

# ENDBERICHT 4. FORSCHUNGSJAHR

|                             |  |                           |                    |
|-----------------------------|--|---------------------------|--------------------|
| <b>FFG Projektnummer</b>    | 871055   | <b>FörderungsnehmerIn</b> | öbv                |
| <b>Bericht Nr.</b>          | 4  | <b>Berichtszeitraum</b>   | 1.7.2019-31.1.2021 |
| <b>Bericht erstellt von</b> | Prof. Wolfgang Kusterle, OTH Regensburg und<br>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.

Das interdisziplinäre Team des Forschungsprojekts ASSpC – advanced sustainable sprayed concrete – hat in Zusammenarbeit mit einer Reihe von Industriepartnern erfolgreich neue dauerhafte und nachhaltige Spritzbetone entwickelt. Es wurden grundlegende Erkenntnisse über optimale Stoffkombinationen, Verarbeitungseigenschaften, Hydratationsmechanismen sowie die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Spritzbeton erlangt.

In insgesamt 10 großtechnischen Spritzbetonversuchen konnte eine Vielzahl von Optimierungen durch die Anwendung des neu erarbeiteten Grundlagenwissens praktisch umgesetzt und bewiesen werden.

Im 4. Forschungsjahr kann kurz zusammengefasst Folgendes hervorgehoben werden:

### Großspritzversuche (GSV)

Im Versuchszeitraum fanden ein Trockenspritzversuch und 3 Großversuche im Nassspritzverfahren statt. Diese Versuche sind unter AP 5 und 6 beschrieben. Außerdem liegt für jeden GSV ein eigener ausführlicher Bericht vor.

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 wurden Untersuchungen zur Hydratation und zur Dauerhaftigkeit durchgeführt. Eine zielgerichtete Verbesserung der Dauerhaftigkeit ist jetzt somit möglich.

### Laboruntersuchungen

An den in GSV erzeugten Proben werden umfangreiche Dauerhaftigkeitsuntersuchungen durchgeführt. Die Untersuchungen der 4 Forschungsjahre befinden sich in unterschiedlichen Stadien und sind zum Großteil abgeschlossen. Lediglich wenige Dauerhaftigkeitsuntersuchungen des letzten Forschungsjahres werden noch weiterlaufen. Die bisher durchgeführten Prüfungen an neu entwickelten Spritzbetonen mit zielgerichteten Zusatzstoffkombinationen sind hinsichtlich Dauerhaftigkeit sehr vielversprechend.

Untersuchungen zu Hydratation beschleunigter Bindemittelsysteme wurden im 4. FJ. intensiviert. Hochauflösende Untersuchungsmethoden für mikrostrukturelle Untersuchungen wurden angewandt und mit geochemischen und mineralogischen Untersuchungen gekoppelt. Durch den kombinierten Einsatz von Methoden konnte das Verständnis für bedeutende Reaktionsmechanismen im Spritzbeton erweitert werden. Besonders interessant sind die Ergebnisse zur

Phasenanalyse von jungen Mischungen mit und ohne Feinstkalzit, zur Wirkung von Metakaolin, zu Vergleichen zwischen Trocken- und Nassspritzverfahren und zu den Spritzbetonen mit verschiedensten Verzögerertypen.

Im 4.FJ. wurde außerdem eine Bewertung sämtlicher Mischungen der GSV auf Basis von 14 technologischen, dauerhaftigkeits-, kosten- und umweltrelevanten Indikatoren durchgeführt. Die Einbeziehung „funktioneller Einheiten“ in die Berechnungen wurde fortgesetzt und angewandt, um eine Vergleichbarkeit der GSV Mischungen zu ermöglichen. Die Auswertungen zeigen eindrücklich, dass die im ASSpC Projekt neu entwickelten Mischungen deutliche Vorteile gegenüber herkömmlichen Baustellenmischungen aufweisen.

### **Herausforderungen**

Bei folgenden Punkten traten Herausforderungen auf:

Mit Siderit und Ankerit wurden zwei möglicherweise für (Spritz-)Betone sehr gut geeignete neue Zusatz-/Zusatzstoffe entdeckt. Erste grundlegende Untersuchungen deuten auf ein großes Potenzial für den Einsatz in Beton hin. Es ist jedoch auf Grund von zeitlichen Limitationen nicht gelungen ein tiefgreifendes Verständnis der Reaktionsmechanismen von Fe-Karbonaten bei der Hydratation zu erlangen und eine Tauglichkeit für die Praxisanwendung endgültig zu beweisen.

