahr wurden in weiteren Großversuchen neue Versuchsvarianten untersucht und die Verarbeitungsproblematik eingehend abgeklärt. Durch die bereits erworbenen Vorkenntnisse konnten Wege zu weiterer Erhöhung der Dauerhaftigkeit gefunden werden. Mit Hilfe von avancierten Untersuchungsmethoden konnten vertiefte Einblicke in das Hydratationsverhalten gewonnen werden. Die gesteckten Ziele im Zeitraum wurden erreicht. Gegenüber dem Erstantrag konnten die entwickelten Mischungen bereits in 2 Tunnels unter Vortriebsbedingungen eingesetzt werden.

Im 3. Forschungsjahr kann kurz zusammengefasst Folgendes hervorgehoben werden:

### Großspritzversuche (GSV)

Im Versuchszeitraum fanden 2 Großversuche im Nassspritzverfahren statt, eine Versuchsreihe im Trockenspritzverfahren wurde vorbereitet.

Bei den Spritzversuchen am **Zentrum am Berg** (Eisenerz / Steiermark) galt es einen Vergleich der Dauerhaftigkeitsperformance von Metakaolin und Silikastaub unter der Verwendung eines C<sub>3</sub>A-freien Zements (SR0), Hüttensand und Feinstkalzit zu führen, die Auswirkung verschiedener Arten- und Dosierungen von alkalifreien Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> Erstarrungsbeschleunigern auf die Frühfestigkeit und Dauerhaftigkeit zu untersuchen, einen Vergleich von Bindemittel mit unterschiedlichen C<sub>3</sub>A-Gehalten (SR0, SR3 und CEM I) durchzuführen und die Auswirkungen des Feinstkalzits hinsichtlich Dauerhaftigkeit (speziell Thaumasiangriff) nachzuweisen. Außerdem

wurden 90 m<sup>3</sup> im laufenden Vortrieb der ZaB Tunnelbaustelle eingesetzt.

Die Spritzversuche auf dem Baulos **KAT3** (Mitterpichling / Kärnten) des Koralmtunnels ermöglichten wieder den Einsatz von neuen Mischungen im Tunnel, aber auch Vergleichsversuche mit Mischungen mit einem verbessertem AHWZ. Als weitere Besonderheit dieser Versuchsserie war der Einsatz einer Spritzmaschine, die mit 9 zusätzlichen Drucksensoren ausgestattet worden war, um Vergleiche zu den Messungen mit dem Gleitrohrreometer und der Filterpresse an dem Mischgut zu erstellen. Außerdem kam eine Hochgeschwindigkeitskamera zum Einsatz, um den Spritzstrahl in Superzeitlupe analysieren zu können. Die Ergebnisse des Gleitrohrreometers korrelieren gut mit den Pumpendrückerücken und werden mit den Zeitlupenaufnahmen ergänzt. Alle Mischungen waren verzögert eingestellt. Der Bindemittelgehalt und der Wassergehalt wurden variiert.

Schließlich wurden im Versuchszeitraum die Vorbereitungen für Trockenspritzversuche im Zementwerk **Wopfing** (Waldegg / Niederösterreich) durchgeführt.

Mit dem Personal der Industriepartner und unserem eingespielten Versuchsteam konnten die Versuche zielsicher abgewickelt werden. Mit den meisten Mischungen konnten die erforderlichen Frühfestigkeiten erreicht werden. An zahlreichen Bohrkernen laufen die geplanten Untersuchungen zur Hydratation und zur Dauerhaftigkeit. Speziell bei den Proben vom ZaB wurden sehr niedrige RV-Werte erreicht. Mischungen mit abgestimmten Zusatzstoffen lassen sich robust verarbeiten und zeigen in den folgenden Laboruntersuchungen hervorragende Ergebnisse bei den Dauerhaftigkeitsuntersuchungen. Eine zielgerichtete Verbesserung der Dauerhaftigkeit ist jetzt somit möglich.

### **Laboruntersuchungen**

An den in GSV erzeugten Proben werden umfangreiche Dauerhaftigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen der im 1. FJ. gespritzten Proben sind mit wenigen Ausnahmen abgeschlossen. Prüfungen an den im 2. FJ. durchgeführten Proben sind Großteils abgeschlossen, einige Auslagerungen zur Karbonatisierung und Thaumasitbildung laufen noch. Die Dauerhaftigkeits-Proben aus Forschungsjahr 3 befinden sich in Untersuchung, die mechanischen Kennwerte sind ermittelt. Die bisher durchgeführten Prüfungen an neu entwickelten Spritzbetonen mit zielgerichteten Zusatzstoffkombinationen sind hinsichtlich Dauerhaftigkeit sehr vielversprechend.

Untersuchungen zu Hydratation beschleunigter Bindemittelsysteme wurden im 3. FJ. weiter intensiviert. Zusätzlich zu den bisherigen Untersuchungsmethoden wurden mikrostrukturelle Untersuchungen mit folgenden Methoden angewandt: Mikrocomputertomographie, Transmissions-Elektronenmikroskopie, Elektronenstrahlmikrosonde und umfangreiche Untersuchungen der Porenlösungen. Es konnten neue Einblicke in die für Spritzbeton bedeutenden Reaktionen gewonnen werden. Besonders interessant sind die Ergebnisse zur Phasenanalyse von jungen Mischungen mit und ohne Feinstkalzit.

Im 3.FJ. wurde außerdem das Global Warming Potential der neuen Mischungen der durchgeführten GSV berechnet. Die Einbeziehung „funktioneller Einheiten“ in die Berechnungen wurde fortgesetzt und angewandt.

### **Herausforderungen**

Bei folgenden Punkten traten Herausforderungen auf, an deren Lösung gearbeitet wird:

Die geplanten Untersuchungen zur Hydratationsentwicklung mit der InSitu-Raman-Sonde führte zu keinen zufriedenstellenden Ergebnissen. Es musste auf andere Methoden (z.B. QXRD, In-Situ-XRD, Porenlösungen, TEM) ausgewichen werden.

Für Großspritzversuche ergab sich mehrfach das Problem, dass die großtechnisch hergestellten

Ausgangsstoffe leichte Abweichungen zu jenen der Vorversuche aufwiesen. Dies konnte nur durch zusätzliche nachträgliche Versuche geklärt werden und reduziert die Effektivität unserer Versuchsdurchführungen. Bei den GSV musste kurzfristig reagiert werden.

Im Zuge der Versuche bei KAT 3 wurde ein Verzögerer auf Zuckerbasis eingesetzt, der die Festigkeitsentwicklung des Spritzbetons zu späteren Zeiten unvorteilhaft beeinflusst. In nachfolgenden Laborversuchen konnte der Einfluss verschiedener Produkte systematisch festgehalten werden.

Allgemein konnte bei manchen Versuchsserien Bohrkerne mit vermehrter Lagenbildung festgestellt werden. „Spritzlagen“ kommen bei Spritzbeton vor, wenn die Förderung unregelmäßig ist oder der Düsenführer Fehler macht. Im Zuge der Versuche wurde stets darauf geachtet, dies zu vermeiden. Trotzdem sind z.B. die Proben von Wietersdorf II fast perfekt gespritzt, während z.B. bei Wietersdorf I und Wopfing bei fast gleichen Bedingungen Spritzlagen festzustellen sind.

Aus den Ergebnissen aus FJ 1 und FJ 2 ergab sich, dass Metakaolin sehr gut geeignet ist, das Versinterungspotential zu reduzieren. Aus späteren Untersuchungen ergab sich aber, dass Metakaolin ohne Kombination mit anderen Zusatzstoffen schlecht für die Sulfatbeständigkeit der Spritzbetone ist.

Die Logistik der Versuchsdurchführung im Labor ist durch die größere Probenzahl recht komplex und der Aufwand höher als erwartet.

### **Organisatorisches und Verwertung**

Die vorgesehenen Meetings mit den industriellen Partnern wurden durchgeführt, waren sehr gut besucht und die vorgestellten Ergebnisse wurden eingehend diskutiert. 2 Newsletter zur Zwischeninformation sind versandt worden.

Die Klausurtagungen des Forschungsteams sind Quelle für Ideenfindungen und Austausch. Das Forschungsteam ist dadurch gut zusammengewachsen. Monatliche Skype-Konferenzen der Unterarbeitsgruppen stärken die Kommunikation.

Eine beträchtliche Anzahl an wissenschaftlichen Publikationen ist bereits erschienen und weitere sind in Vorbereitung. Außerdem wurde die erste Dissertation erfolgreich verteidigt. Die Arbeiten wurden bereits auf mehreren Tagungen vorgestellt.

### **Fazit**

Mit dem motivierten Team junger Forscherinnen in Zusammenarbeit mit Experten aus der Praxis konnte daher im 3. Forschungsjahr ein weiterer 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 3. FJ. und die angrenzenden Jahre angegeben. Die zeitliche Abfolge konnte gut eingehalten werden.

Die Tabellen 1 und 2 stellen dann den aktuellen Stand detailliert dar.

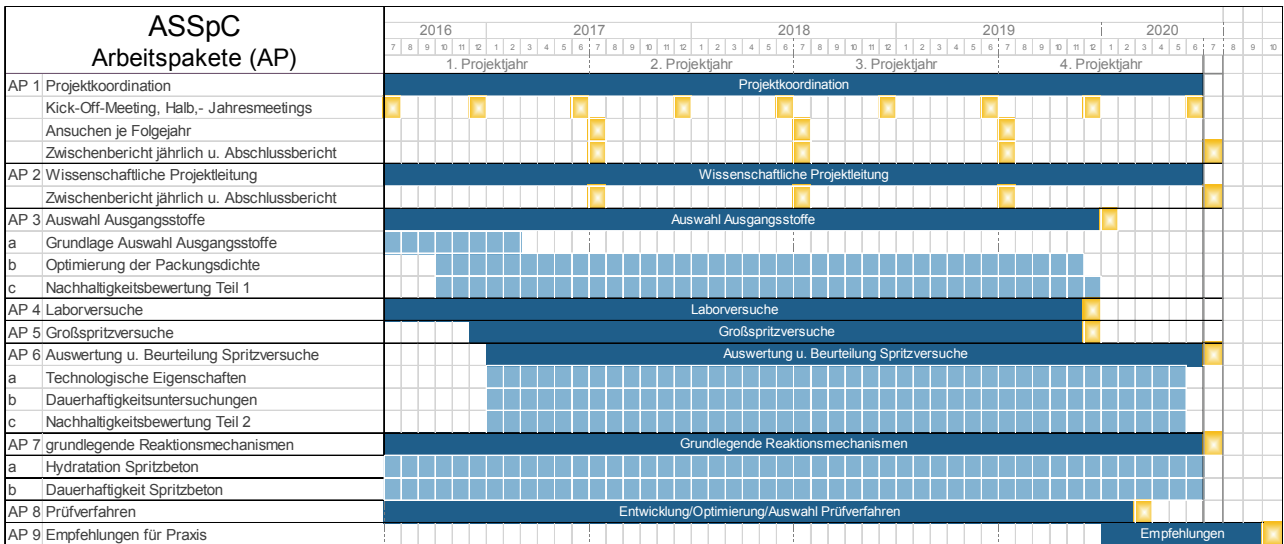


Abbildung 1: Balkenplan 3. FJ

Die Arbeitspakete sind in Tabelle 1 mit dem Fertigstellungsgrad nach dem 3. FJ. und den erreichten Ergebnissen gelistet und in Tabelle 2 sind Meilensteine detailliert angeführt.

Tabelle 1: Arbeitspakete 3. FJ (Abkürzung: GSV= Großspritzversuch)

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	<b>Projektkoordination</b>	65%	7/16	6/20	7/16	6/20	Planmäßig alles erreicht
2	<b>Wissenschaftliche Projektleitung</b>	65%	7/16	6/20	7/16	6/20	Planmäßig alles erreicht/ Aufwand höher als geplant Regelmäßige Newsletter (bisher 7), 6 Klausurtagungen
3	<b>Auswahl Ausgangsstoffe und Leimentwicklung</b>	95%	7/16	10/19	7/16	12/19	AP3a abgeschlossen. Weitere Stoffe können im Projektverlauf noch dazukommen. AP3b Untersuchungen zur dichten Packung für alle GSV durchgeführt AP3c Nachhaltigkeitsbewertungen für vorhandene Ausgangsstoffe durchgeführt; Bewertung wird für kommende GSV durchgeführt
4	<b>Betonrezeptur-entwicklung, Laborversuche und Spritzbetonversuche im Labormaßstab</b>	90%	7/16	10/19	7/16	11/19	Rheologische Grundlagenversuche abgeschlossen, Referenzrezepturen der Baustellen der GSV mitgeprüft, Untersuchungen Untermischbarkeit durchgeführt Vorbereitung GSV mit MiniShot durchgeführt. Dauerhaftigkeitsproben bei GSV gewonnen
5	<b>Großspritzversuche</b>	70%	12/16	10/19	12/16	11/19	2 Trockenspritzversuche durchgeführt, einer vorbereitet, ev. ein weiterer geplant 4 Nassspritzversuche wurden durchgeführt. 5. Nassspritzversuch in Zams geplant (Durchführung 11/19)



6	<b>Auswertung und Beurteilung der Spritzbetonversuche</b>	60%	1/17	3/20	1/17	6/20	AP6a Technologische Eigenschaften für GSV ermittelt bzw. laufen AP6b Dauerhaftigkeitsuntersuchungen der GSV laufen AP6c Nachhaltigkeit am Spritzbeton in Bearbeitung
7	<b>Grundlegenden Reaktionsmechanismen</b>	65%	7/16	5/20	7/16	6/20	AP7a Untersuchungen an Laborproben und MiniShot-Proben durchgeführt und mit GSV verifiziert. Umfang hat zugenommen AP7b Analytik und Modellbildung an Proben von GSV laufen. Umfang hat zugenommen
8	<b>Neuentwicklung, Optimierung und Auswahl von Prüfverfahren und Analysenmethoden</b>	85%	7/16	3/20	7/16	3/20	Analytik zur Dechiffrierung der Reaktionsabläufe laufen und vom Dauerhaftigkeitsfragestellungen auch auf Hydratationsabläufe ausgeweitet. Entwicklung weitgehend abgeschlossen
9	<b>Empfehlungen für die Praxis und ggf. Anpassungsvorschläge für Normen und Richtlinien</b>	35%	1/20	6/20	1/20	9/20	Zahlreiche Publikationen erschienen und in Vorbereitung Normempfehlungen im 4. FJ

**Tabelle 2: Meilensteine** (Blauer Text bereits im 1. und 2. 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		1.6.17	
		14.12.16			
		1.6.17			
		29.11.17		7.6.18	
		7.6.18			
	• Jährliche Zwischenberichte	29.11.18		19.6.19	
		19.6.19			
		28.11.19	28.11.19		
• Präsentation der Zwischenergebnisse mit Diskussion Industriebeteiligung	30.6.17	15.8.17	15.8.17		
	30.6.18	22.8.18	22.8.18		
	30.6.19	23.8.19	23.8.19	Nach Abschluss 3. FJ	
• Notwendige Maßnahmen zur wissenschaftlichen Projektweiterführung	1.6.17		1.6.17		
	7.6.18		7.6.18		
	19.6.19		19.6.19		
• Ansuchen für Folgejahre	30.6.17	15.8.17	15.8.17		
	30.6.18	22.8.18	22.8.18		
	30.6.19	23.8.19	23.8.19	Nach Abschluss 3. FJ	
• Erstellung Kommunikationsplattform	12.10.16		12.10.16		
• Abschlussbericht	Nach 4. FJ				

2	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichte mit Auswertungen je Forschungsjahr</li> </ul>	30.6.17 30.6.18 30.6.19	15.8.17 22.8.18 23.8.19	15.8.17 22.8.18 23.8.19	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Projektende: Wissenschaftlich-Technischer Abschlussbericht inklusive Empfehlungen für die Praxis</li> </ul>	30.9.20	30.9.20		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Veröffentlichung der Ergebnisse, Dissemination in der Branche</li> </ul>	30.9.20	30.9.20		
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Dissertationen und Publikationen</li> </ul>	30.9.20	30.9.20		Mehrere Publikationen veröffentlicht Dissertation Thumann 8/2019
3	<ul style="list-style-type: none"> <li>Auswahl und Beschaffung geeigneter Bindemittel, Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Gesteinskörnungen</li> </ul>	2/17		1/17	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierte Rezepturen für Labor- und Großspritzversuche</li> </ul>	10/17	11/19		Laufend iterativer Vorgang
	<ul style="list-style-type: none"> <li>LifeCycle Assessment Ausgangsstoffe</li> </ul>	12/17	12/17	12/17	
	<ul style="list-style-type: none"> <li>LifeCycle Assessment Spritzbeton</li> </ul>	10/17	12/19		Laufend für GSV
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 3 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>		12/19		Teilberichte erledigt
4	<ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung praxistauglicher Rezepturen, Ausloten Grenzen der Verarbeitbarkeit</li> </ul>	6/19	11/19		Teilergebnisse liegen vor Verarbeitbarkeit abgeschlossen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Erkenntnisse zu Kennwerten für praxistaugliche Spritzbetonrezepturen</li> </ul>	6/19	11/19		Teilergebnisse liegen vor
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erkenntnisse zur Frühfestigkeitsentwicklung und ausreichend Proben für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen</li> </ul>	6/19	11/19		Teilergebnisse liegen vor
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Vorauswahl der Ausgangsstoffe für Großspritzversuche</li> </ul>	10/19	10/19		Für GSV durchgeführt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 4 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	6/19	11/19		Zwischenberichte erledigt
5	<ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolgreiche Durchführung der Spritzversuche mit neu entwickelten Rezepturen (Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit)</li> </ul>	11/19	11/19		6 GSV abgeschlossen (ein weiterer im 4.FJ durchgeführt, 1bis 2 in Planung)
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellung und Bereitstellung von geeigneten Probekörpern für Dauerhaftigkeitstests</li> </ul>	11/19	11/19		je GSV durchgeführt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 5 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	3/20	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>	6/20	6/20		Fortschritte erzielt

	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Verifizierung der Dauerhaftigkeit der entwickelten Spritzbetone und Gegenüberstellung mit Referenzen</li> </ul>	6/20	6/20		Gute Fortschritte erzielt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berichtserstellung für AP 6 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	6/20	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>	6/20	6/20		Gute Fortschritte erzielt
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Erkennen bisher nicht berücksichtigter Einflussfaktoren</li> </ul>	6/20	6/20		laufend
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berichtserstellung für AP 7 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	6/20	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>	6/20	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>	6/20	6/20		Arbeiten laufen
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prüfverfahren zur aussagekräftigen Überprüfung der Frühfestigkeit und Dauerhaftigkeit stehen zur Verfügung</li> </ul>	3/20	3/20		Methoden entwickelt, Verifizierung läuft
	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Berichtserstellung für AP 8 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>	6/20	6/20		Teilberichte liegen vor
9	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Zusammenfassende Aufbereitung der Erkenntnisse für die Baupraxis</li> </ul>	6/20	9/20		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	9/20		Durch umfangreiche Ergebnisse, Zeitplan über das Projektende hinaus

## 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, verschoben und ausgeweitet.

## **AP 1 und 2 Projektleitung und Projektkoordination**

Neben vielen Einzelgesprächen, kleineren Diskussionsrunden und Baustellenbesuchen wurden folgende Treffen abgehalten bzw. Besuche durchgeführt:

Arbeitsgruppensitzung

- Trockenspritzen, Wien 15. 11. 2018

Zwischensitzung, Wien, 29. 11. 2018

Jahresabschlussitzung, Wien, 19. 6. 2019

Forschungsteam-Klausur, Graz, 17. 9.-19. 9. 2018

Forschungsteam-Klausur, Innsbruck, 9. 1.-11. 1. 2019

Baustellenbesuche KAT 3, 17. 10. 2018 und 21. 1. 2019

Besuch EMPA, Prof. Lothenbach, 21. 11. 2018

Außerdem wurden 2 Newsletter zur Information aller Vertreter der industriellen Partner versandt.