Es hatte sich im Zuge mehrerer Großspritzversuche herausgestellt, dass Lagenbildungen beim Spritzen für unerwünschte Materialeigenschaften sorgen. Trotz großer Fortschritte bei der Optimierung von der Materialseite wurden bei GSV Probenkörper erzeugt, die ausgeprägte Lagenbildung aufwiesen. Dem Forschungsteam ist es gelungen diese Inhomogenitäten sichtbar zu machen und besser zu verstehen. In zukünftigen Projekten sollte aber intensiv an der Vermeidung solcher Schwachstellen für den Spritzbeton durch Verbesserungen bei der Maschinen- und Auftragungstechnik gearbeitet werden.

Durch die Anwendung von optimierten Rezepturen (z.B. auch Zugabe von Fe-Karbonaten) und optimierter Maschinenteknik könnte Spritzbeton als zukunftsweisendes nachhaltiges Produkt für neue Konstruktionsweisen eingesetzt werden. Durch die zukünftig angestrebte Entwicklung eines „life-cycle decision making tools“ soll es für Bauherren & Planer möglich werden Spritzbeton basierend auf nachhaltiger Entscheidungsgrundlage einzusetzen.

### **Organisatorisches und Verwertung**

Die vorgesehenen Meetings mit den industriellen Partnern wurden durchgeführt, waren sehr gut besucht und die vorgestellten Ergebnisse wurden eingehend diskutiert. 3 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 stärkten 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.

Veröffentlichungen, Pressemitteilungen und studentische Abschlussarbeiten sind im Bericht Dissemination und Publikationen aufgelistet.

Aufbauend auf Erkenntnissen von ASSpC hat die Zementindustrie bereits ähnliche Produkte entwickelt und im Zuge von ersten Versuchen erfolgreich getestet.

**Fazit**

Mit dem motivierten Team junger Forscherinnen in Zusammenarbeit mit Experten aus der Praxis konnte daher im 4. Forschungsjahr weitere Schritte zur Erreichung der ambitionierten Ziele und damit in Richtung dauerhafter und nachhaltiger Spritzbetone gemacht werden.

**2. Arbeitspakete und Meilensteine**

**2.1 Übersichtstabellen**

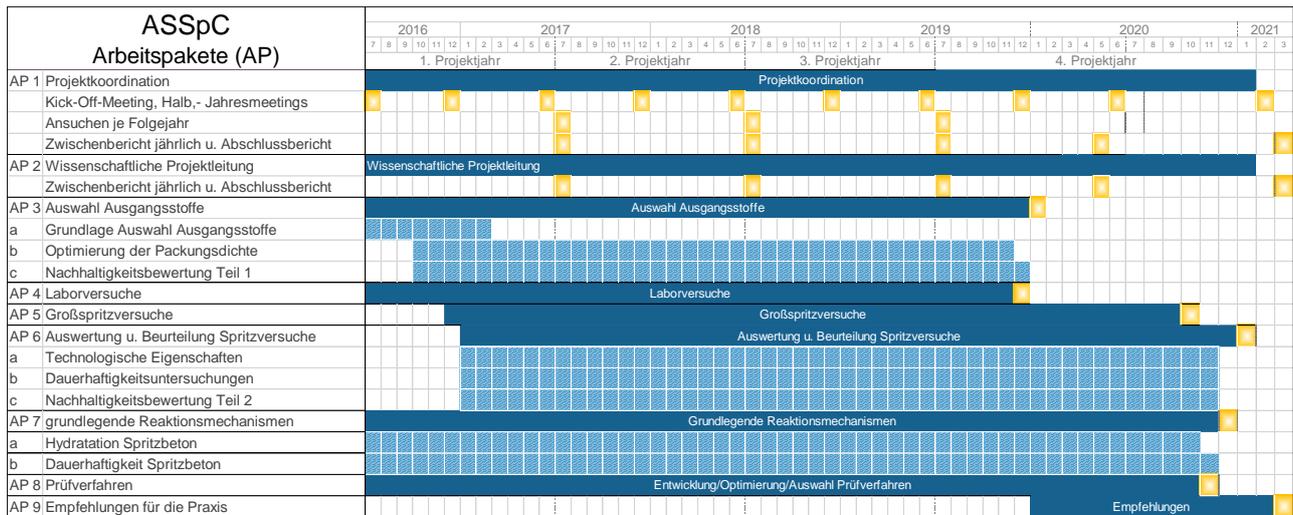
**Erläuterung:**

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 4. FJ. und die vorangegangenen Jahre angegeben. Die zeitliche Abfolge konnte bis auf die entstandenen Verzögerungen (siehe 7. Meldungspflichtige Ereignisse.) immer gut eingehalten werden. Durch die Covid19 Situation der Forschungspartner wurde eine Verlängerung des 4. FJ notwendig Die Tabellen 1 und 2 stellen dann den aktuellen Stand detailliert dar.