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

## **AP 3 Ausgangstoffe und Leimentwicklung**

### **AP 3a Auswahl Ausgangsstoffe**

Zusätzlich zu den in den ersten Forschungsjahren (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). Im Zuge der Versuche konnten verbesserte Kombinationen der Produkte ermittelt werden.

### **AP 3b Optimierung der Packungsdichte**

Auf Grund von Erfahrungswerten aus den ersten Versuchen und der Datenbank konnten die neuen Bindemittelkombinationen durch Berechnung optimiert werden. Die erfolgreiche Umsetzung erfolgte in den GSV.

### **AP 3c Nachhaltigkeitsbewertung Ausgangsstoffe**

Im laufenden FJ wurde die Datenbank der Ausgangsstoffe um einzelne neue Stoffe, die bei GSV eingesetzt wurden, erweitert. Hauptsächlich wurden LCA-Bewertungen von Mischungen, die bei den Großversuchen eingesetzt wurden, durchgeführt. (Siehe AP 6c)

## **AP 4 Betonrezepturenentwicklung, Laborversuche und Kleinspritzversuche**

### **Verarbeitungseigenschaften im Labormaßstab**

Die Versuchsergebnisse der Laborversuche des zweiten Forschungsjahres wurden intensiv ausgewertet und mit den Ergebnissen der GSV abgeglichen. Die Erkenntnisse flossen in die Dissertation von Frau Dr. Thumann ein (siehe Anlage):

Die Verarbeitbarkeit von Frischbetonen mit unterschiedlicher Mischungszusammensetzung wurde im Labormaßstab untersucht und insbesondere auch die Aussagekraft von Prüfverfahren zu Beurteilung der Pumpbarkeit geprüft. Es wurden ein rheologisches Prüfverfahren, das Gleitrohr-Rheometer zum Erstellen von Pumpprognosen, und ein Prüfverfahren zur Beurteilung der Stabilität, die Filterpresse, eingesetzt. Außerdem wurden das Ausbreitmaß, die Trichterauslaufzeit und der Luftporengehalt bestimmt. Folgende Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Ergebnisse der Messung mit dem Gleitrohr-Rheometer in Kombination mit den Ergebnissen der Filtratwasser-Bestimmung ein umfassendes Bild über die Pumpbarkeit der Frischbetonmischung geben. Es werden sowohl die rheologischen Eigenschaften des Betons als auch das Verhalten des Betons unter Druck bestimmt.

Für die Kontrolle der Pumpbarkeit der Frischbetonmischung auf der Baustelle ist es ggf. sinnvoll ein Verarbeitungsfenster zwischen der Filtrat-Wassermenge (bestimmt nach 15 min oder nach 60 min) und dem Beiwert  $b$ , der mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelt wird, zu erstellen. Mithilfe des Verarbeitungsfensters können die Mischungen hinsichtlich Pumpbarkeit beurteilt werden, da sowohl die Stabilität des Betons unter Druck als auch die rheologischen Eigenschaften der Gleitschicht mit in die Betrachtung einbezogen werden.

Ein geringes Leimvolumen und ein geringer W/B-Wert führten zu hohen Förderdrücken, die mit dem Gleitrohr-Rheometer gemessen wurden.

Die Zugabe von Luftporenbildner führte zu geringeren Pump-Druckprognosen, sofern ein ausreichender Volumenanteil an Mehlkorn und Wasser für die Ausbildung der Gleitschicht vorhanden war.

Sowohl der Anteil der Gesteinskörnung  $< 0,125$  mm und die Substitution von Klinker mit Zusatzstoffen hatten einen Einfluss auf die Pumpprognosen. Die Ergebnisse waren abhängig von der Feinheit, der Kornverteilung, der Packungsdichte und dem Wasseranspruch des Mehlkorns. Der Einfluss des Mehlkorns auf die Pumpbarkeit anderer Mischungen ist in ähnlicher Weise zu führen.

Die Stabilität der Mischungen unter Druck wurde mit der Filterpresse beurteilt. Der Einfluss unterschiedlicher Mischungszusammensetzungen auf die Stabilität, z. B. von Mischungen mit unterschiedlichen Wassergehalten, war messbar.

Es gab keine Korrelation zwischen den rheologischen Kennwerten Beiwert  $a$  und Beiwert  $b$ , die mit dem Gleitrohr-Rheometer ermittelt wurden, und dem Ausbreitmaß bzw. der Trichterauslaufzeit. Die Eignung der Prüfverfahren zur Beurteilung der Pumpbarkeit wurde in Pumpversuchen im Zuge der GSV überprüft (siehe AP6), im Labormaßstab war das nicht möglich.

### **Festigkeitsentwicklung im Labor**

Untersuchungen mit dem Minishot-Verfahren wurden im Berichtszeitraum nicht durchgeführt. Die notwendigen Untersuchungen wurden mit der „Prismenmethode“ im Labor durchgeführt.

#### **Untermischbarkeit**

Ein Tracer auf Basis von Na-Fluorescein (Uranin), der dem Erstarrungsbeschleuniger zugesetzt wird, um seine Verteilung im aufgetragenen Spritzbeton nachzuweisen, wurde im Labor auf Eignung, Nachweisbarkeit und Nebenwirkungen bezüglich der technologischen Spritzbetoneigenschaften untersucht. Es erfolgte keine Beeinträchtigung der Wirkung des Erstarrungsbeschleunigers

#### **Mischungsoptimierung mit Dichter Packung**

Auf Grund von Erfahrungswerten aus den ersten Versuchen und der Datenbank konnten die neuen Bindemittelkombinationen durch Berechnung (AP 3) optimiert werden. Im Laborversuch wurde die Richtigkeit verifiziert. Die erfolgreiche Umsetzung erfolgte in den GSV.

## **AP 5 Großspritzversuche**

### **ZaB 30.7 – 2. 8. 2018**

Die Spritzversuche am Erzberg fanden im Zuge der Baustelle zur Errichtung der Versuchstunnels des Zentrums am Berg (<https://zab.unileoben.ac.at/>) statt. Die Betonherstellung erfolgte auf der vor Ort befindlichen Mischanlage (Fa. Mobile Betonkonzepte) mit einem 3 m<sup>3</sup> BHS-Doppelwellenmischer. 4 Silos konnten für die Lagerung unserer Ausgangsstoffe bereitgestellt werden. Microsilika Slurry wurde über die Restwasserzugabe dosiert. (Abb. 3) Für die Großspritzversuche wurden Spritzmobile des Typs MEYCO Potenza verwendet. (Abb. 4)



**Abbildung 3: Belegung der Mischanlage mit den Versuchsprodukten**

Ziel der Versuche war

- der Vergleich der Dauerhaftigkeit von Mischungen mit Metakaolin und Silikastaub unter der Verwendung eines  $C_3A$ - freien Zements (SR0), Hüttensand und Feinstkalzit
- der Vergleich von Bindemittel mit unterschiedlichem  $C_3A$ -Gehalt (SR0 und SR3 und CEM I)
- die Auswirkung verschiedener Dosierungen von alkalifreien  $Al_2(SO_4)_3$  Erstarrungsbeschleunigern unterschiedlicher Zusammensetzung
- die Auswirkungen des Feinstkalzits hinsichtlich Dauerhaftigkeit
- der erfolgreiche Einsatz einer Mischung im Vortrieb



**Abbildung 4: Spritzen von Probekörpern im Portalbereich**

Eine Übersicht über die eingesetzten Mischungen ist in Abb. 5 und 6 ersichtlich. Der Bindemittelgehalt lag bei  $420 \text{ kg/m}^3$ . Der Klinkergehalt wurde bis  $250 \text{ kg/m}^3$  abgesenkt.

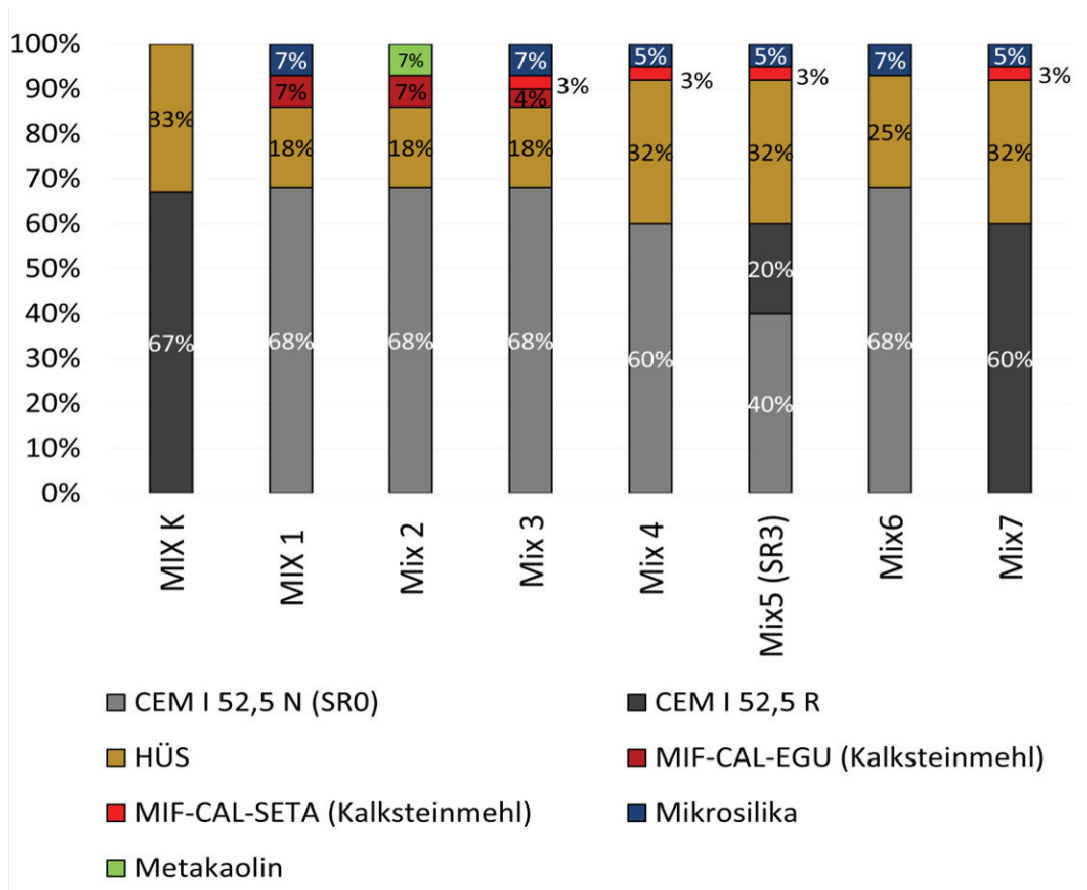


Abbildung 5: Mischungen, die am ZAB eingesetzt wurden, Bindemittel 420 kg/m³

Rezeptur	BK Bezeichnung	Beschleuniger Bez.
REF-K	E2 8%	EB C1
MIX 1	E3a 9%	EB C1
MIX 1	E3b 6%	EB D1
MIX 1	E3c 11%	EB D1
Mix1	E3d 6%	EB C2
Mix1	E3e 11%	EB C2
MIX2	E4 9 %	EB C1
MIX3	E5 9%	EB C1
Mix4	E6a 9%	EB D1
Mix4	E6b 6,5%	EB D1
Mix5 (SR3)	E7 6,5%	EB D1
Mix6	E8 9 %	EB C1
Mix7	E9a 9%	EB D1

Abbildung 6: Erläuterung Bezeichnungen Mischungen (Mix) mit unterschiedlichen EB-Dosierungen (Exx)

Die Mischungen ließen sich Großteils gut verarbeiten (Abb. 7), da in dieser Serie nicht versucht wurde an die Verarbeitungsgrenzen heranzugehen. Die Beiwerte b lagen zwischen 1,07 und 5,12 [10<sup>-6</sup> bar\* h/m], die Filtratwassermengen zwischen 2-26 kg/m³ (15 Minuten) und 22-50 kg/m³ (60



Minuten). Die Hydraulik-Pumpendrucke erreichten somit auch maximal 120 bar (bei 22 m³/h Leistung), bei den meisten Versuchen etwa 80 bar (meist 14 m³/h Pumpendurchsatz). Siehe auch Abb. 8.

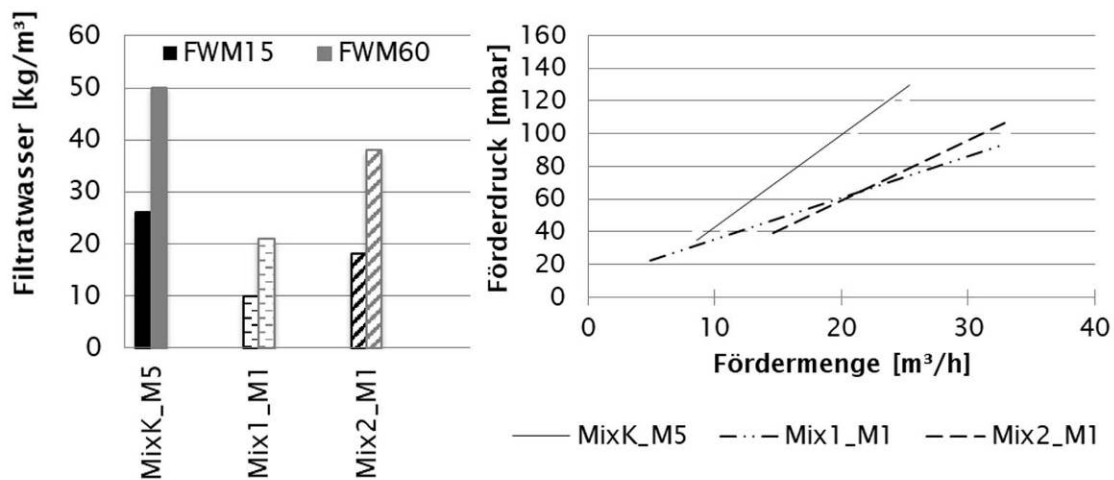


Abbildung 7: Graphische Darstellung ausgewählter Sliper- und Filterpressen-Ergebnisse

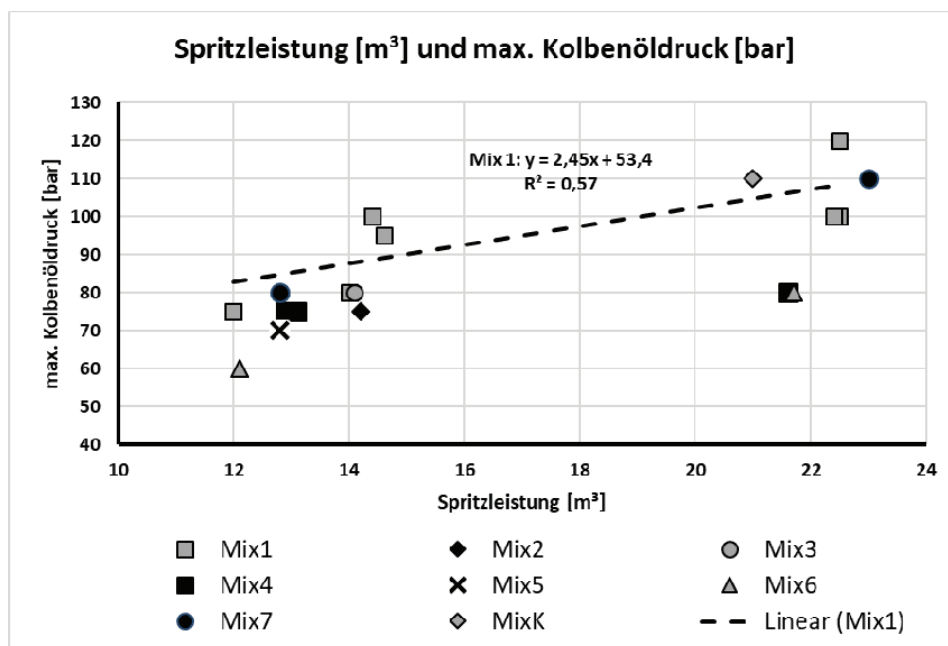
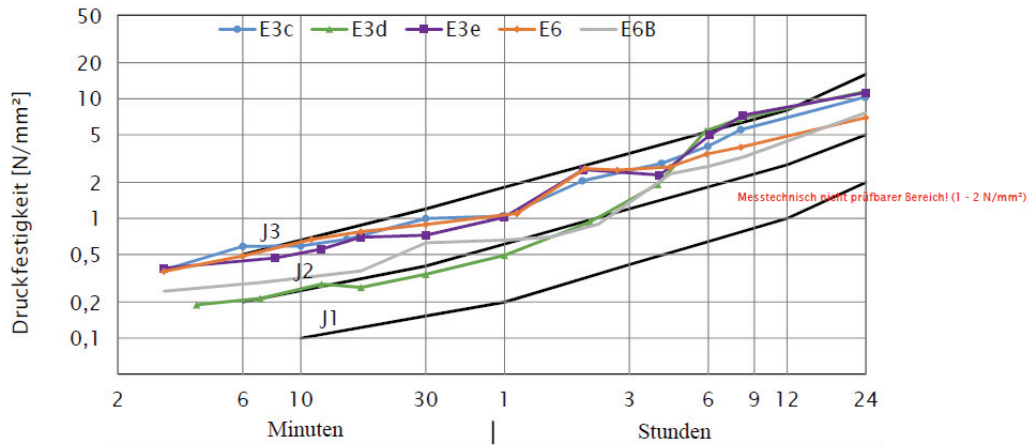


Abbildung 8: Zusammenhang zwischen Pumpleistung und max. Kolbenöldruck für alle Rezepturen

Bei einer EB- Dosierung von  $\geq 9$  M% d.BM konnten für die Mischungen mit allen Erstarrungsbeschleunigern ausreichende Frühfestigkeiten für die Klasse J2 erzielt werden. Geringe EB-Dosierungen (6 bzw. 6,5%) zeigten teilweise minimale Unterschreitungen der J2 Grenze im Bereich bis 3h. In Abb. 9 sind die Werte für die Variationen der Mischung 1 (E3 mit unterschiedlicher EB- Dosierung) und Mischung 4 (E6 mit unterschiedlicher EB- Dosierung) wiedergegeben. Die weiteren Ergebnisse finden sich im beiliegenden Bericht zu den ZaB Versuchen.





**Abbildung 9: Teil der Frühfestigkeitsmessungen**

Die Ergebnisse können folgend zusammengefasst werden:

#### ZaB

- Die Frühfestigkeiten der entwickelten Spritzbetonrezepturen erreichten bei EB Dosierungen von  $\geq 9\%$  die überwiegend geforderte Frühfestigkeitsklasse J2. Lediglich bei niedrigen Dosierungen von 6 bzw. 6.5% kam es zu geringfügigen Unterschreitungen.
- Alle Bohrkernfestigkeiten zeigen nach 90d eine ausreichende Festigkeit für die höchste Spritzbeton-Festigkeitsklasse SpC 35/45. Aufgrund der Gehalte an latent hydraulischen und puzzolanischen Stoffen im Bindemittel (Hüttensand, Mikrosilika, Metakaolin), welche im Vergleich zu Portlandzement eine langsamere Erhärtung aufweisen, müssen die 90d Werte als Endfestigkeiten betrachtet werden.
- Die getesteten Mischungen waren sehr gut pump- und spritzbar. Die maximalen Kolbenöldrücke der Förderpumpe waren auch bei im Vortrieb üblichen Spritzleistungen ( $\approx 25\text{m}^3/\text{h}$ ) moderat bis niedrig ( $\approx 100\text{ bar}$ ).
- Gleitrohrreometer: Die Ergebnisse der Sliperversuche der Mischungen Mix1 bis Mix7 zeigten eine geringe Viskosität und es war folglich eine gute Pumpbarkeit der Mischungen zu erwarten. Die Werte der Filterpresse und des Beiwertes b liegen etwa in dem von Thumann (Dissertation) vorgeschlagenen Verarbeitungsfenster. Auftretenden Pumpprobleme wie im Großspritzversuch „Zams I“ bei dem Zement CEMI 52,5N (SR0) aus der gleichen Produktionsstätte, traten bei diesem Versuch nicht mehr auf. Dies ist vor allem auf den Einsatz von LP- Mitteln zurückzuführen. Die Konsistenzhaltung der Mischungen war auch ohne den Einsatz von Verzögerern über den betrachteten Zeitraum (ca. 1h) sehr gut. Bei einigen Mischungen kam es zu einer leichten Nachverflüssigung, die sich jedoch nicht negativ auf die Pump- und Spritzeigenschaften auswirkte.
- Kalksteinmehl: Durch den Einsatz von Feinstkalkzit kann die Festigkeitsentwicklung gleichmäßig werden und es kommt nicht zu dem üblichen „Knick“ zwischen 3 und 6h Hydratationszeit. Ein herkömmliches Zementsilo ist für die Aufgabe des Feinstkalkzits nicht geeignet (Brückenbildung).
- Kalksteinmehl Suspension: Die Zugabe der Kalksteinmehl Suspension mit sehr hoher spezifischer Oberfläche wirkte sich bei gleicher EB Type und Dosierung zusätzlich positiv auf die Frühfestigkeit aus. Die Dosierbarkeit der Suspension ist in einer herkömmlichen Mischanlage mit z.B. einer Zusatzmitteldosierpumpe aber nicht gegeben.
- Verschiedene alkalifreie Erstarrungsbeschleuniger wirken sich bei gleicher Dosierung unterschiedlich auf den Festigkeitsabfall aus. Beim Einsatz von LP- Mitteln müssen die Festigkeitsabfälle generell neu bewertet werden, da sich hohe Luftgehalte im Nullbeton ungünstig auf dessen Druckfestigkeit auswirken.

- Es konnten extrem niedrige RV- Werte ( $\approx 0,3\text{kg/to}$ ) für alle ausgeführten Mischungen erzielt werden. Die Ursachenfindung ist noch im Gange.
- Dauerhaftigkeitsuntersuchungen laufen noch, ohne dass bisher größere Proben-schädigungen aufgetreten sind.

### KAT 3 4.3.-8.3.2019

Die Nassspritzversuche am Koralmtunnel, Baulos KAT 3 hatten das Ziel ein optimiertes AHWZ einzusetzen, genaue Messungen zu den Förder- und Spritzvorgängen durchzuführen und neue Mischungen auch im Tunnel zu testen. Die Herstellung des AHWZ erfolgte in Peggau, die Mischung des Nass-Mischgutes in der Mischanlage der Baustelle, das Spritzen mit Sika PM500 Spritzgeräten, einerseits von der Baustelle, andererseits mit einem von der Firma Sika speziell modifiziertem Gerät, das mit zusätzlicher Sensorik bestückt war. Die Spritzversuche fanden im Tunnel in einem Querschlag, an einer Wendenische und am Portal des Zwischenangriffes Mitterpichling (Abb.10) statt.



**Abbildung 10: Datenermittlung und Probespritzen am Portal des Zwischenangriffes Mitterpichling**

Folgendes Grundrezept kam zum Einsatz:

- $280\text{ kg/m}^3$  CEM I 52,5R, Wietersdorf
- $140\text{ kg/m}^3$  AHWZ Premium, 63 M.% Hüttensand „HÜS 4900“, 23 M.% Feinstkalzit (Kalksteinmehl) „CAL-EGU“ 14 M.% Metakaolin O (Getemperter Ton) „MET-O“
- $1700\text{ kg/m}^3$  Gestein 0/4 und 4/8, Kostmann
- 0,45 W/B
- 0,9 % Verflüssiger DynamIQ flow L-09
- 0,75 % Verzögerer DynamIQ retard S-01
- 0,07 % Luftporenbildner DynamIQ air M-01

In Abb. 11 sind die durchgeführten Variationen in KAT 3 dargestellt. Variiert wurde zwischen Erstarrungsbeschleuniger auf Suspensions- und Lösungs-Basis und deren Dosierung. Außerdem wurde der Bindemittelgehalt, Wassergehalt und das Ausbreitmaß variiert, um die Auswirkung auf die Förderung zu untersuchen. In einer Mischung wurde ein Tracer dem Erstarrungsbeschleuniger zugemischt, um später dessen Verteilung im aufgespritzten Spritzbeton verfolgen zu können.

V.Nr.	Zement	AHWZ	Mischungsbeschreibung	EB/ Zusatzm.	W/B	Mix Bez.
K1	CEM I 52.5 R SP	33% SC	Referenz	7.0% B2	0.47	REF S
K2a		33% P	BE 6.0%	6.0% B2	0.45	Mix P
K2b		33% P	BE 8.5%	8.5% B2	0.45	Mix P
K2c		33% P	BE 7.0%	7.0% B2	0.45	Mix P
K2d		33% P	BE 8.5 % Wiederholung für Festigkeitsmessung	8.5% B2	0.44	Mix P
K2e		33% P	BE 7.0% Wiederholung für Festigkeitmessung	7.0% B2	0.44	Mix P
K2f		33% P	Vortriebsmischung BE 7%	7.0% B2		Mix P
K3a		33% P	BE 6%	6.0% C1	0.45	Mix P
K3b		33% P	BE 8.5%	8.5% C1	0.45	Mix P
K4		33% P	niedriger Bindemittelgehalt	7.0% B2	0.44	Mix P-BMn
K6		33% P	W/B erniedrigt, FM und LP erhöht	7.0% B2	0.41	Mix P-wbni
K7		33%P	plus 14% HÜS	7.0% B2	0.44	Mix P-HOSe
K8		33%P	Ausbreitmaß erniedrigt, W/B erhöht, niedrigerer FM	7.0% B2	0.49	Mix P-wbho
K11		20%P	plus 10% Cal 20 NP; 29 % Cal 130GU (Kalksteinmehl erhöht)	7.0% B2	0.55	Mix E
K14		33%P	Mix P ohne Luftporenmittel	7.0% B2	0.42	Mix P-LP0
K15		33%P	W/B erhöht	7.0% B2	0.52	Mix P-wbho II
K16	33%P	Wiederholung von K6 plus Uranin als Tracer	7.0% B3	0.44	Mix P-wbni II	

Abbildung 11: Übersicht Mischungen KAT3

Die 7 Drucksensoren wurden am Spritzmobil folgend verteilt eingebaut:

- Hydraulikdruck Betonpumpe (Hydraulic Pressure)
- Pumpleitung am ersten Knie (Concrete Pump)
- Pumpleitung Ende (Concrete Nozzle) (Abb. 12)
- Erstarrungsbeschleuniger an Pumpe (Accelerator Pump)
- Erstarrungsbeschleuniger vor Düse (Accelerator Nozzle)
- Luft vor Düse (Air Nozzle)
- Mischkammer vor Düse (Aerosol Converter)

Bis auf den Ausfall eines Sensors konnte von allen Versuchen die Druckverläufe aufgenommen werden (Beispiel in Abb. 13). Um weitere Erkenntnisse zu gewinnen wurde jeweils mit 3 Leitungsstufen der Pumpe gespritzt. Dabei ist zu beachten, dass der Druck nicht unbedingt mit dem Durchfluss synchron verläuft. Die Auswirkung der Variationen in der Mischung und Maschineneinstellung auf den Spritzstrahl wurde mit einer Hochgeschwindigkeitskamera (Abb. 17) festgehalten (Bildfrequenz 1000 Bilder pro Sekunde). Diese kurzen Filme können sehr gute Infos über die Gleichmäßigkeit des Spritzstrahls liefern.

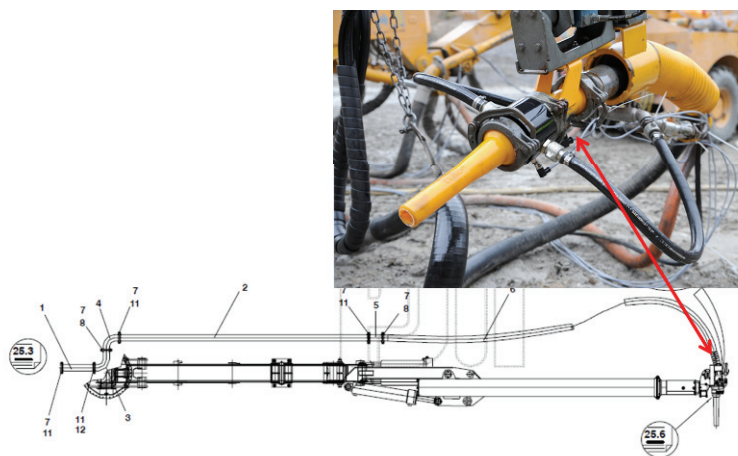
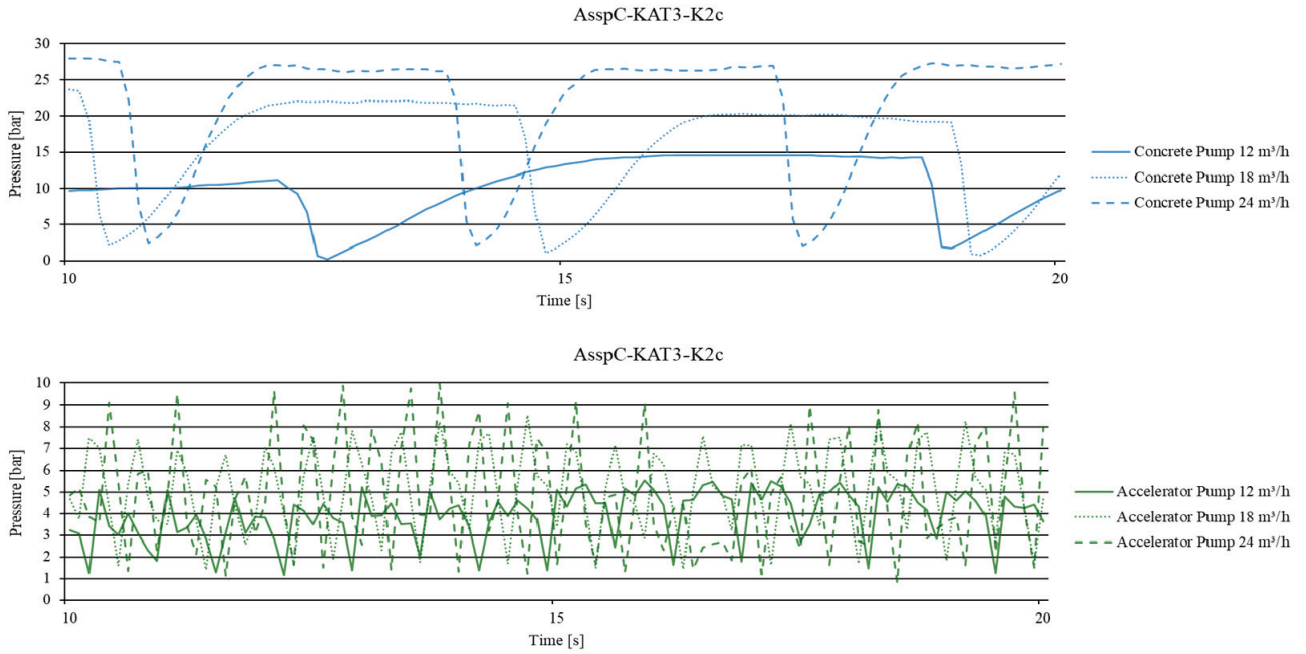
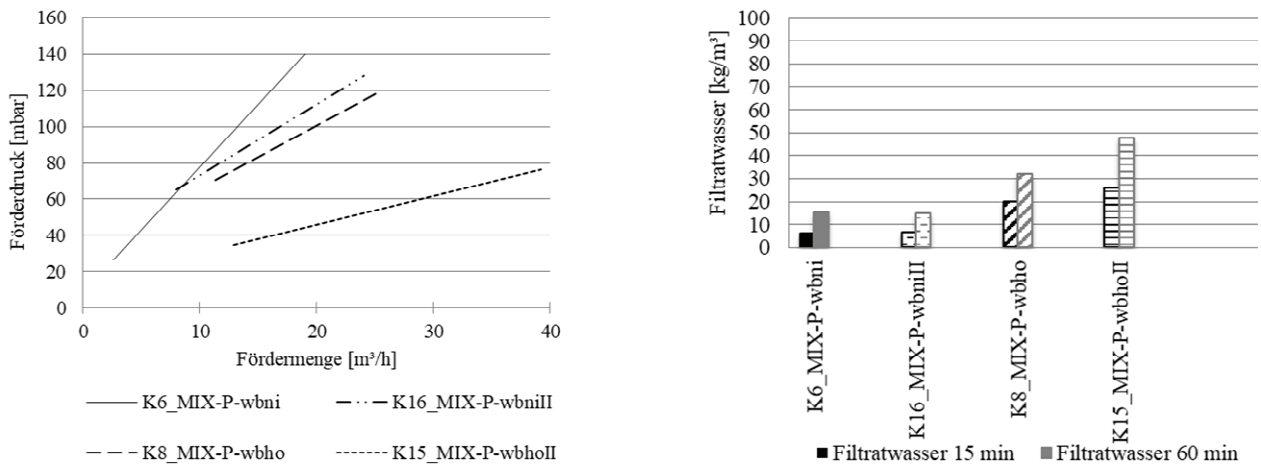


Abbildung 12: Drucksensor am Ende der Betonpumpleitung



**Abbildung 13: Pumpendruck und Druck der Beschleunigerpumpe der Mischung K2c Mix-P**

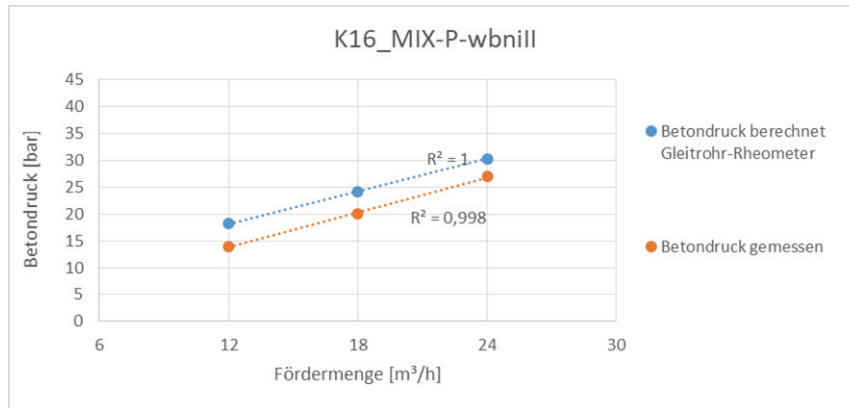
Parallel zu den Messungen am Spritzmobil wurden von allen Mischungen die üblichen Frischbetonprüfungen, ergänzt um Messungen am Rohrrheometer und mit der Filterpresse (Abb. 14), durchgeführt.



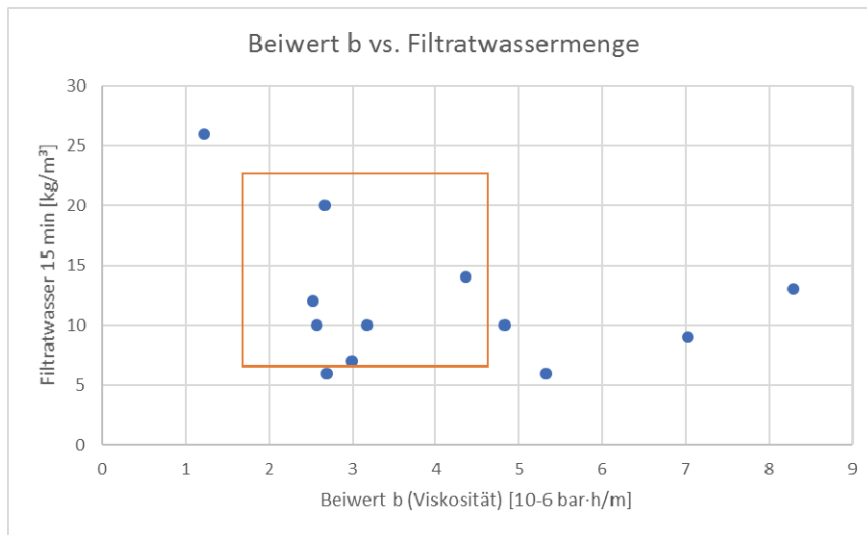
**Abbildung 14: Ergebnisse Sliper und Filterpresse der Versuche K6, K8, K15 und K16**

Ein Vergleich der Hochrechnungen aus den Ergebnissen des Rohrrheometers mit den tatsächlich gemessenen Betondrücken, zeigte eine gute Übereinstimmung (Abb. 15), die kombinierten Ergebnisse können auch anschaulich zur Erstellung eines Verarbeitungsfensters (Abb. 16) verwendet werden.