**Abbildung 1: Balkenplan für das gesamte Forschungsprojekt**

Die Arbeitspakete sind in Tabelle 1 mit dem Fertigstellungsgrad nach dem 4. FJ. und den erreichten Ergebnissen gelistet und in Tabelle 2 sind Meilensteine detailliert angeführt.

**Tabelle 1: Arbeitspakete 4. FJ (Abkürzung: GSV= Großspritzversuch)**

| AP Nr. | Arbeitspaket Bezeichnung   | Fertigstellungsgrad | Basistermin |       | Aktuell |       | Erreichte Ergebnisse / Abweichungen  |
|--------|--|---------------------|-------------|-------|---------|-------|--|
|        |  |                     | Anfang      | Ende  | Anfang  | Ende  |  |
| 1      | <b>Projekt-koordination</b>  | 100%                | 7/16        | 1/21  | 7/16    | 1/21  | Planmäßig alles erreicht. Durchführung von Meetings/Austausch mit Partner in den Zeiträumen von März bis Juni eingeschränkt. Anfangs wurden Meetings verschoben, später fand reger Austausch Online statt.   |
| 2      | <b>Wissen-schaftliche Projektleitung</b>   | 100%                | 7/16        | 1/21  | 7/16    | 1/21  | Planmäßig alles erreicht / Aufwand höher als geplant. Regelmäßige Newsletter (bisher 10), 8 Klausurtagungen<br>Siehe AP1; Der Austausch unter den Forschenden war in der Zeit von März bis Juni ebenfalls stark eingeschränkt und geplante Treffen mit Industriepartner wurden verschoben. Später reger Austausch durch Online Möglichkeiten.  |
| 3      | <b>Auswahl Ausgangs-stoffe und Leiment-wicklung</b>  | 100%                | 7/16        | 10/19 | 7/16    | 12/19 | AP3a abgeschlossen. Im Letzen FJ wurden noch einige wenige Stoffe in die Datenbanken mit aufgenommen.  |
| 4      | <b>Betonrezeptur-entwicklung, Laborvor-versuche und Spritzbeton-versuche im Labormaßstab</b> | 100%                | 7/16        | 10/19 | 7/16    | 11/19 | Planmäßig alles erreicht. Die praktischen Versuche und Mischungsentwicklungen im AP4 wurden im 4. FJ. erfolgreich abgeschlossen.   |
| 5      | <b>Groß-spritzversuche</b>   | 100%                | 12/16       | 10/19 | 12/16   | 09/20 | Die geplanten GSV wurden erfolgreich umgesetzt. Es fand ein Trockenspritzversuch (Wopfung) und drei Nassspritzversuche (Zams III, VSH Hagerbach, CH und Zentrum am Berg II) statt. Zusätzlich zur ursprünglichen Planung, wurden vor allem auf Anregungen unserer Industriepartner, die zusätzlichen GSV im VSH 03/20 und ZaB II 09/21 durchgeführt.   |
| 6      | <b>Auswertung und Beurteilung der Spritzbeton-versuche</b>                                   | 100%                | 1/17        | 3/20  | 1/17    | 1/21  | Bei allen 3 Subarbeitspakten im AP6 kam es auf Grund der COVID-19 Situation zu erheblichen Verzögerungen, da die Untersuchungen für AP6a und AP6b im Labor (meist von mehreren Personen gemeinsam) durchgeführt werden müssen. Die erzeugten Erkenntnisse fließen in AP6c ein. Daher kam es hier auch zu Verzögerungen. Durch die Verlängerung des 4.FJ war es möglich die meisten Dauerhaftigkeitsuntersuchungen, der durchgeführten Großspritz-Versuche vollumfänglich durchzuführen und die Ergebnisse für die Berechnungen im AP6c zur Verfügung zu stellen. Untersuchungen für Thumasit-Sulfat-Angriff an Proben der GSV aus dem 4. FJ laufen noch bis Sommer und Herbst 21 weiter. |

|   |   |      |      |      |      |       |   |
|---|---|------|------|------|------|-------|---|
|   |   |      |      |      |      |       | Zwischenauswertungen wurden durchgeführt und für AP 6c Extrapolationen gemacht. Diese sind bei der Auswertung als solche gekennzeichnet.<br>Neue Erkenntnisse in Bezug auf Luftporen im gespritzten Zustand konnten zwar gewonnen werden, jedoch lieferte die Verwendung von Computer Tomographie bisher keine verwertbaren Ergebnisse.   |
| 7 | <b>Grundlegende Reaktionsmechanismen</b>  | 100% | 7/16 | 5/20 | 7/16 | 1/21  | Viele Grundlegende Erkenntnisse konnten in AP7a und AP7b gewonnen werden. Jedoch haben sich vor allem bei der Auswertung der GSV immer wieder neue Fragen aufgetan bzw. konnten diese noch nicht zufriedenstellend geklärt werden. Z.B. hat sich das Forschungsteam in Zuge der beiden letzten GSV intensiv mit den grundlegenden Reaktionen von Spritzbetonverzögerern beschäftigt. Fortschritte beim Verständnis wurden erzielt aber die für die Praxis enorm wichtigen Empfehlungen können auf Grund der Datenlage noch nicht abgegeben werden. Außerdem konnten die Reaktionsmechanismen für die neu entdeckten Zusatzstoffe Siderit und Ankerit noch nicht vollständig geklärt werden  |
| 8 | <b>Neuentwicklung, Optimierung und Auswahl von Prüfverfahren und Analysemethoden</b>        | 100% | 7/16 | 3/20 | 7/16 | 11/20 | Die Entwicklungen im AP8 wurden weitgehend erfolgreich abgeschlossen. Die Analytik zur Dechiffrierung der Reaktionsabläufe und von Dauerhaftigkeitsfragestellungen bzw. Hydratationsabläufen wurde vom Forschungsteam im AP6 und AP7 eingesetzt.  |
| 9 | <b>Empfehlungen für die Praxis und ggf. Anpassungsvorschläge für Normen und Richtlinien</b> | 100% | 1/20 | 6/20 | 1/20 | 4/21  | Es sind im 4.FJ zahlreiche Publikationen sowohl in Fachzeitschriften als auch in populärwissenschaftlichen Medien erschienen. Mehrere Publikationen sind noch in Vorbereitung und Ausarbeitung. Für „Empfehlungen für die Praxis“ wurden mehrere Arbeitskreise zu spezifischen Themen gebildet. In diesen Arbeitskreisen arbeiteten die Wirtschaftspartner gemeinsam mit dem wissenschaftlichen Team koordiniert von der österreichischen Bautechnik Vereinigung an Empfehlungen für die Praxis und an Vorschlägen für eine spätere Anpassung der Richtlinie Spritzbeton. Alle Arbeitskreise konnten noch nicht ihre Empfehlungen fertigstellen, da auch Gebiete außerhalb des Forschungsauftrags bearbeitet wurden, teilweise wird daran weitergearbeitet. |