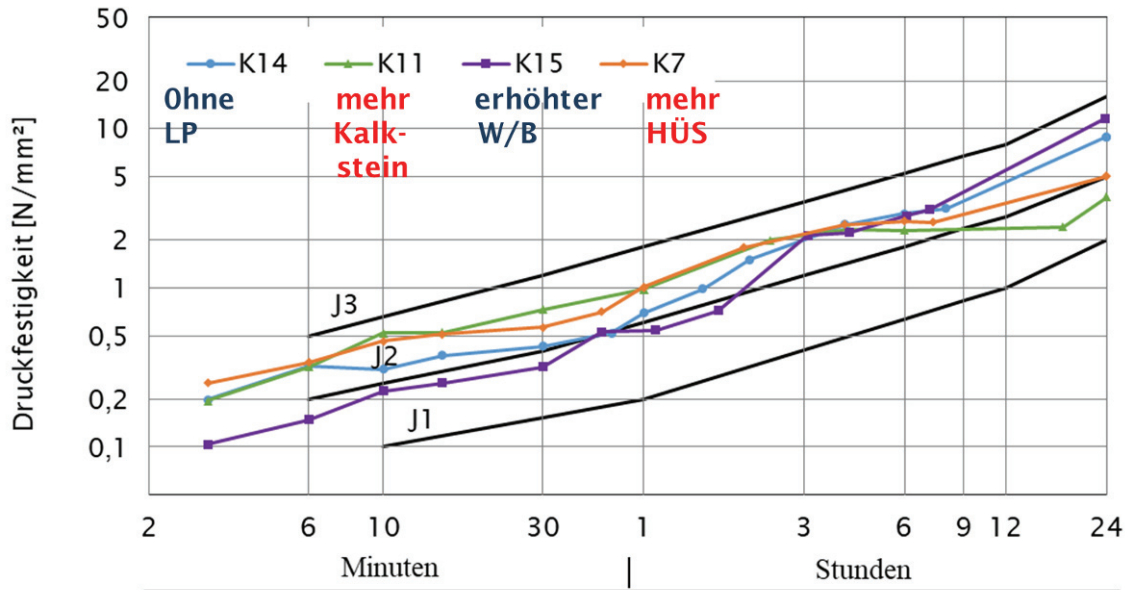
**Abbildung 15: Korrelation zwischen Fördermenge und Betonpumpendruck aus Frischbetonprüfung gerechnet und an Maschine gemessen**



**Abbildung 16: Der Beiwert b und die Filtratwassermenge können in ein Verarbeitungsfenster eingetragen werden. Werte links oben neigen zur Entmischung und damit zu Stopferbildung, Werte rechts außerhalb erzeugen immer größere Pumpendrucke**



**Abbildung 17: Filmen des Spritzstrahls mit Hochgeschwindigkeitskamera (1000 frames per second)**



**Abbildung 18: Frühfestigkeiten der Mischungen K7, K11, K14 und K15**

Mit fast allen Mischungen konnten ausreichende Frühfestigkeiten (Abb. 18 als Auszug) erreicht werden.

Die Ergebnisse können folgend zusammengefasst werden:

### KAT3

- Es konnte eine Mischung mit sehr guter Verarbeitbarkeit und Spritzbarkeit und erhöhtem Dauerhaftigkeitspotenzial aus neuen Ausgangsstoffen entwickelt werden und erfolgreich eine Erstprüfung dieser Mischung durchgeführt werden.
- Das Spritzen im Tunnel in einer Wendenische hat unter realen Baustellenbedingungen zur Zufriedenheit des Düsenführers funktioniert. Leistungen (12-24 m³/h) und EB-Dosierungen (4-7%) wurden variiert und schlussendlich etwa 100 m³ verspritzt. Mit 6% EB-Dosierung konnte auch über Kopf gut aufgetragen werden, mit 4% an der Wand.
- Die Druckmessungen an der Spritzmaschine waren sehr aufschlussreich, die bisherigen Berechnungen stimmen gut damit überein. Weitere Auswertungen folgen. Die Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zeigen einen großen Entwicklungsbedarf für eine Optimierung des Auftragsprozesses.
- Im Versuch waren auch Mischungen mit sehr niedrigem Klinkergehalt (220 kg/m³) realisierbar.
- Die Verzögerer sind jeweils auf das Bindemittel abzustimmen, da die Verzögerungswirkung mancher Produktgruppen nicht gänzlich durch den EB aufgehoben werden kann. Dadurch kann die Festigkeit im Stundenbereich und ev. auch später negativ beeinflusst werden (siehe AP7a, Abb. 38). Nach derzeitigem Stand sollten Produkte auf Zucker-Basis für Spritzbeton nicht eingesetzt werden.
- Der Hüttensand im AHWZ und das Metakaolin haben auch einen großen Einfluss auf die Qualität des Produktes, waren aber für unsere Versuche nicht anders verfügbar. Das gilt natürlich auch für das Feinstkalzit, das aber in gleicher Qualität wie in den Laborversuchen zur Verfügung stand.

Die Auswertung der Festbetonergebnisse und Dauerhaftigkeitsuntersuchungen finden sich in Kap. 6a, 6b und 7b.

### Vorbereitung Trockenspritzversuche Wopfung 22.7. – 24. 7.2019

Die knapp nach Ende des 3- FJ geplanten abschließenden Trockenspritzversuche wurden im Zementwerk Wopfung der Baunit GmbH geplant. In Abb. 19 wird das Versuchsprogramm vorab dargestellt. Die vorbereitenden Laborversuche zur Erstellung der Mischungen wurden Ende des 3. FJ erstellt und die Materialien bestellt. Zum Zeitpunkt der Berichtslegung sind die Versuche bereits erfolgreich durchgeführt worden (Abb. 20). Die Berichterstattung erfolgt im 4. FJ.

Rezepturen	Kurz-B.	CEM-HOCH	SPBM-2	CEM-CSA CK	MEF-HÜS	MIF-CAL-SET	MIF-CAL-NEU	MIF-MET-SF	MEF-SIT	MEF-MG	PCE	HA	Wasser inkl. Wassergehalt Zusatzmittel	Binde mittel	Kommentar
REF	P-1		80%		20%								0,46	365	
MIX1 wb hoch 360	P-2		69%		28%			3%					0,55	368	
MIX1 wb mittel 360	P-3		69%		28%			3%					0,38	377	
MIX1 wb niedrig 360	P-4		69%		28%			3%			0,96%		0,41	361	Zudosierung FM an der Düse mittels Zusatzmitteldosierpumpe in Suspension mit Wasser 1:10
MIX1 wb hoch 320	P-5		69%		28%			3%					0,63	317	
MIX1 wb mittel 320	P-6		69%		28%			3%					0,42	331	
MIX1 wb niedrig 320	P-7		69%		28%			3%			1,0%		0,41	320	Zudosierung FM an der Düse mittels Zusatzmitteldosierpumpe in Suspension mit Wasser 1:10
MIX1 Bentonit	P-8		69%		28%			3%					0,70	335	Dosierung gesamtes Wasser als 3%ige Bentonitsuspension über Pumpe zur Düse
MIX1 Seta	P-9		64%		26%	7%		3%					0,35	422	3% Suspension bezogen auf Trockenmasse, Kiste f FF mit höherem W/B Wert (0.49)
MIX 1 CHA	P-10		69%		28%			3%			1,4%		0,46	364	Concrete Healing Agents
MIX 1 CSA	P-11a	99%		1%									0,40		Calcium-Sulfo Aluminat
	P-11-b	96%		0,97%			3%						0,39		Calcium-Sulfo Aluminat, zusätzlich Calciumcarbonat Suspension
MIX 1 SIT	P-12		69%		28%				3%				0,51		
MIX MGO	P-13		92%					5%		3%			0,61		Magnesiumoxid als Zusatz
MIX CSA-2	P-14	79,20%		0,8%	20%								0,43		Referenz mit CSA beschleunigt

Abbildung 19: Programm für Trockenspritzversuche Wopfung im FJ4



Abbildung 20: Team der Trockenspritzversuche vor den Containern für Spritzanlage und Spritzauftrag im Werk Wopfung der Baunit

## **AP 6 Auswertung und Beurteilung der Spritzbetonversuche**

### **AP 6a Technologische Eigenschaften**

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

#### **Trockenspritzverfahren**

Ergebnisse wurden im 2. FJ berichtet. Letzter Versuch im 4. FJ.

#### **Nassspritzversuche**

Beispiele von Frühfestigkeitsmessungen bei den zwei Nassspritz-Großversuche werden unter AP5 wiedergegeben. Rückprallmessungen waren nicht möglich, da die Versuche im Vortrieb oder am Portal auf unebenen Stellen vorgenommen wurden. Rückprallmessungen sind erst wieder bei den letzten Nassspritzversuchen in Zams III möglich.

#### **Pumpbarkeit**

Die Pumpversuche zeigten, dass Frischbetonmischungen mit einem zu geringem Mehlkorn und Wasservolumen nicht pumpbar waren (hier  $< 360 \text{ l/m}^3$ ). Der Pumpendruck der Spritzmaschine erreichte 200 bar, was zum automatischen Abbruch des Pumpvorgangs führte. Die parallel durchgeführten Versuche mit dem Gleitrohr-Rheometer ergaben bei diesen Mischungen ebenfalls hohe Pumpprognosen. Ungünstig für die Pumpbarkeit waren auch Frischbetonmischungen mit hohen Filtratwassermengen. Bei den hier untersuchten Mischungen waren es Filtratwassermengen  $> 25 \text{ kg/m}^3$  nach 15 min und  $> 60 \text{ kg/m}^3$  nach 60 min, die mit der Filterpresse gemessen wurden. Eine hohe Filtratwassermenge ist ein Hinweis, dass die Mischungen unter Druck nicht ausreichend stabil bleiben und Blockaden in den Förderleitungen auftreten. Es ist sinnvoll bei der Beurteilung der Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen sowohl die rheologischen Messergebnisse als auch die Ergebnisse zur Stabilität zu betrachten. Geringe Förderdrücke, die mit dem Gleitrohr-Rheometer bestimmt wurden, waren günstig für die Pumpbarkeit. Jedoch nur unter der Voraussetzung, dass die Mischung auch unter Druck ausreichend stabil war. Das Ausbreitmaß war nicht geeignet, um die Pumpbarkeit von Frischbetonmischungen zu beurteilen.

Sofern die Mischungen ein ausreichendes Leimvolumen zum Füllen der Zwischenräume der groben Gesteinskörnung und zur Ausbildung einer Gleitschicht beim Pumpvorgang aufweisen und die Mischungen unter Druck ausreichend stabil bleiben, sind jedoch keine negativen Auswirkungen auf die Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen zu erwarten. Darüber hinaus wird die Pumpbarkeit der Frischbetonmischungen von den rheologischen Eigenschaften des Leims beeinflusst. Diese werden z.B. durch Wassergehalt und Fließmittel, sowie die Abstimmung der Bindemittel beeinflusst.

Der Zusammenhang zwischen Pulsation beim Pumpen, Untermischung des Erstarrungsbeschleunigers, ungleichmäßigen Spritzstrahl (in Filmen dokumentiert) und der Lagenbildung in manchen Spritzkisten ist noch Gegenstand weiterer Auswertungen und Untersuchungen.

#### **Festbeton**

##### **ZaB**

Die hohen Luftgehalte im Nullbeton resultieren teilweise in einem Festigkeitszuwachs beim gespritzten Beton, wo die Luft durch den Spritzvorgang komprimiert wird (auch erkennbar am Dichteunterschied). Bis auf die Mischung E3e mit einer sehr hohen Erstarrungsbeschleuniger-Dosierung von EB C2, können alle Mischungen die Vorgabe von maximal 20% Festigkeitsabfall nach Richtlinie SpB erfüllen. Eine höhere EB- Dosierung bedeutet grundsätzlich einen höheren Festigkeitsabfall. (Tab. 3)

Die verschiedenen EB wirken sich aber bei gleicher Dosierung höchst unterschiedlich aus. EB D1 zeigt bei einer geringen Dosierung von 6% d. BM einen Festigkeitsabfall von 6,02% (Mischung

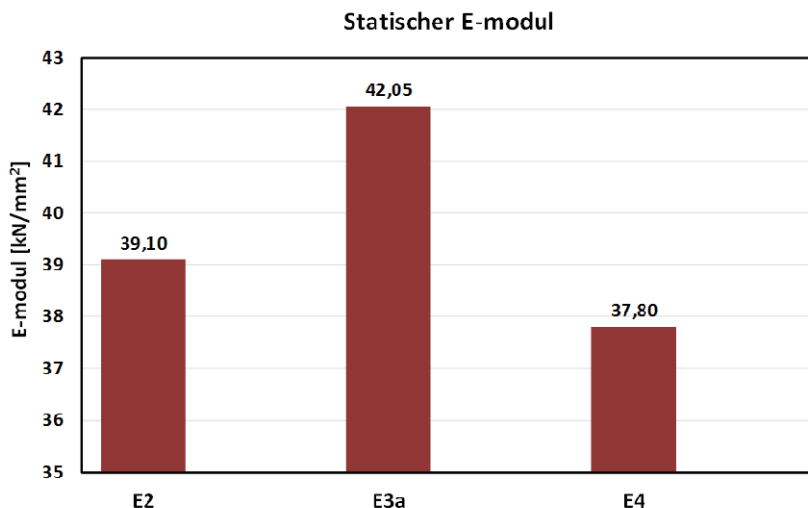


E3b), während durch den EB C2 bei gleicher Dosierung sogar einen Festigkeitszuwachs von 37,79% erzielt wurde. Vergleicht man EB C2 und EB D1 bei einer hohen Dosierung von 11% d. BM, so zeigten Mischungen mit EB D1 bessere Festigkeiten, da diese gegenüber dem Nullbeton nach 28d annähernd gleichbleibt (Mischung E3c), während sie beim EB C2 um 26,62% geringer ausfällt.

**Tabelle 3: Druckfestigkeiten, Nullbeton und Festigkeitsabfall, Versuche ZaB**

Bezeichnung	Spritzbeton <sup>1</sup>			Nullbeton <sup>2</sup>			Festigkeitsabfall [%]
	Dichte	DF 28d EB(M)	DF 90d	Dichte	DF 28d EB(0)	LP- Gehalt im FB <sup>3</sup>	
	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[kg/dm <sup>3</sup> ]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[V%]	
E2 (8% EB C1)	2,524	53,66	61,65	2,464	55,21	8,5	-5
E3a (9% EB C1)	2,531	53,27	62,28	2,393	51,03	n.b.	-13
E3b (6% EB D1)	2,521	44,12	67,94			6	
E3c (11% EB D1)	2,490	47,62	52,81			10,0	-1
E3d (6% EB C2)	2,542	64,69	n.b.			-37	
E3e (11% EB C2)	2,466	34,45	n.b.			27	
E4 (9% EB C1)	2,483	48,94	58,05			2,462	56,78
E5 (9% EB C1)	2,501	43,93	62,92	2,385	51,90	8,0	8
E6a (9% EB D1)	2,477	34,34	53,45	2,415	45,02	8,5	17
E6b (6,5% EB D1)	2,482	46,07	n.b.				-11
E7 (6,5% EB D1)	2,496	41,21	57,74 <sup>4</sup>	2,432	47,72	8,0	6
E8 (9% EB C1)	2,518	60,00	69,76	2,460	59,01	8,0	-11
E9 (9% EB D1)	2,507	42,48	55,21	2,434	56,29	8,0	18

Der Statische E- Modul (Abb. 21) wurde für die Mischungen E2, E3a und E4 an Bohrkernen mit den Abmessungen d=100, h=300 im Probenalter von 56d nach ONR 23303 (2010) geprüft



**Abbildung 21: Statischer E-Modul, ZaB**

<sup>1</sup> Lagerung: bis zur Prüfung unter Wasser (gebohrt ca. 48h nach dem Spritzen)

<sup>2</sup> Lagerung nach ONR 23303 (2010): 7d unter Wasser und 21d an Raumluft

<sup>3</sup> Bestimmt nach ÖN EN 12350-7 (2009) ca. 10 min nach Wasserzugabe

<sup>4</sup> Mittelwert aus 2 BK

Die mittlere Wassereindringtiefe wurde nach ONR 23302 durchgeführt (Tab. 4).

**Tabelle 4: Mittlere Wassereindringtiefe, ZaB**

	Mittlere Wassereindringtiefe (Mittelwert)
	[mm]
E2	7
E3a	10
E3b	9
E3c	7
E4	8
E6a	10
E7	9
E8	8
E9	8

Für die Prüfung der Beständigkeit gegen den Frost Tausalz Angriff wurden bei den Mischungen E2, E3a und E4 eine Prüfung in Annäherung des CDF-Tests durchgeführt (Tab. 5). Abweichend zur Prüfanweisung wurden die Bohrkerne 56 Tage Unterwasser gelagert und im Anschluss 14 Tage bei 20°C und 65% RH akklimatisiert

**Tabelle 5: Ergebnisse CDF-Test, ZaB**

Mischung	Abwitterungsmasse/Fläche [g/m <sup>2</sup> ]	AF [mm]	L300 %
E2	1639	0,40	1,82
E3a	769	0,29	3,33
E4	1806	0,33	2,09

**KAT 3**

Die Mischung K2f wurde im Tunnel eingesetzt. Nach Abschluss der Frühfestigkeitsprüfungen wurden aus den Spritzkisten K2f Bohrkerne (DM100, H100) entnommen und weitere Druckfestigkeitsprüfungen vorgenommen. Die Ergebnisse sind in Tab. 6 und 7 angeführt.

**Tabelle 6: Festigkeitsprüfungen an Spritzbetonbohrkernen KAT3**

Prüfzeitpunkt (Tage)	Druckfestigkeit [MPa]*
4	26,8
7	33,0
28	51,8

\* Mittelwert der Druckfestigkeit von jeweils 3 Bohrkernen

Die Festigkeiten entsprechen bereits nach 7d den Anforderungen an den Beton für die Wendenische SpC 12/15 und auch an den deklarierten Beton SpC 20/25.

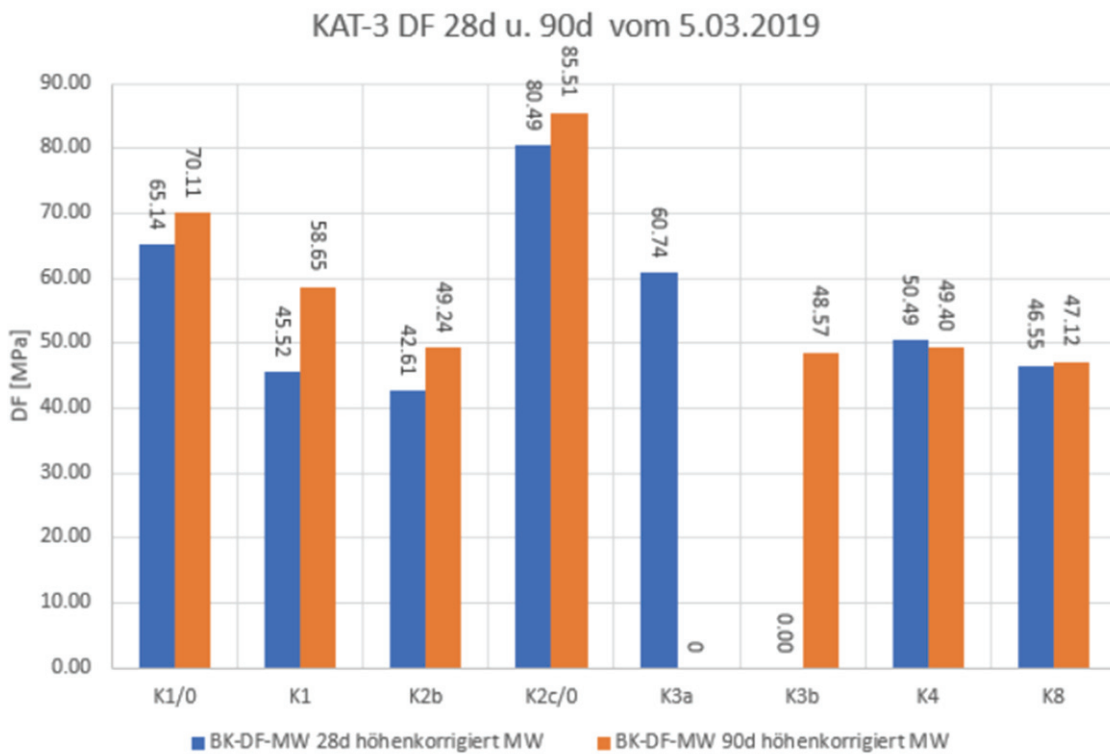
**Tabelle 7: Festigkeitsprüfungen am Nullbeton**

Prüfzeitpunkt (Tage)	Druckfestigkeit [MPa] *
28	59,5

\* Mittelwert der Druckfestigkeit von 2 Nullbetonwürfeln

Der Festigkeitsabfall beträgt <20% und entspricht damit der Richtlinie Spritzbeton (2009).

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen nach 28d und 90 Tagen aller Mischungen sind in Abb. 22 und Abb. 23 dargestellt und der errechnete Festigkeitsabfall ist weiter unten angeführten Tabelle 8 zu entnehmen.



**Abbildung 22: Druckfestigkeit Bohrkern (1) (/0 steht für gespritzten Nullbeton)**

Die Festigkeiten bleiben für alle Mischungen auf moderatem Niveau. Der Festigkeitsanstieg zwischen 28 und 90 Tagen ist für die meisten Mischungen außer K4 und K8 recht ausgeprägt. Die gegenüber den vorangegangenen Großspritzversuchen moderaten Festigkeiten sind noch Gegenstand laufender Untersuchungen.

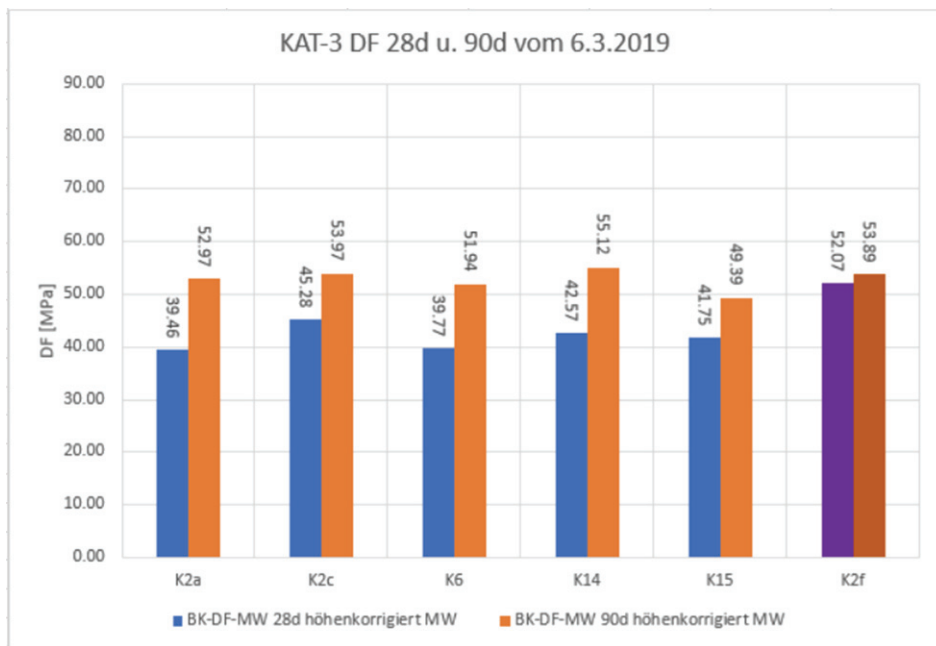


Abbildung 23: Druckfestigkeit Bohrkerne (2)

Tabelle 8: Druckfestigkeiten, Nullbeton und Festigkeitsabfall, Versuche KAT 3

Bezeichnung	Datum	Mischung	Spritzbeton**		Nullbeton***[		Festigkeitsabfall
			DF 28d	DF 90d	Dichte	DF 28d	
			EB(M)			EB(0)	
			[N/mm²]	[N/mm²]	[kg/dm³]	[N/mm²]	[%]
<b>K1</b>	04.03.19	<b>Ref-S</b>	45.52	58.65	2.371	74.1	33%
<b>K1 ohne EB*</b>	04.03.19		65.14	70.11	2.377*	n.b.	-
<b>K2a</b>	06.03.19	<b>Mix-P</b>	39.46	52.97	2.207	59.5	28%
<b>K2b</b>	05.03.19		42.61	49.24			22%
<b>K2c</b>	06.03.19		45.28	53.97			17%
<b>K2f (Vortrieb)</b>	07.03.19		52.07	53.89	5%		
<b>K2 ohne EB*</b>	05.03.19		80.49	85.51	2.402*		40%
<b>K3a</b>	05.03.19		60.74	n.b.	2.207		-11%
<b>K4</b>	05.03.19	<b>Mix-P-BMn</b>	50.49	49.4	n.b.	n.b.	n.b.
<b>K6</b>	06.03.19	<b>Mix-P-wbni</b>	39.77	51.94	2.264	69.4	38%
<b>K7</b>	06.03.19	<b>Mix-P-HOSe</b>	24.22	n.b.	2.171	47.4	44%
<b>K8</b>	05.03.19	<b>Mix-P-wbho</b>	46.55	47.12	2.210	52.7	4%
<b>K11</b>	06.03.19	<b>Mix-E</b>	26.74	n.b.	2.269	53.4	46%
<b>K14</b>	06.03.19	<b>Mix-P-oL</b>	42.57	55.12	n.b.	n.b.	n.b.
<b>K15</b>	06.03.19	<b>Mix-P-wbho2</b>	41.75	49.39	2.140	45.5	0.2%

\*gespritzter NB

n.b. = nicht bestimmt

\*\* Lagerung: bis zur Prüfung unter Wasser (gebohrt ca. 48h nach dem Spritzen)

\*\*\* Lagerung nach ONR 23303 (2010): 7d unter Wasser und 21d an Raumluft

Der statische E-Modul wurde für K1 mit 34737 N/mm<sup>2</sup>, für K2c mit 32237, für K7 mit 28836 und für K11 mit 28750 N/mm<sup>2</sup> bestimmt.

Bei der Wassereindringtiefe nach ONR 23302 lassen sich nur minimale Unterschiede feststellen. (Tab. 9)

**Tabelle 9: Mittlere Wassereindringtiefe, KAT 3**

Mischungen	Mittlere Wassereindringtiefe (Mittelwert)
	[mm]
K1	11,0
K2c	11,0
K6	
K7	10,0
K11	11,1
K15	

Für die Prüfung der Beständigkeit gegen den Frost Tausalz Angriff wurden bei den Mischungen K1, K2c und K7 eine Prüfung in Annäherung des CDF-Tests durchgeführt (Tab. 10). Abweichend zur Prüfanweisung wurden die Bohrkern 56 Tage Unterwasser gelagert und im Anschluss 14 Tage bei 20°C und 65% RH akklimatisiert.

**Tabelle 10: Ergebnisse CDF-Test, KAT 3**

Mischung	Abwitterungsmasse/Fläche [g/m <sup>2</sup> ]
K1	339
K2c	575
K7	835

### **AP 6b Dauerhaftigkeitsuntersuchungen (RV, Porosität)**

Dauerhaftigkeitsuntersuchungen werden im AP 6b und 7b behandelt.

In AP 6 b liegt der Fokus auf die Auswertung der Spritzversuche. Ursprünglich waren nicht so viele Spritzversuche geplant. Deshalb wird hier über RV und Porosität berichtet, unter AP7b über Karbonatisierung und Sulfat und Chlorid.

### **Reduziertes Versinterungspotential**

Die RV-Ergebnisse der Versuche **Zams II** ergaben sehr geringe Werte für alle Mischungen hergestellt mit CEM II/B-M. Die Ergebnisse variieren zwischen 0.27-0.32 kg/t Ca. Eine Ausnahme stellt die Referenz (tba Standardmischung) mit reinem SR0 als Bindemittel dar. Bei dieser Mischung betrug der RV Wert 0.74 kg/t Ca (siehe Abb. 24).

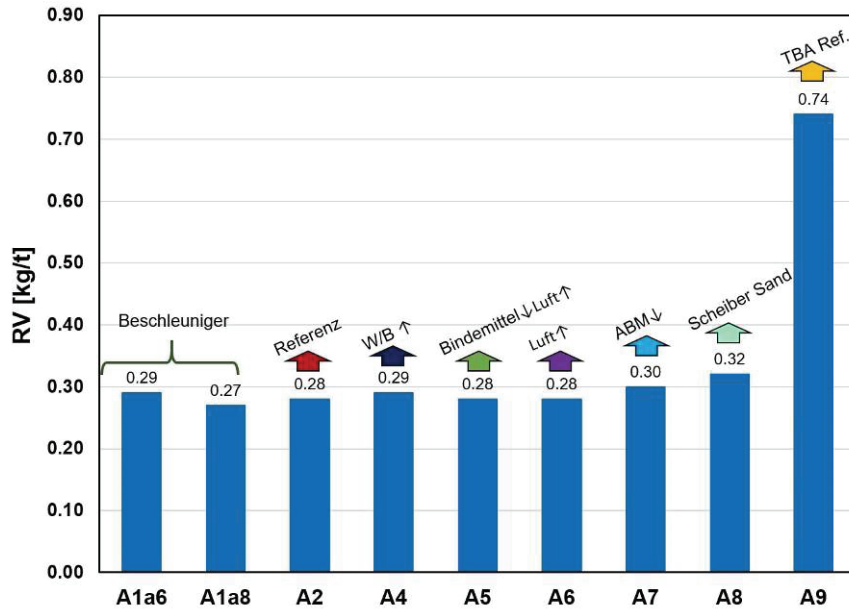


Abbildung 24: RV-Resultate der Mischungen von Zams II

Bei den RV-Test der Versuche **ZaB** wurden für alle Mischungen sehr niedrige RV-Werte ermittelt (0.28-0.33 kg/t Ca) (siehe Abb. 25). Weitere Untersuchungen zur Erklärung dieser besonders niedrigen Werte laufen noch.

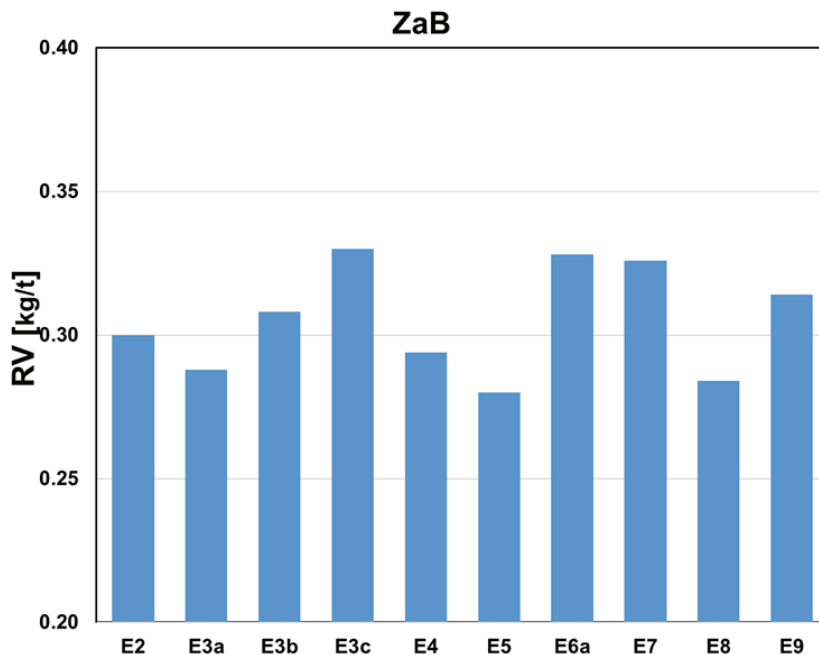


Abbildung 25: RV-Resultate der Mischungen von ZaB

Die RV-Ergebnisse der Versuchsserie **KAT3** ergab im Vergleich zu Zams II und ZaB höhere Werte. Die Referenzmischung K1 hatte den höchsten Wert mit 0.5 kg/t Ca. Die Mischungen hergestellt mit den Mischungen mit dem neuen AHWZ ergaben Werte von 0.37 – 0.48 kg/t Ca (Abb. 26). Weitere Versuche zu der Serie KAT3 sind noch am Laufen. Dabei soll abgeklärt werden, warum die Ergebnisse (z.B. Druckfestigkeit und RV) gegenüber Versuchen davor relativ ungünstig ausfallen, untersucht wird der Unterschied zwischen dem verwendeten HÜS und Metakaolin und in den vorangegangenen Laborversuchen untersuchten Produkten, weiters ev, Verunreinigungen bei der Mischung des AHWZ, die Wirkung des Verzögerers auf Zuckerbasis und

das Zusammenspiel der Mischung mit dem Erstarrungsbeschleuniger.

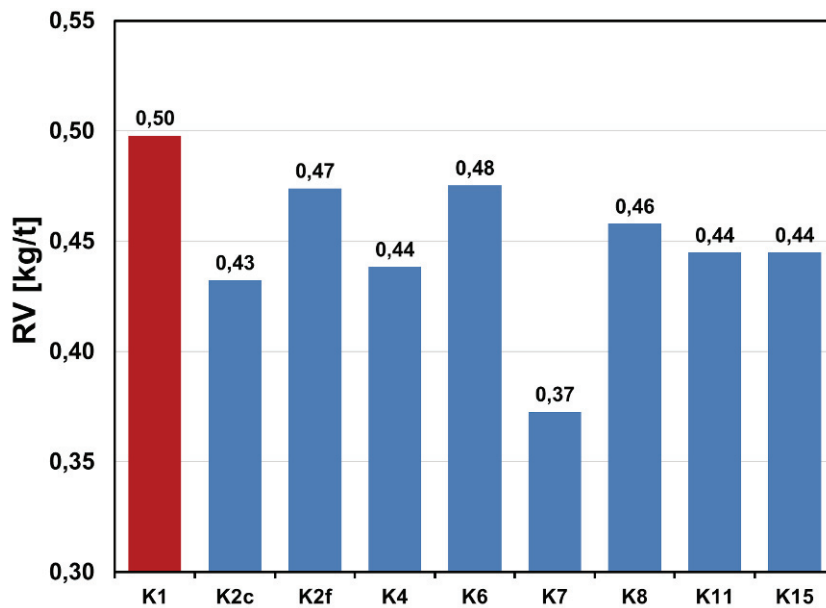


Abbildung 26: RV-Resultate der Mischungen von KAT 3

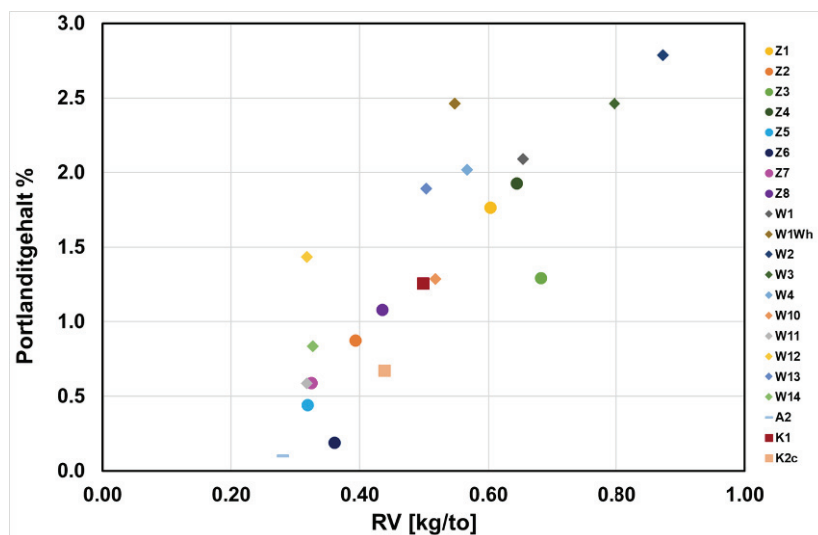
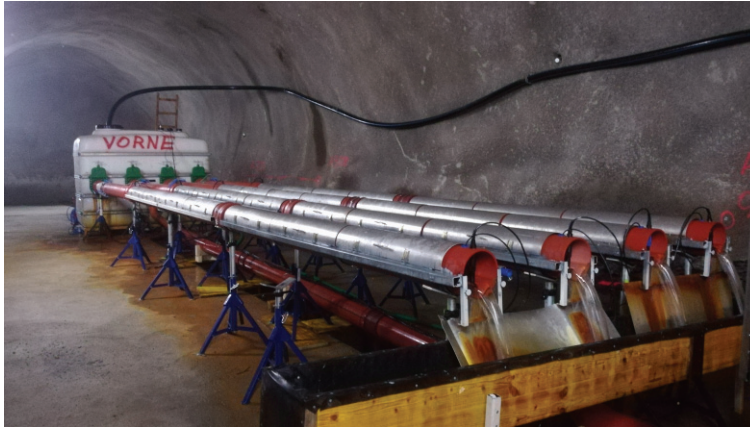


Abbildung 27: Zusammenhang aller Proben zwischen Portlandit und RV

Die Abbildung 27 zeigt den Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der RV-Prüfung und dem Portlandit-Gehalt bestimmt mit TG nach mehr als 56 Tagen. Im Diagramm sind die Ergebnisse von Zams I, Wietersdorf II und die Rezepturen K1 und K2c von KAT3 dargestellt. Weitere Details und Auswertung sind im Bericht Dauerhaftigkeit zu finden.