**Tabelle 2: Meilensteine (Blauer Text bereits im 1. bis 3. 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   | Das Projekt wurde COVID19 bedingt 7 Monate kostenneutral verlängert. Am 18.6.20 wurde statt der Projektendsitzung eine Online Zwischensitzung für alle beteiligten Partner einberufen und die neuen Erkenntnisse vorgestellt. Die Abschlussitzung wurde nach Projektverlängerung am 4.2.21 Online abgehalten. |
|  |  | 14.12.16     |                  |  |   |
|  |  | 1.6.17       |                  |  |   |
|  |  | 29.11.17     |                  |  |   |
|  |  | 7.6.18       |                  | 7.6.18   |   |
|  |  | 29.11.18     |                  |  |   |
|  |  | 19.6.19      |                  | 19.6.19  |   |
|  |  | 28.11.19     |                  | 28.11.19   |   |
| 18.6.20  |  | 18.6.20      |                  |  |   |
| 4.2.21   |  | 4.2.21       |                  |  |   |
| • Jährliche Zwischenberichte   | 30.6.17  | 15.8.17      | 15.8.17          | Siehe oben   |   |
|  | 30.6.18  | 22.8.18      | 22.8.18          |  |   |
|  | 30.6.19  | 23.8.19      | 23.8.19          |  |   |
| • Präsentation der Zwischenergebnisse mit Diskussion Industriebeteiligung                          | 1.6.17   |              | 1.6.17           |  |   |
|  | 7.6.18   |              | 7.6.18           |  |   |
|  | 19.6.19  |              | 19.6.19          |  |   |
|  | 18.6.20  |              | 18.6.20          |  |   |
| • Notwendige Maßnahmen zur wissenschaftlichen Projektweiterführung                                 | 30.6.17  |              | 30.6.17          |  |   |
|  | 30.6.18  |              | 30.6.18          |  |   |
|  | 30.6.19  |              | 30.6.19          |  |   |
| • 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          |  |   |
| • Erstellung Kommunikationsplattform   | 12.10.16   |              | 12.10.16         |  |   |
| • Abschlussbericht   | 4.2.21   | 17.6.20      | 4.2.21           | Siehe Kommentar oben   |   |
| 2  | • Berichte mit Auswertungen je Forschungsjahr  | 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  |   |
|  | 12.4.21  |              |                  |  |   |
| • Projektende: Wissenschaftlich-Technischer Abschlussbericht inklusive Empfehlungen für die Praxis | 30.9.20  | 30.9.20      | 12.4.21          | Das Projekt wurde COVID19 bedingt 7 Monate kostenneutral verlängert.   |   |
| • Veröffentlichung der Ergebnisse, Dissemination in der Branche                                    | 30.9.20  | 30.9.20      | 12.4.21          |  |   |
| • Dissertationen und Publikationen   | 30.9.20  | 30.9.20      | 12.4.21          | Bis jetzt 41 Publikationen veröffentlicht, 5 angenommen, 5 noch in Vorbereitung, Dissertation Thumann 8/2019 abgeschlossen.<br>Dissertation Steindl in Begutachtung<br>Geplanter Abschluss der Dissertationen Sakoparnig und Briendl Ende 2021 / Anfang 2022 |   |
| 3  | • Auswahl und Beschaffung geeigneter Bindemittel, Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Gesteinskörnungen | 2/17         |                  | 1/17   |   |

|   |  |       |       |       |   |
|---|--|-------|-------|-------|---|
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Optimierte Rezepturen für Labor- und Großspritzversuche</li> </ul>  | 10/17 | 11/19 | 11/19 | Zusätzliche Optimierungen wurden für den GSV VSH Hagerbach 03/20 durchgeführt                               |
|   | <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 | 12/19 | Abgeschlossen   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 3 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>   |       | 12/19 | 01/20 | Berichte liegen vor bzw. Ergebnisse sind in die Berichte der GSV eingearbeitet                              |
| 4 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Entwicklung praxistauglicher Rezepturen, Ausloten Grenzen der Verarbeitbarkeit</li> </ul>   | 6/19  | 11/19 | 11/19 | abgeschlossen   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Neue Erkenntnisse zu Kennwerten für praxistaugliche Spritzbetonrezepturen</li> </ul>  | 6/19  | 11/19 | 11/19 | abgeschlossen   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erkenntnisse zur Frühfestigkeitsentwicklung und ausreichend Proben für Dauerhaftigkeitsuntersuchungen</li> </ul>  | 6/19  | 11/19 | 11/19 | abgeschlossen   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vorauswahl der Ausgangsstoffe für Großspritzversuche</li> </ul>   | 10/19 | 10/19 | 11/19 | Für GSV durchgeführt  |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 4 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>   | 6/19  | 11/19 | 11/19 | Berichte liegen vor bzw. Ergebnisse sind in die Berichte der GSV eingearbeitet                              |
| 5 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erfolgreiche Durchführung der Spritzversuche mit neu entwickelten Rezepturen (Verarbeitbarkeit, Frühfestigkeit, zusätzliche Maschinendatenerfassung und Hochgeschwindigkeitsfilme)</li> </ul> | 11/19 | 11/19 | 09/20 | 10 GSV abgeschlossen, Terminverschiebung durch zusätzliche Versuche   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Herstellung und Bereitstellung von geeigneten Probekörpern für Dauerhaftigkeitstests</li> </ul>   | 11/19 | 11/19 | 09/20 | je GSV durchgeführt   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 5 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>   | 3/20  | 3/20  | 09/20 | Ergebnisse liegen vor und werden in Berichten für AP6 beschrieben.  |
| 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  | 11/20 | Abgeschlossen; Extra Bericht Dauerhaftigkeit verfügbar.   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenhänge zwischen Betonrheologie und Pump- und Spritzkennwerten</li> </ul>   | 3/20  | 3/20  | 11/20 | Abgeschlossen; extra Bericht Verarbeitbarkeit verfügbar.  |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Nachhaltigkeitsbewertung unter Berücksichtigung der technologischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit</li> </ul>  | 6/20  | 6/20  | 11/20 | Abgeschlossen; extra Bericht LCA verfügbar.   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Verifizierung der Dauerhaftigkeit der entwickelten Spritzbetone und Gegenüberstellung mit Referenzen</li> </ul>   | 6/20  | 6/20  | 11/20 | Bis auf wenige Thaumasil-Sulfat-Angriff Tests alles abgeschlossen; Extra Bericht Dauerhaftigkeit verfügbar. |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 6 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>   | 6/20  | 6/20  | 01/21 | Extra Bericht Dauerhaftigkeit und für Nachhaltigkeit verfügbar  |