Zusätzlich zur RV Bestimmung konnte eine Auslagerung in der Versinterungsstrecke des Koralmtunnels (Abb. 28) vorgenommen werden. Über die Ergebnisse wird später berichtet. Die Besonderheiten des Auslagerungsmediums und der Auswertung sind:

- Örtliches Bergwasser wird entnommen (ohne Kontakt mit Spritzbeton)
- Tiefengrundwasser
- Enthält viel CO<sub>2</sub> (Säuerling) und verschiedene Bakterien
- Monitoring von pH und EC erfolgte
- Messung des Portlanditgehalts nach der Auslagerung zeigt eine deutliche Abnahme



**Abbildung 28: Auslagerung unserer Proben als Gast in der Versinterungsstrecke des Koralmtunnels**

### Porosität

Mit Quecksilberdruckporosimetrie (engl. mercury induction porosimetry = MIP) kann die Gesamtporosität und die Porengrößenverteilung von Betonen bestimmt werden. Hierbei wird unter hohen Drücken (bis 200 MPa) Quecksilber in die Probe gepresst und aus dem Druck und der eingepressten Menge Quecksilber die Porengrößenverteilung und Gesamtporosität bestimmt. Diese Messungen wurden von Herbst 2018 bis Winter 2019 sowohl an Nass- als auch Trockenspritzbetonen (insgesamt 20 Mischungen) von Wietersdorf II, Zams II und ZaB bei Smart Minerals durchgeführt. Die Porenverteilung wurde für die Mischungen im Porenbereich von 100  $\mu\text{m}$  bis 7,3 nm bestimmt. Die Auswertung dieser Porengrößenverteilungskurven erlaubt es, den mittleren Porendurchmesser und die Stelle der größten Steigung (Modalwert) zu ermitteln, d.h. um diesen Punkt sind die häufigsten Porendurchmesser zu finden. Aufgrund des unklaren Gehaltes an Gesteinskörnung in den jeweiligen Stücken ist eine exakte Bestimmung der Gesamtporosität nicht möglich. (Abb. 29)



**Abbildung 29: Porositätsbestimmung mit MIP**

Die Porengrößenverteilung der untersuchten Mischungen von **Wietersdorf II, Zams II und ZaB**, charakterisiert durch Bestimmung des mittleren Porendurchmessers und des kritischen Porendurchmessers, zeigt deutliche Unterschiede. Trockenspritzbetone mit CEM I SR0 ähneln in der Porenverteilung den Nassspritzbetonen, mit Spritz-Bindemittel hergestellte Trockenspritzbetone zeigen hingegen ungewöhnliche Kurvenformen mit meist mehreren steilen Anstiegen (also Poren gehäuft im Bereich 1000-200 nm und 70-30 nm), was auf zementchemische Besonderheiten des Spritz-Bindemittels und Wechselwirkungen mit anderen Faktoren zurückgeführt wird (Abb. 30). Diese ungewöhnlichen Kurvenformen werden nach Möglichkeit anhand von Trockenspritzbetonen aus Wopfung 2019 weiter untersucht. Im Vergleich sind sich die Nassspritzbetone von Zams II und ZaB jeweils relativ ähnlich. Bei Zams II sind geringe Unterschiede vor allem auf die Variationen der Zusatzmittel zurückzuführen; die Mischung A9 hat aufgrund der stark



abweichenden allgemeinen Zusammensetzung eine gröbere Porenverteilung. Bei ZaB werden Unterschiede vor allem durch verschiedene Beschleunigerdosierungen hervorgerufen, wobei unbeschleunigter Beton vor allem im Bereich von ca. 1000-50 nm mehr Poren aufweist (Abb. 31). Durch Leimversuche (kein Einfluss der Gesteinskörnung) lässt sich ein Anstieg der Porosität und eine Abnahme des kritischen Porendurchmessers bei zunehmender Beschleunigerzugabe feststellen.

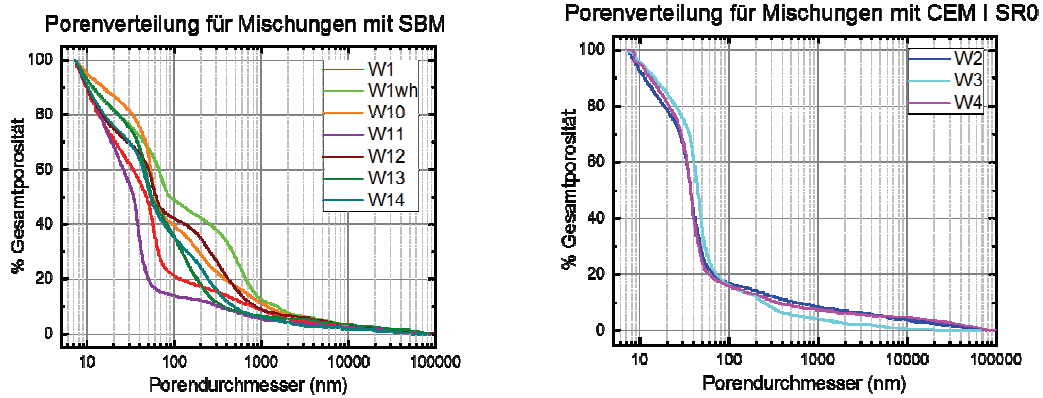


Abbildung 30: Porengrößenverteilung der Trockenspritzbetonmischungen Wietersdorf II, aufgeteilt nach den benutzten Zementen (Spritz-Bindemittel und CEM I 52.5 R SR0)

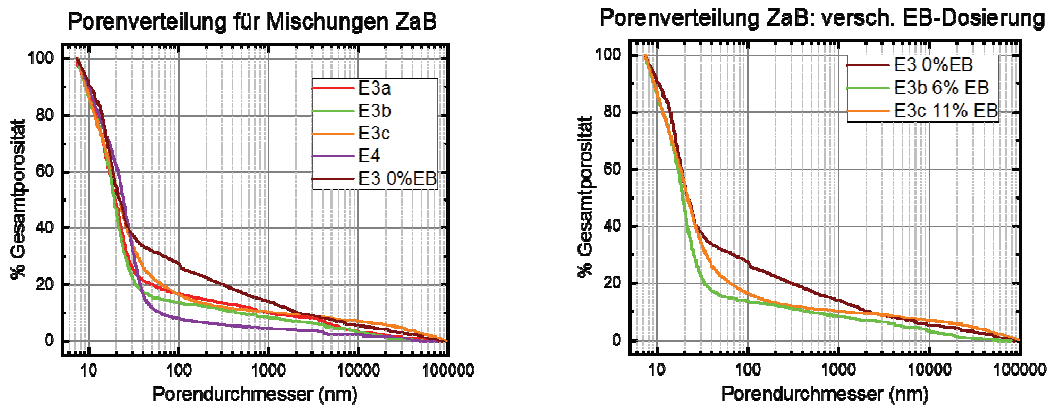


Abbildung 31: Porenverteilung von Proben aus der Serie ZaB mit MIP

**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 auch die Situation nach dem Spritzvorgang mit Berücksichtigung der Rückprallverluste und dem zusätzlich an der Düse zugegebenen Erstarrungsbeschleuniger gegenübergestellt (Abb. 32, Darstellung ohne Rückprall, da bei ZaB und KAT 3 nicht messbar). In der Abbildung 32 ist rechts eine typische Baustellen-Rezeptur bei Sulfatangriff dargestellt. Das aufsummierte Global Warming Potential liegt dabei bei etw 400 kg CO<sub>2eq</sub>/m<sup>3</sup>. Die 3 dargestellten Mischungen der Serie ZaB bestehen Sulfatangriffe (AP7b) deutlich besser als die Mischung A9, der GWP ist aber um etwa 30% reduziert. Im Laufe des 3. FJ wurden auch „Functional Units“ (z.B. kg CO<sub>2eq</sub>/ Frühfestigkeit) in die Betrachtungen mit einbezogen werden. Details finden sich im Bericht Nachhaltigkeit.

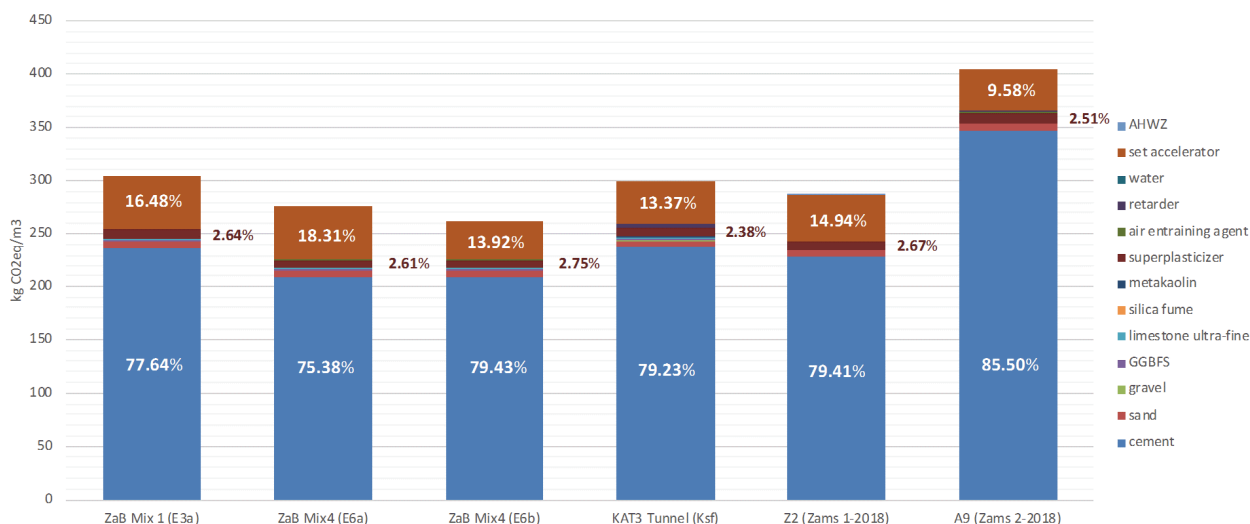


Abbildung 32: Global warming potential (kg CO<sub>2eq</sub>/m<sup>3</sup> of concrete)

## AP 7 Grundlegende Reaktionsmechanismen

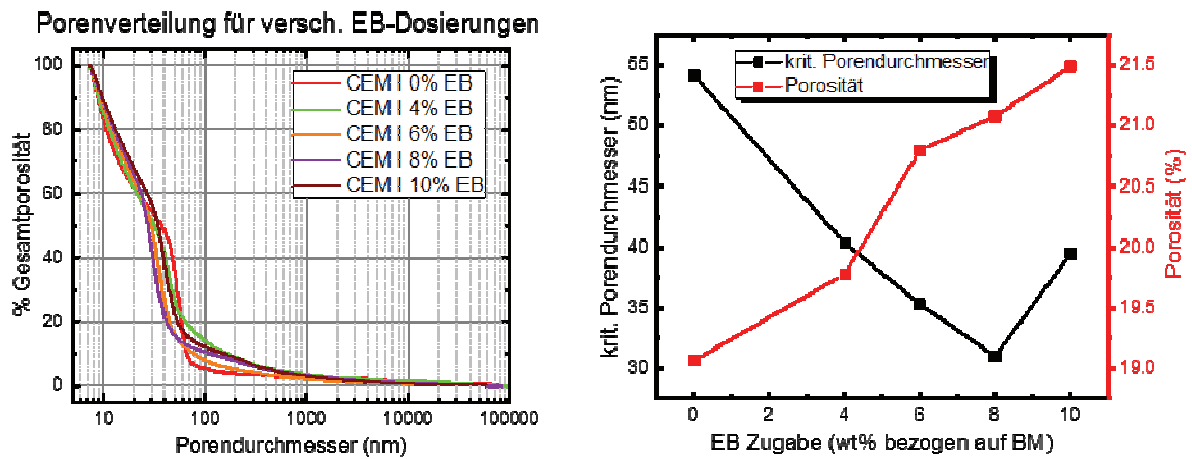
### AP 7a: Hydratation Spritzbeton

In den Berichten des 2. Forschungsjahres wurde bereits über die beschleunigende Wirkung von Feinstkalkzit auf die frühe Hydratation von Nassspritzbeton berichtet. Es wurde beobachtet, dass die Zugabe von feinem Kalksteinmehl in Mischungen, welche mit  $(Al_2(SO_4)_3)$  EB beschleunigt wurden, zu einer signifikanten Steigerung der Frühfestigkeit führte. Der Effekt nahm mit steigender spezifischer Oberfläche des verwendeten Kalksteinmehls zu. Aufgrund der Wichtigkeit der Beobachtungen wurden die Untersuchungen weitergeführt. Im 3. Forschungsjahr wurden zeit-aufgelöste Analysen der flüssigen Phase (Porenlösung), der Porenstruktur, der Mikrostruktur und der festen Phasen durchgeführt und folgende Fragestellungen bearbeitet:

- Einfluss der Beschleunigerdosierung auf die Porosität
- Weitere Untersuchungen zum Hydratationsablauf und zur Wirkungsweise von feinem Kalksteinmehl in Nassmischungen
- Untersuchungen zum Hydratationsablauf und zur Wirkungsweise von feinem Kalksteinmehl in Trockenmischungen
- Voruntersuchungen zur Wechselwirkung mit Verzögerern

Um den im Zuge der Großversuche festgestellten Einfluss der Beschleunigerdosierung weiter zu untersuchen, wurden Versuche mit Leimmischungen vorgenommen (eliminiert den Einfluss der Gesteinskörnung). CEM I 52.5 R wurde mit Wasser (W/B = 0,5) 90 Sekunden lang vermischt und nach einer Wartezeit von 10 Minuten der Beschleuniger für 15 Sekunden eingerührt, wobei 5 verschiedene Beschleunigerdosierungen (0%, 4%, 6%, 8%, 10%; jeweils bezogen auf das Bindemittel) verwendet wurden. Nach 28 Tagen Hydratation wurden kleine Stückchen abgebrochen und wie oben beschrieben behandelt und danach die Porenverteilung mit MIP bestimmt.

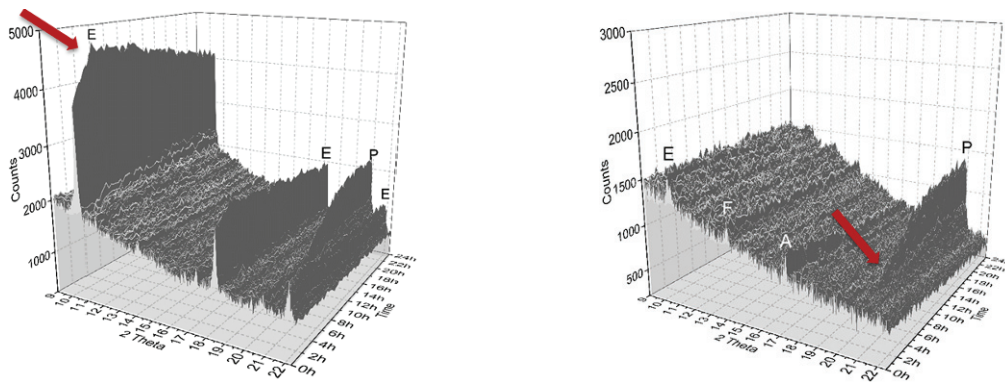
Es zeigt sich eine gute lineare Korrelation der Porosität (im Fall von MIP spiegelt diese die verbundenen Poren wider) mit steigendem Beschleunigergehalt (Abb. 33). Hingegen sinkt der kritische Porendurchmesser mit steigendem Beschleunigerzusatz zunächst, um erst bei einem Zusatz von 10% EB wieder anzusteigen (Abb. 33). Im Gegensatz zu den Spritzbetonproben der Großspritzversuche ergibt sich hier also ein wesentlich eindeutigerer Einfluss des Beschleunigers, da auch die Laborherstellung mit steigendem EB-Gehalt sich immer schwieriger gestaltet.



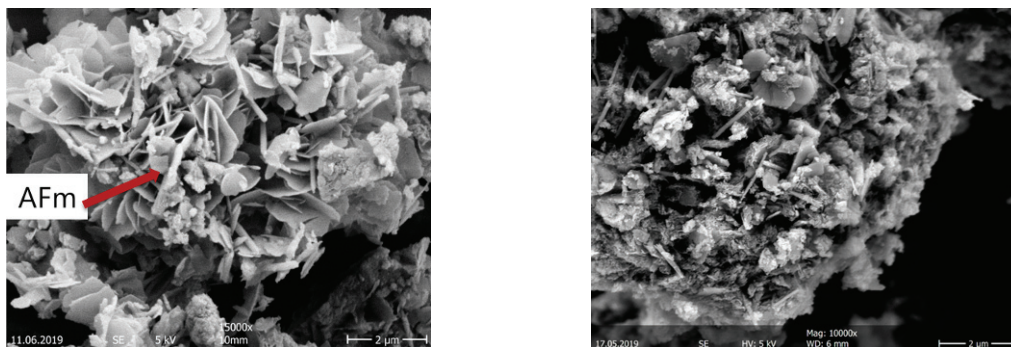
**Abbildung 33:** Links: Porengrößenverteilung von Leimproben mit ansteigender Beschleunigerdosierung. Rechts: Verlauf von kritischem Porendurchmesser und Porosität mit steigender Beschleunigerdosierung

Abb. 34 – 36 zeigen Ergebnisse von insitu XRD Messungen und rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen, bei denen Nass- und Trockenspritzleime gegenübergestellt wurden. Kurz zusammengefasst können aus den Hydratationsuntersuchungen von Spritz-Bindemittel versus Nassmischungen mit AF-Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub> EB folgende Erkenntnisse gewonnen werden:

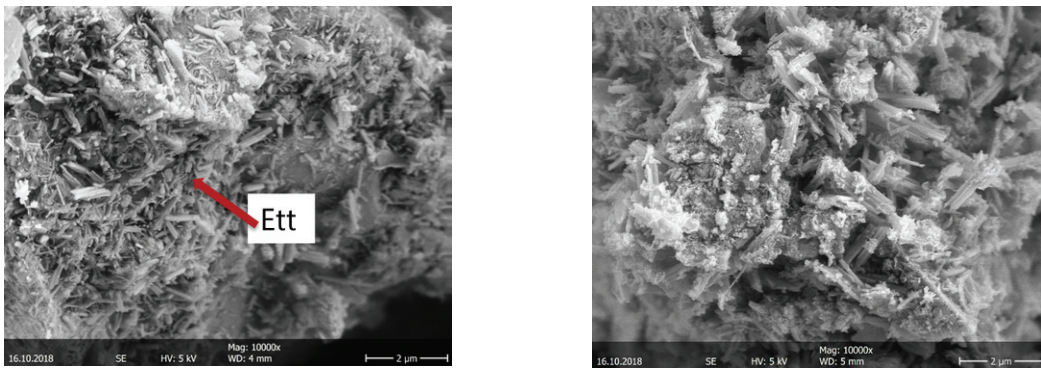
Das schnelle Erstarren von Spritz-Bindemittel erfolgt nicht durch die Bildung von Ettringit, sondern durch (röntgenamorphe) AFm Phasen. Es erfolgt eine schnellere Bildung von C-S-H und Portlandit als bei Nassmischungen mit AF-EB. Feinstkalzit zeigt eine geringere Wirkung bezüglich der Erhöhung von Reaktivität/Hydratation in Trocken-Mischungen.



**Abbildung 34:** Insitu XRD Nass vs. Trockenspritzen



**Abbildung 35:** Rasteraufnahmen eines Leims mit Spritz-Bindemittel sofort nach Herstellung (li.) und nach 6 Stunden Hydratation (re.)

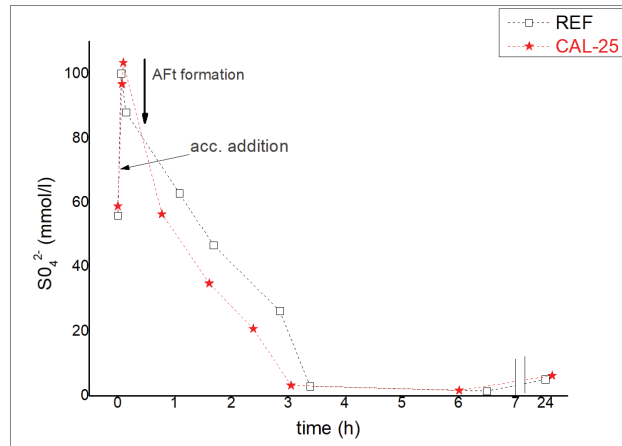
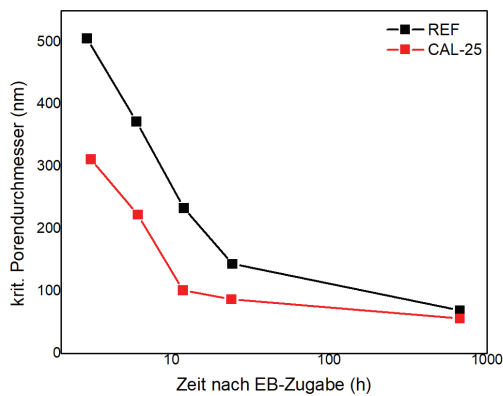


**Abbildung 36: Rasteraufnahmen eines Leims mit CEM I und AF-EB sofort nach Herstellung (li.) und nach 6 Stunden Hydratation (re.)**

Die Versuche mit und ohne Zugabe von Feinstkalzit im Nassspritzbeton haben folgende neue Erkenntnisse gebracht:

- Mit Feinstkalzit kommt es zu einer schnelleren Lösung von  $C_3S$ , was einer schnelleren Bildung von C-S-H und damit verbunden zu höherer Festigkeit führt.
- Durch die schnellere Reaktion mit Feinstkalzit kommt es in den ersten Stunden/Tagen zur Ausbildung einer feineren Porenstruktur (Abb. 37 rechts).
- Sulfat wird durch die Anwesenheit von Feinstkalzit schneller verbraucht (Abb. 37 links).
- Am Ende der Hydratation verhält sich das Feinstkalzit „inert“ und die Unterschiede gleichen sich wieder aus

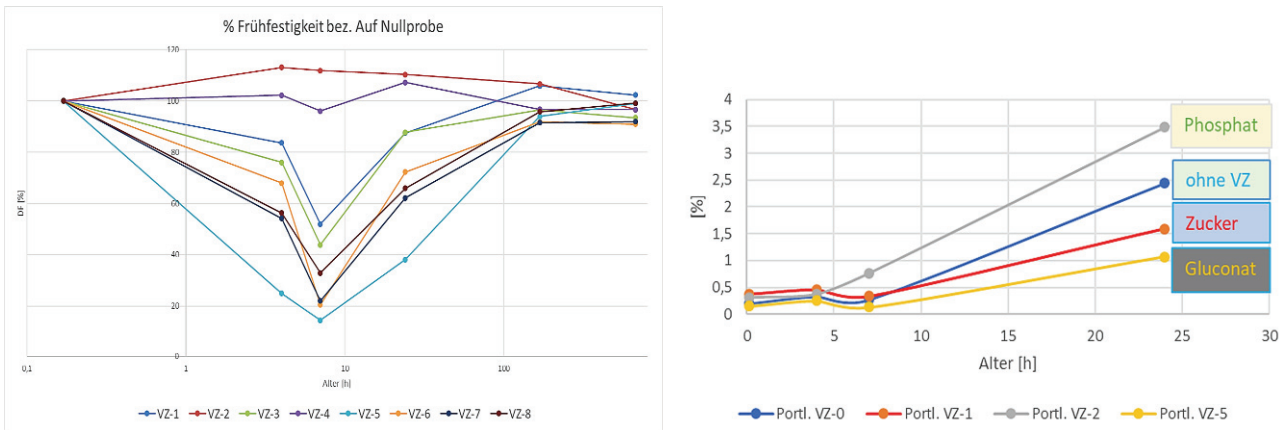
Abnahme krit. Porendurchmesser über die Zeit



**Abbildung 37: Porosität (li.) und pH der Porenlösungen (re.) von Nassspritzbeton mit (rot) und ohne (schwarz) Feinstkalzit über die Zeit**

Voruntersuchungen im Nachgang zu KAT3 haben gezeigt, dass die Wirkung von Verzögerern auf unterschiedlicher Basis vom Erstarrungsbeschleuniger nicht vollständig aufgehoben werden. Bei manchen Produkten konnte eine stark reduzierte Festigkeitsentwicklung und Unterschiede bei der Bildung von Portlandit nach mehreren Stunden beobachtet werden (Abb. 38).





**Abbildung 38: Auswirkungen unterschiedlicher Verzögerer (1%) bei Laborversuchen mit CEM I hoch, AHWZ KAT3 2:1, W/B 0.5, PCE 1% und EB 7%. Entwicklung der relativen Druckfestigkeitsentwicklung zu einer Mischung ohne VZ (li.) und Quantifizierung der Portlanditgehalte (re.)**

Folgende vorläufig Erkenntnisse konnten gewonnen werden:

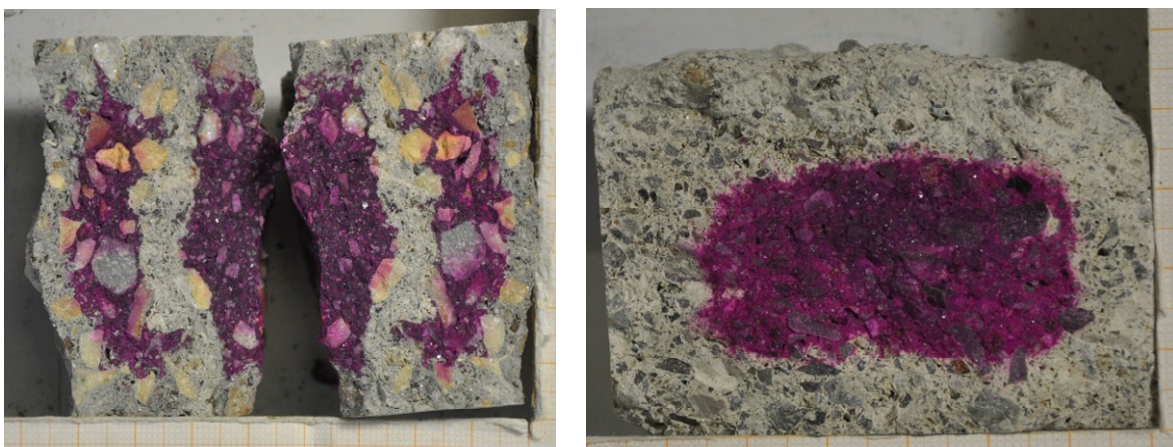
- Zucker vermindern die Frühfestigkeit drastisch.
- Phosphate und Phosphonsäure wirken neutral bis leicht positiv auf die Festigkeit.
- Monosaccharide vermindern die Festigkeit stark, auch in Mischung mit Phosphaten.
- Phosphonobutan-Tricarbonsäure vermindert ebenfalls die Frühfestigkeit aber nicht so stark wie Zucker.
- Ettringitbildung und Alit-Abbau werden nur wenig beeinflusst während bei der Portlandit-Bildung deutliche Unterschiede auftreten
- Für Spritzbeton sind Verzögerer auf Phosphat- oder Phosphonsäure-Basis zu empfehlen

### AP 7b: Dauerhaftigkeit (Karbonatisierung, Sulfat/Thaumasit, Chlorid)

Nachdem im 2. und 3. FJ große Mengen an unterschiedlichen gespritzten Proben vorlagen und geprüft wurden, wird das Kapitel Dauerhaftigkeit geteilt: RV und Porosität sind daher unter AP 6b behandelt.

### Karbonatisierung und Lagenbildung

Das doppelte Brechen der Proben hat gezeigt, dass es beim Nassspritzbeton von ZAMS II und ZaB durch Lagenbildung zu inhomogenen Karbonatisierungstiefen kam (Abb. 39). Diese Lagen, welche vermutlich eine höhere Porosität besitzen, weisen eine deutlich tiefer fortschreitende Karbonatisierung auf. Bei den Trockenspritzbetonen von Wietersdorf II konnte keine Lagenbildung beobachtet werden.



**Abbildung 39: Beispiele für Bruchbild von Nassspritzbeton (li. E9 ZaB) mit Lagenbildung (re. WII) ohne Lagen**

Die Ergebnisse der Karbonatisierungsraten ( $K_{ACC}$  Selektiert) reichen bei:

- Wietersdorf II von 0,4 bis 1,4 mm/ $\sqrt{d}$
- Zams II von 0,8 bis 1,2 mm/ $\sqrt{d}$
- ZAB von 0,6 bis 1,3 mm/ $\sqrt{d}$

Die Ergebnisse der Mischungen der Versuche von Wietersdorf II und ZaB sind der folgenden Abbildung 40 zu entnehmen. Analysen mittels Thermogravimetrie zeigen, dass die Karbonatisierungsrate und vor allem das Ausmaß der Ca-Auslaugung vom Portlanditgehalt abhängen (Abb. 41). Weitere Einflussfaktoren sind die Porosität bzw. auch die Konzentration weiterer Ca-haltiger Zementphasen und Hydratationsprodukte (vor allem C-S-H), welche bei der Karbonatisierung wahrscheinlich eine stärkere Rolle spielen als beim Test zum reduzierten Auslaugungspotential. Durch den Test der Karbonatisierung wurde auch das Problem der Lagenbildung beim Spritzbeton stärker sichtbar. Bei der Karbonatisierung führen die größeren Karbonatisierungstiefen von Spritzlagen zu deutlich unterschiedlichen Karbonatisierungsraten. Weiters muss bedacht werden, dass diese Spritzlagen bei allen Dauerhaftigkeitstests einen gewissen Einfluss haben werden, der aber oftmals schwierig zu bestimmen ist.

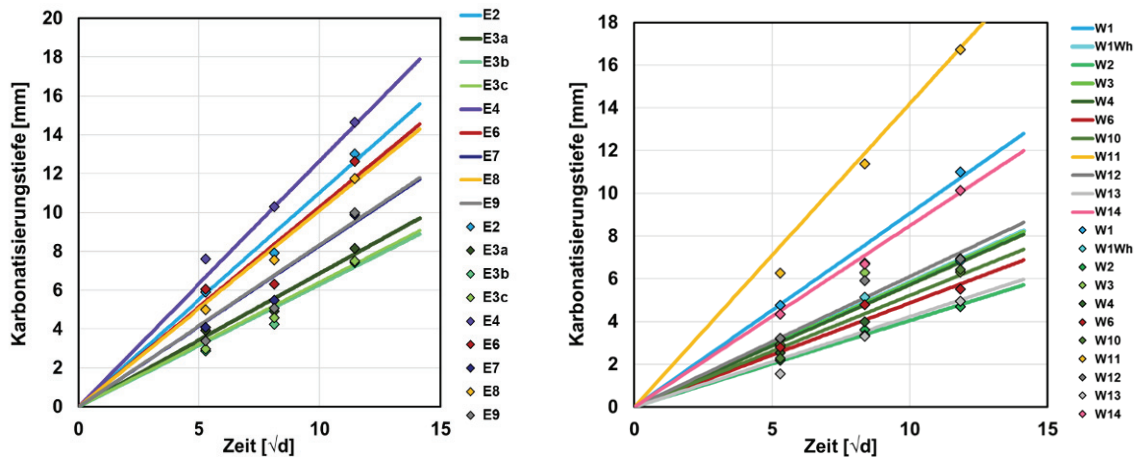


Abbildung 40: Gemessene Karbonatisierungstiefen mit den interpolierten Geraden vom ZaB (li.) und Wietersdorf II (re.)

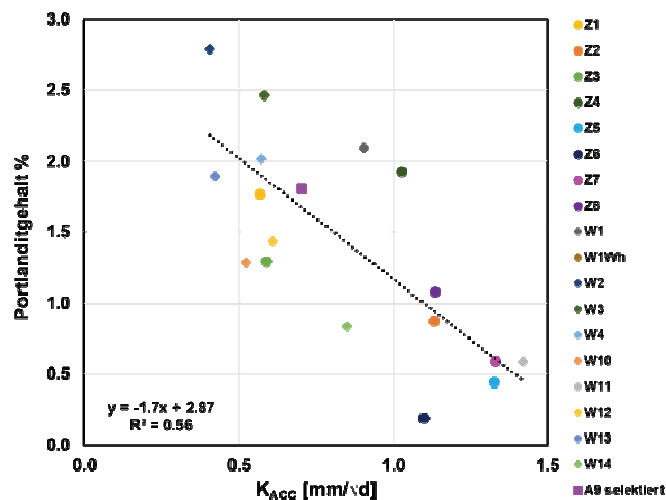


Abbildung 41: Portlanditgehalt vs. Karbonatisierungsrate

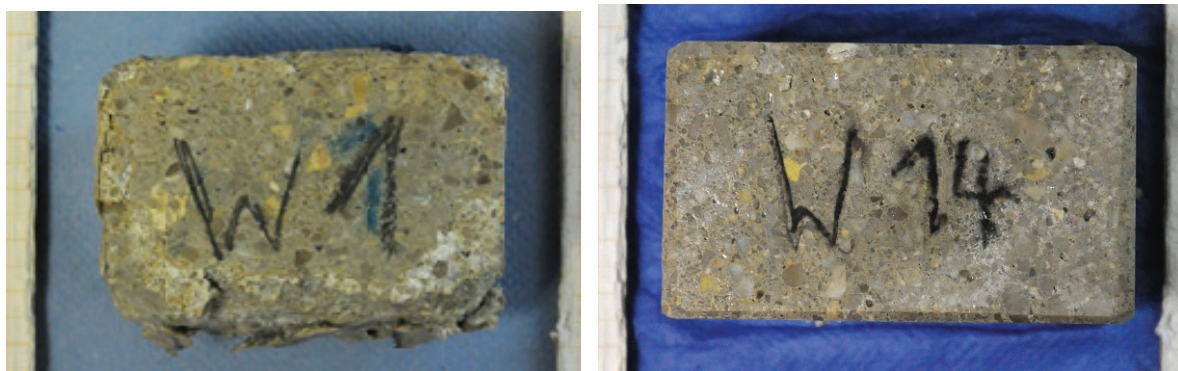
### Sulfat/Thaumasit 2 Versuchsdurchführungen

Die Anfälligkeit von Beton gegen Sulfatangriff ist ein vielschichtiges Problem, und einer großen Zahl an Testmethoden stehen verschiedene Angriffsarten (z.B. Thaumasitangriff, expansiver Angriff, Ausblühungen) und Einflussfaktoren (z.B. Sulfatkonzentration, chemische Zusammen-

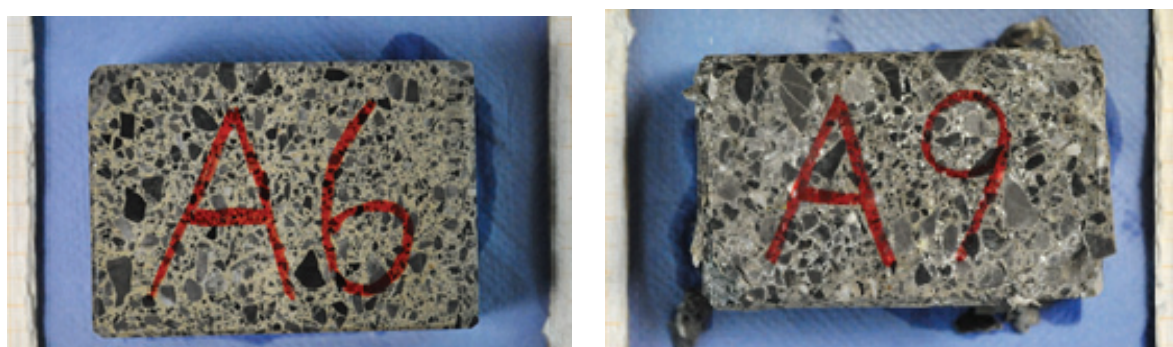
setzung, Mineralogie, Dichtigkeit, Porenverteilung) gegenüber. In Reaktion darauf wurden mehrere verschiedene Testmethoden gewählt und ergänzend Porositätsmessungen durchgeführt, um ein besseres Verständnis für das Zusammenspiel dieser Einflussfaktoren speziell bei Spritzbetonen zu erhalten.

Im Folgenden werden Ergebnisse sowohl vom Thaumasit-Sulfatangriff (Auslagerung von Prismen in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung unter Zugabe von Calcit und Gips bei  $5^\circ\text{C}$ ; Prüfung durch visuelle Beurteilung, Masseverlust bzw. Mikrosonde) als auch Tests der Längenänderung in Anlehnung an die Schweizer Norm SIA 262 (Trocknungszyklen bei  $50^\circ\text{C}$  und Lagerung in 5%  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ -Lösung) dargestellt.

Fast alle Prismen von Wietersdorf II (Abb. 42) zeigen nach 13 Monaten bereits gewisse Schädigungen (Ausnahmen sind W11 und W14), während bei den Prismen von Zams II (Abb. 43) bis jetzt nur A9 erkennbare Schäden aufweist. Für die Mischungen von Zentrum am Berg, anhand derer das Verhalten von Spritzbeton und unbeschleunigtem Nullbeton untersucht wird, ist zum jetzigen Zeitpunkt, etwa 8 Monate nach Prüfbeginn, noch keine Schädigung feststellbar. Die Auslagerung wird jedenfalls für sämtliche Versuchsserien fortgesetzt werden, um auch die Langzeit-Auswirkungen von Thaumasitangriff auf Nass- und Trockenspritzbeton besser verstehen zu können.



**Abbildung 42: Zustand von Versuchsprismen von Wietersdorf II nach 13 Monaten Auslagerungszeit. (Weitere Bilder im Bericht Dauerhaftigkeit)**

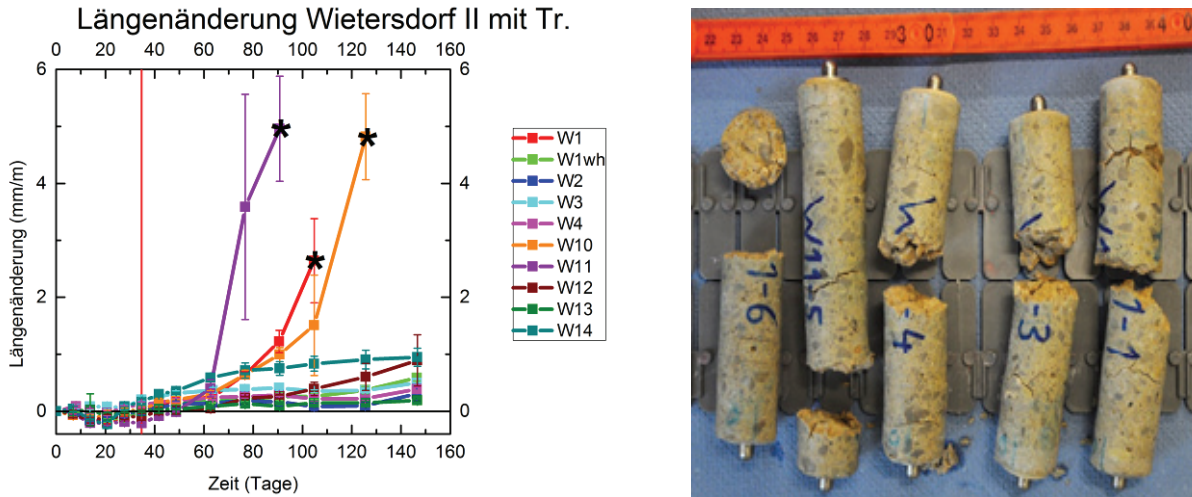


**Abbildung 43: Zustand der Versuchsprismen von Zams II nach 12 Monaten Auslagerungszeit**

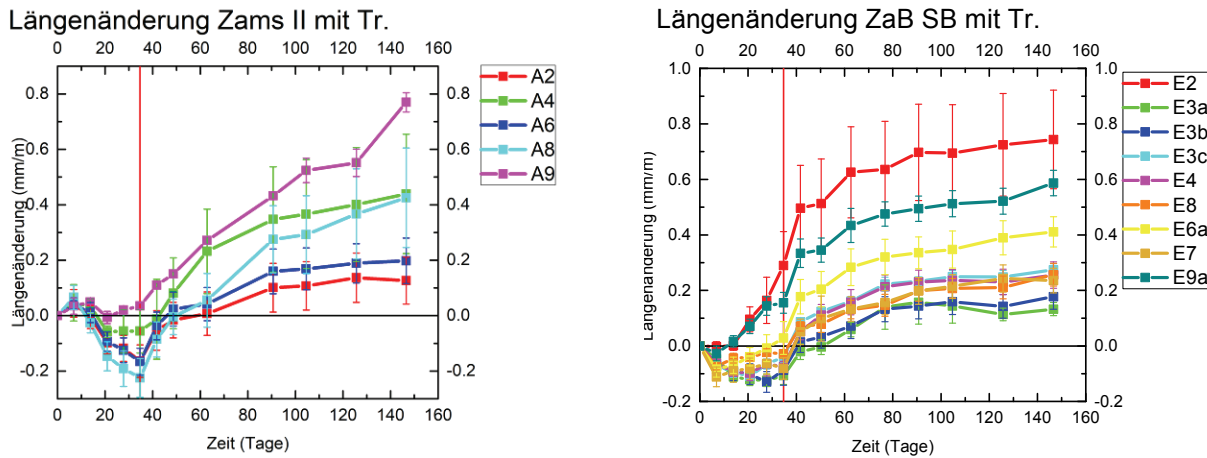
Der **Längenänderungstest** zeigt, dass besonders Trockenspritzbetone W1, W10 und W11 von Wietersdorf II (Abb. 44) hohe Dehnungen aufweisen und innerhalb von 80 bis 100 Tagen zerstört werden. Andere Trockenspritzbetonproben, Nassspritzbetone von Zams II und beschleunigte und unbeschleunigte Nassspritzbetone vom Zentrum am Berg (Abb. 45) weisen Sulfatdehnungen von unter 1 mm/m nach etwa 150 Tagen Prüfdauer auf. Werden keine Trocknungszyklen durchgeführt, geht der Sulfatangriff deutlich langsamer voran, allerdings lassen sich zum jetzigen Zeitpunkt keine deutlichen Unterschiede in den jeweiligen Trends feststellen.