|   |  |      |      |       |  |
|---|--|------|------|-------|--|
| 7 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Entschlüsselung der Hydratationsabläufe</li> </ul>  | 6/20 | 6/20 | 10/20 | Gute Ergebnisse erzielt; extra Bericht Hydratation verfügbar   |
|   | <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 | 11/20 | Vieles konnte aufgeklärt werden; einiges bleibt aber auf Grund der hohen Komplexität offen; Details können im Extra Bericht Dauerhaftigkeit nachgelesen werden..   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Erkennen bisher nicht berücksichtigter Einflussfaktoren</li> </ul>  | 6/20 | 6/20 | 11/20 | Viele bis jetzt gänzlich unbekannte Einflussfaktoren wurden aufgedeckt (Kalksteinmehl, Metakaolin,...), einige auch z.T. sehr entscheidende Faktoren wie z.B. die Wirkung der Verzögerer auf die Festigkeits-, Hydratphasenbildung bzw. Dauerhaftigkeit konnten nicht zweifelfrei geklärt werden. Die genauen Wirkungsweisen von Siderit und Ankerit konnten ebenfalls noch nicht ganz zufriedenstellend erklärt werden. |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 7 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>   | 6/20 | 6/20 | 1/21  | Mehrere extra Berichte 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 | 6/20  | Gute Ergebnisse erzielt durch Anwendung von Multimethoden Ansatz   |
|   | <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 | 6/20  | Prüfverfahren neu- bzw. weiterentwickelt; Mit Expertinnen von Industriepartnern diskutiert und Großteils für Empfehlungen für die Praxis vorgesehen.   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Prüfverfahren zur aussagekräftigen Überprüfung der Frühfestigkeit und Dauerhaftigkeit stehen zur Verfügung</li> </ul>   | 3/20 | 3/20 | 6/20  | Prüfverfahren neu- bzw. weiterentwickelt; Mit Expertinnen von Industriepartnern diskutiert und Großteils für Empfehlungen für die Praxis vorgesehen.   |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Berichtserstellung für AP 8 für Zwischenberichte u. Endbericht</li> </ul>   | 6/20 | 6/20 | 11/20 | Methoden angewandt und in sämtlichen Berichten dokumentiert.   |
| 9 | <ul style="list-style-type: none"> <li>Zusammenfassende Aufbereitung der Erkenntnisse für die Baupraxis</li> </ul>   | 6/20 | 9/20 | 03/21 | In zahlreichen Online Meetings wurde mit Expertinnen der Industriepartner diskutiert und vom Forschungsteam vorgestellte Unterlagen diskutiert und überarbeitet. Bericht Empfehlungen für die Praxis liegt vor.  |
|   | <ul style="list-style-type: none"> <li>Vorträge und Publikationen</li> </ul>   | 6/20 | 6/20 | 03/21 | Eine Vielzahl an Vorträgen wurde gehalten und > 41 Publikation veröffentlicht. Extra Bericht Dissemination liegt vor.  |
|   | <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 | 03/21 | Bericht Empfehlungen für die Praxis wird für die Überarbeitung der öbv Richtlinie Spritzbeton herangezogen werden.   |

## 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. Wegen Corona waren viele Kontakte als Online-Termine notwendig:

Forschungsteam-Klausur Regensburg 25.-27.9.2019 Präsenz

Treffen mit Dr. Huber 3.10.2019 Präsenz

Empfehlungen für die Praxis 27.11.2019 und 12.2.2020 Präsenz

Zwischensitzung 28.11.2019 Präsenz

Zwischensitzung 18. 6.2020 online

Pumpendrucke, SIKA 13.8.2019 + 17.12.2019 online

TUG Messtechnik 16.10.2020 online

VA Erzberg 1.10.2020 Präsenz

Aliva Pumpendrucke 14.9.2020 online

Forschungsteam-Klausur Mistelbach 13.-15.10.2020 Präsenz

Aeditive 3D Druck 10.12.2020 online

Arbeitsgruppen „Empfehlungen für die Praxis“ 3 Gruppen mit jeweils Untergruppen

Ausgangsstoffe 5.5.2020; 24.7.2020 intern, 30.11.2020; 29.1.2021

Kapitel 5-7 Mischgut, Anforderungen und Klassifizierung 7.5.2020; 23.6.2020; 23.9.2020; 14.12.2020; 22.1.2021;