Der Einsatz von C<sub>3</sub>A-freiem Zement und/oder kombinierten Zusatzstoffen, vermag die zuletzt berichteten Dauerhaftigkeitsprobleme des Metakaolins abzuschwächen, wobei vor allem die Kombination mit größeren Mengen Hüttensand vorteilhaft sein dürfte. Als „Grenzwert“ für eine im SIA-Längenänderungstest gute Sulfatbeständigkeit scheint sich immer mehr eine Dehnung von maximal 0.5 bis 1 mm/m nach 150 Tagen herauszukristallisieren.

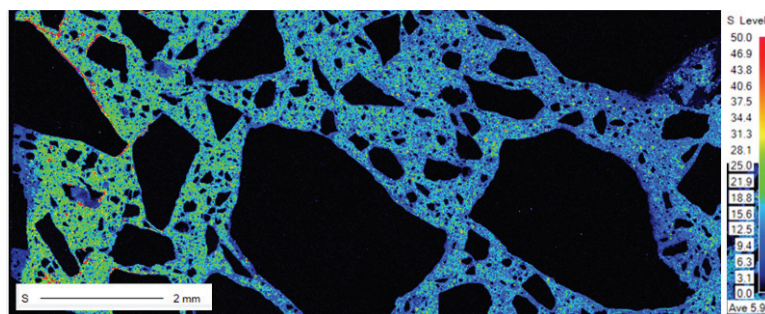


**Abbildung 44:** Längenänderung der Mischungen von Wietersdorf II mit Trocknungszyklen. Die vertikale rote Linie im Diagramm kennzeichnet das Ende der Trocknungszyklen und den Beginn der kontinuierlichen Auslagerung. Die Linien der Mischungen W11, W1 und W10 enden bereits vor dem Abschluss der Prüfung, da durch das Zerbrechen der Bohrkern keine Längenmessungen mehr möglich waren (\*). Rechtes Bild: Zerstörte Probe W11 nach 90 Tagen



**Abbildung 45:** Sulfat-Längenänderung, Proben Zams II und Zentrum am Berg, mit EB, mit Trocknung

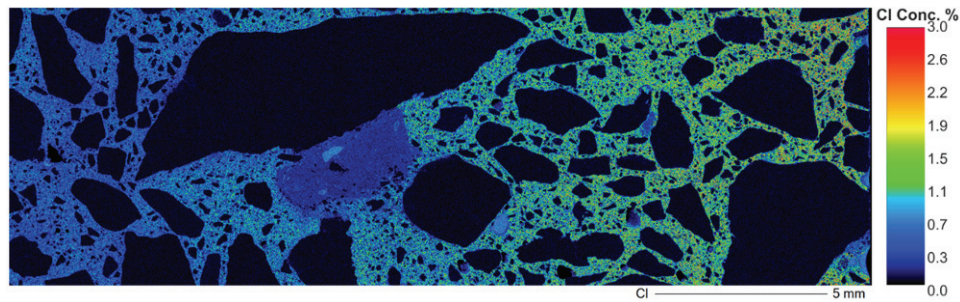
Zusätzlich zu den 2 Auslagerungsversuchen wurde an ausgelagerten Bohrkernen die Eindringung von Sulfat mit Mikrosonde visualisiert (Abb. 46).



**Abbildung 46:** Sulfat-Eindringtiefe mit Mikrosonde und gebildete Phasen (z.B. Gips, Ettringit, Thenardit)



Außerdem wurden ausgewählte Probenstücke in einer 3%-Natriumchloridlösung gelagert und bei einigen davon wiederum mit Mikrosonde die Chloridverteilung sichtbar gemacht. (Abb. 47)



**Abbildung 47: Graduelle Chlorid-Verteilung mit Mikrosonde, Probe Z4**

Weitere Untersuchungen zur Chlorideindringung sind am Laufen bzw. finden sich im Bericht Dauerhaftigkeit.

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

Bereits im ersten FJ wurde versucht die besten Prüfmethode für die Beurteilung der Dauerhaftigkeit und der Untersuchungen der Hydratationsvorgänge herauszufinden. Im 2.FJ wurden dann gewisse Verfeinerungen und Entwicklungen berichtet. Im 3.FJ wurden folgende zusätzliche Verfahren eingesetzt:

- Micro-CT für Porositätsuntersuchungen
- InSitu-Raman-Sonde für Phasenumwandlungen (War nicht sehr erfolgreich)
- In-Situ-XRD als Haupttool für Hydratationsstudien
- Porenlösungen für Hydratationsstudien
- TEM für Hydratationsstudien

## **AP9 Empfehlungen und Fazit**

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

#### Trockenspritzen:

- Ein Teil des Spritz-Bindemittels kann gut mit abgestimmten Zusatzstoffen beim Trockenspritzverfahren 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 gleichmäßigen Verlauf der Festigkeitsentwicklung, sehr hohe Festigkeiten und zeigen bezüglich RV-Werten und WU ein hohes Dauerhaftigkeitspotenzial.

#### Nassspritzen:

- 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. Bei Sulfatangriff ist Metakaolin nur in Kombination mit Hüttensand und anderen Zusatzstoffen zu empfehlen.

- Spritzbetone mit CEM II-B-M Zementen oder speziellen AHWZ, 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, die in ein Verarbeitungsfenster eingebaut werden können.
- Je weniger Klinker im Mischgut, umso höher wurde die EB-Dosierung bezogen auf den Klinkergehalt und in der Folge der Festigkeitsabfall.
- Die Verflüssigerauswahl und Verzögererauswahl ist genauso wichtig wie die Abstimmung des EB auf das Bindemittel. Verzögerer auf Zuckerbasis scheinen für Spritzbeton nicht geeignet zu sein.
- MiniShot ist ein effektives Hilfsmittel für Vorversuche im Labor.
- Nachhaltigkeitsbetrachtungen sind stark vom gewählten Ansatz abhängig. Beschleunigerdosierung und Rückprallanteil sind starke Einflussfaktoren. Die entwickelten Mischungen haben bis zu 30% reduziertes GWP.
- Hydratation & Reaktionsmechanismen neuer Spritzbetone mit Zusatz von z.B. Feinstkalzit, Metakaolin erforscht (Ifd.)
- Dauerhaftigkeit und Schädigungsmechanismen erforscht (Ifd.)
- Optimierte Mischungen wurden in Praxis im Vortrieb erfolgreich eingesetzt, wie die Ergebnisse von KAT3, ZAB zeigen.

#### **Festgestellte Besonderheiten, die noch bearbeitet werden:**

- Die Ergebnisse von Zams II und ZaB zeigen: Mischungen mit Zement ohne SR0 liefern bei allen Sulfat-/Thaumasitests sehr gute Ergebnisse. Die Ergebnisse sind besser als die Ergebnisse von Mischungen mit nur SR0 Zement.
- Hüttensand hat nicht nur sehr günstige Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit, sondern wird auch in der frühen Reaktionsphase durch EB aktiviert und angeregt. Dadurch liefert er auch einen Beitrag zur Frühfestigkeitsentwicklung.
- Abweichungen zum Trend bei Festigkeit und RV der Proben, die bei den Versuchen KAT3 hergestellt wurden, sind in Untersuchung.

### **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?

Im FJ 4 wird Herr Johannes Flotzinger M.Eng. die Aufgaben von Frau Dr.-Ing. Maria Thumann an der OTH Regensburg übernehmen. Frau Thumann scheidet wegen Elternzeit aus.

Zusätzliche technische Ansprechpartnerin bei Omya: Frau Helena Mumber.

### **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) 52,5 N eingesetzt, wie man es später produzieren könnte. Bei den Spritzversuchen am ZaB und KAT 3 wurden ebenfalls Bindemittelkombinationen getestet, die später als CEM II/B-M oder als neue Type AHWZ, zusammen mit CEM I eingesetzt werden könnten. Es stehen also für die wirtschaftliche Umsetzung alternativ die Produktion eines speziellen Zementes, eines verbesserten AHWZ oder der Einsatz der Einzelkomponenten zur Verfügung. Die Randbedingungen der Normen und wirtschaftliche Aspekte sind dabei zu berücksichtigen.

Für die Auswahl von Fließmitteln und Verzögerern wurden wertvolle Hinweise erarbeitet. Die Beeinflussung der Dauerhaftigkeit für einige Fragestellungen konnte bereits geklärt werden.

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

Im Zuge der Forschungsarbeiten bezüglich der Bindemittelhydratation haben sich weitere Forschungsthemen aufgetan, die in Folgeanträgen bearbeitet werden sollen. Details werden im Abschlussbericht ausgeführt.

### **Studentische Abschlussarbeiten:**

#### Abgeschlossen:

Thumann, M.: Anpassung der Verarbeitungseigenschaften von Frischbetonmischungen für die Entwicklung von Spritzbetonen mit reduziertem Versinterungspotential. Dissertation, RUB, Bochum, 8/2019.

Hödl, M.: Investigations of hydration mechanisms and early compressive strength development of dry-mix shotcrete. Masterarbeit TU-Graz, 2019.

Landler, A.: Aluminosilikat-Synthese (C-A-S-H, Smektit) zur Entfernung von Schwermetallen (Co, Cr, Zn) aus wässrigen Lösungen. Masterarbeit TU-Graz, 2019.

Viellehner, M.: Pumpbarkeit des Nass-Mischguts für Spritzbeton. Bachelorarbeit OTH Regensburg, 2018.

#### In Bearbeitung:

Fiala, Th.: Hydration of cement phases in accelerated systems. Masterarbeit TU-Graz.

Baumann, Ch.: Growth of brucite on portlandite crystals. Masterarbeit TU-Graz.

Hindija, I.: Hydration of ternesite. Masterarbeit TU-Graz.

Mache, A.: Calcium sulfoaluminate cement in shotcrete mixes. Masterarbeit TU-Graz.

Findl, M.: Untersuchungen zu Thaumasil-Ettringit- Mischkristallbildung. Bachelorarbeit TU-Graz.

### **Publikationen:**

#### Abgeschlossen:

Steindl, F. R., Baldermann, A., Galan, I., Sakoparnig, M., Briendl, L., Dietzel, M., Mittermayr, F. (2019). Chemical resistance of eco-concrete – Experimental approach on Ca-leaching and sulphate attack. *Construction and Building Materials*, 223, 55-68. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.06.189>.

Galan, I. Baldermann, A., Kusterle, W., Dietzel, M., Mittermayr, F. (2019). Durability of shotcrete for underground support– Review and update. *Construction and Building Materials* Vol. 202, 465-493. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.12.151>.

Baldermann, A., Landler, A., Mittermayr, F., Letofsky-Papst, I., Steindl, F., Galan, I., Dietzel, M. (2019). Removal of heavy metals (Co, Cr, and Zn) during calcium–aluminium–silicate–hydrate and trioctahedral smectite formation. *Journal of Materials Science*, 54(13), 9331-9351. <https://doi.org/10.1007/s10853-019-03541-5>.

Steindl, F. R., Baldermann, A., Galan, I., Sakoparnig, M., Dietzel, M., Mittermayr, F. (2018). A new test for combined Ca-leaching and sulphate resistance of cementitious materials. Paper presented at ICCRRR 2018, Cape Town, South Africa. <https://doi.org/10.1051/mateconf/201819902005>.

Baldermann, A., Rezvani, M., Proske, T., Grengg, C., Steindl, F. R., Sakoparnig, M., Baldermann, C., Galan, I., Emmerich, F., Mittermayr, F. (2018). Effect of very high limestone content and quality on the sulfate resistance of blended cements. *Construction & building materials*, 188, 1065-1076. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.169>.

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, J., Briendl, L., Mittermayr, F., Röck, R., Thumann, M., Kusterle, W.: Mischungsentwicklung von nachhaltigem Spritzbeton mit kombinierten Zusatzstoffen. In: 4. Grazer Betonkolloquium, 20. + 21. 9. 2018, TU Graz.

Galan, I., Briendl, L., Hoedl, M., Steindl, F. R., Juhart, J., Mittermayr, F., (2019) Early hydration of dry-mix sprayed concrete, 1st International conference on innovation in Low-carbon cement and concrete technology June 2019. London, United Kingdom.

Thumann, M., Briendl, L., Juhart, J., Kusterle, W.: Rheologische Untersuchungen an Frischbetonmischungen für Spritzbeton. In: Greim, M., Kusterle, W., Teubert, O. (Hrsg.): *Rheologische Messungen an Baustoffen 2019. Tagungsband 28. Kolloquium und Workshop über Rheologie mineralischer Baustoffe. Regensburg, 13. und 14. 3. 2019, tredition-Verlag ISBN: 978-3-7482-4651-0, S. 84-100.*

Briendl, L., Juhart, J., Krüger, M., Mittermayr, F., Galan I.: Early strength improvement of sustainable shotcrete. *Sustainable Materials, Systems and Structures Conference 2019- Rovinj, Croatia.*

Thumann, M., Juhart, J., Röck, R., Saxer, A., Galan, I., Mittermayr, F., Kusterle, W.: Entwicklung neuer, dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone. *VÖZ Kolloquium Forschung & Entwicklung für Zement und Beton 2018, Wien.*

Bericht in beton 4/2019 über VÖZ Forschungskolloquium samt ASSpC.

Kusterle, W., Galan, I., Mittermayr, F., Saxer, A.: ASSpC- Ein Forschungsprogramm für den Spritzbeton von Morgen. *Bautechnik 2019, öbv, Wien, 2019.*

Thumann, M., Christlmeier, P.; Hartmeier, M., Kusterle, W.: Reduzierung von versinterungsbedingten Reinigungsarbeiten in Tunneldränagen durch Optimierung der Spritzbetonrezeptur. *Beton 11/2018, 416-421.*

#### In Begutachtung/Druck:

Galan, I., Briendl, L. Thumann, M., Steindl, F., Röck, R., Kusterle, W., Mittermayr, F., Filler effect in shotcrete.

Saade, M., Passer, A., Mittermayr, F.: (Sprayed) Concrete production in Life Cycle Assessments: a systematic literature review. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2019, angenommen.

Thumann, M.; Flotzinger, J.; Steindl, F.; Mittermayr, F.; Lindlar, B.; Kusterle, W.: Investigations regarding the pumping process of wet-mix shotcrete. In: *Shotcrete for underground support XIV, Thailand, 11/2019.*

Baldermann, A., Mittermayr, F., Thumann, M., Kusterle, W.: Development of shotcrete with increased durability against thaumasite sulfate attack: Experiences from a tunnel site and laboratory tests. *15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.*

Sakoparnig, M., Baldermann, A., Dietzel, M., Thumann, M., Saxer, A., Galan, I., Kusterle, W., Mittermayr, F.: Experimental Ca leaching of shotcrete & secondary precipitation. 15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.

Juhart, J., Briendl, L., Röck, R., Galan, I., Thumann, M., Mittermayr, F., Kusterle, W. Performance optimization of shotcrete by combined fillers. 15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.

Mittermayr, F., Galan, I., Saade, M., Saxer, A., Kusterle, W.: "ASSpC" Shotcrete research for the needs of tomorrow. 15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.

Saade, M., Mittermayr, F., Passer, A. A review of sprayed concrete's life cycle environmental performance: generating evidence to fill the gap. 15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.

Briendl, L., Galan, I., Steindl, F. R., Röck, R., Thumann, M., Juhart, J., Baldermann, A., Mittermayr, F., Kusterle, W. (2019). Hydration processes of accelerated cementitious systems governing early strength development. 15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.

Steindl, F. R., Mittermayr, F., Thumann, M., Juhart, J., Galan, I., Baldermann, A., Briendl, L., Sakoparnig, M., Röck, R. Kusterle, W. (2019). Sulfate resistance of dry mix shotcretes with new binder composition. 15<sup>th</sup> International Congress on Chemistry of Cement, ICC2019, Prague, Sept. 16-20, 2019.

## 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 Forschungsprojektes in Vorversuche, Großversuche und Dauerhaftigkeitsversuche fallen in allen Forschungsjahren große Inkindleistungen der industriellen Partner an. Aus dem dritten Forschungsjahr ist bereits ein Überschuss von 93.774 € an Inkindleistungen vorhanden. Wir bitten den Überschuss auf das 4. FJ anrechnen zu können. Zusätzlich rechnen wir auf Grund noch zweier Großspritzversuche zu Beginn des 4. FJs mit weiteren Inkindleistungen von 52.000 €.

Wir bitten daher für das letzte FJ Inkindleistungen von 146.000 € zu genehmigen und in der Förderung zu berücksichtigen. Die Summe aller Inkindleistungen über alle 4 Jahre werden 11,7% der Gesamtprojektkosten betragen.

Durch die Größe des Forschungsprojektes wurden auch die Aufwendungen der öbv-Veranstaltungs GmbH deutlich größer und wir bitten die Kosten im 4. FJ auf 32.000 € erhöhen zu können.

## 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 ZaB
- Bericht KAT3
- Bericht Dauerhaftigkeit inklusive Porosität
- Dissertation Thumann (Bericht Verarbeitung)
- Bericht Hydratation
- Bericht Nachhaltigkeit
  
- 4 ausgewählte Publikationen