z.B. Untergruppe Lagenbildung 29.6.2020 + 2.10.2020

Umwelt und Nachhaltigkeit 25. Januar 2021, Untergruppen davor

Jahresabschlussitzung mit Endberichtvorstellung 4. 2. 2021

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

Über spezifische Versuchsdurchführungen wurden Berichte verfasst bzw. Bachelor- und Masterarbeiten sowie eine Doktorarbeit erstellt, 3 weitere sind in Ausarbeitung.

### **AP 3 Ausgangsstoffe und Leimentwicklung**

AP3b und 3c für Ausgangsstoffe abgeschlossen, ergänzend Vorbereitung für die weiteren GSV abgeschlossen.

### **AP 4: Betonrezepturenentwicklung, Laborvorversuche und Spritzbetonversuche im Labormaßstab**

Die Arbeiten waren weitgehend für die Vorbereitung der GSV abgeschlossen. Ergänzend wurden bisher unbekannte Zusammenhänge zwischen Beschleunigermenge und Porosität untersucht. Zusätzlich wurde die Porosität von Trocken- und Nassspritzbetonen und von händisch gemischten oder gespritzten beschleunigten Zementleimen bestimmt, um den Einfluss der Herstellungsmethode und der Mischungsrezeptur auf das Porenvolumen und die Porengrößenverteilung aufzuklären (Übersicht untersuchte Laborrezepturen siehe Tabelle 3). Neu entwickelte

Verteilungsfunktionen basierend auf Multiterm-Boltzmannfunktionen wurden an die Porengrößenverteilungen angepasst, um eine genauere und tiefgreifendere Charakterisierung und Analyse der Mikrostruktur zu ermöglichen. Eine zusammenfassende Auswertung ist in AP7 beschrieben. Detaillierte Beschreibungen und Auswertungen sind in der Dissertation Florian Steindl in Kapitel 5 zu finden.

**Tabelle 3: Mischungsrezepturen der Zementleime. P-CEMI-0 und P-SR0-0 wurden händisch gemischt. Die Serien MS-SR0 und MS-CEMI wurden mit Minishot gespritzt.**

| Mischung         | CEM I | CEM I SR0 | W/B  | EB                                 | Kommentar    |
|------------------|-------|-----------|------|------------------------------------|--------------|
|                  |       |           | -    | M.-%<br>bezogen auf<br>Bindemittel |              |
| <b>P-SR0-0</b>   | -     | x         | 0,50 | 0% SA2                             | handgemischt |
| <b>P-CEMI-0</b>  | x     | -         |      | 0% SA2                             | handgemischt |
| <b>MS-SR0-0</b>  | -     | x         |      | 0% SA2                             | Minishot     |
| <b>MS-SR0-2</b>  | -     | x         |      | 2% SA2                             | Minishot     |
| <b>MS-SR0-4</b>  | -     | x         |      | 4% SA2                             | Minishot     |
| <b>MS-SR0-6</b>  | -     | x         |      | 6% SA2                             | Minishot     |
| <b>MS-SR0-8</b>  | -     | x         |      | 8% SA2                             | Minishot     |
| <b>MS-SR0-10</b> | -     | x         |      | 10% SA2                            | Minishot     |
| <b>MS-CEM-0</b>  | x     | -         |      | 0% SA2                             | Minishot     |
| <b>MS-CEM-4</b>  | x     | -         |      | 4% SA2                             | Minishot     |

**AP 5+6: Durchführung, Auswertung und Beurteilung der Großspritzversuche (GSV)**

Für die im Berichtszeitraum durchgeführten Großspritzversuche gibt es für jeden Versuch im Anhang einen eigenen umfassenden Bericht. Hier werden die Versuche zusammengefasst.

Trockenspritzversuche Wopfing 22.7. bis 25.7.2019

Diese Versuche wurden am Versuchstand der Baunit Zementwerke am Standort in Wopfing durchgeführt. Folgende Aufgabenstellungen wurden bearbeitet:

- Auswirkungen des W/B Werte (niedrig, mittel, hoch)
- Auswirkung des Bindemittelgehalts (niedrig (320 kg/m³), üblich (360 kg/m³))
- Wirkung von Siderit und Self healing Agents auf das Versinterungspotential (RV)
- Erreichen der Frühfestigkeitsklassen von CEM I 52,5 R durch Spritzen mit geringem Anteil an CSA Zement
- Wirkung von MgO hinsichtlich Widerstandsfähigkeit bei Sulfatangriff

Gespritzt wurde das vorgemischte Trockenmischgut mit einer Aliva 246.5 Trockenspritzmaschine mit 3,6 l Rotor und Schuller Typ 38/40S2 Düse (Abb. 2). Die Probekisten befanden sich in einem geschlossenen Raum. Flüssige Zusatzmittel und -stoffe wurden über Pumpen an der Düse zudosiert. Die Wasserzugabe wurde über Durchflussmesser und Mikrowellenverfahren geprüft. Die geprüften Mischungen sind in Tabelle 4 gelistet.

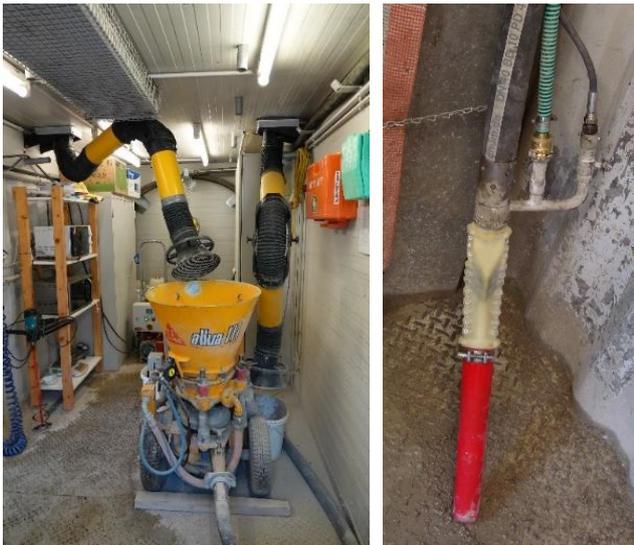


Abbildung 2: Aliva 246.5 Trockenspritzmaschine und Schuller Düse

Tabelle 4: Mischungszusammensetzung Versuche Wopfung

| 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  |

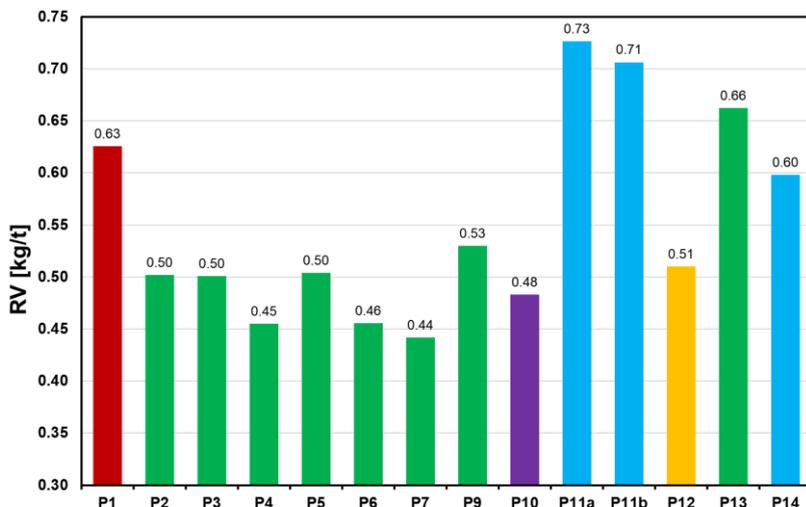
Die Ergebnisse sind in Tabelle 5 dargestellt

In Abbildung 3 sind die Ergebnisse der Prüfung auf Versinterungspotential graphisch dargestellt.

**Tabelle 5: Übersicht Ergebnisse Wopfung ohne Dauerhaftigkeitsergebnisse**

| Mischg. Nr. | Beschreibung        | Spritzbild                             | Ges. Wasser             |                          | Bindemittel W/B | Wasser- Messung      | Wasser- gehalt | Rück- prall       | Früh- festigkeit 10 min | Früh- festigkeit 6h | Festigkeit 28d |
|-------------|---------------------|--|-------------------------|--------------------------|-----------------|----------------------|----------------|-------------------|-------------------------|---------------------|----------------|
|             |                     |  | W                       | B                        |                 |                      |                |                   |                         |                     |                |
|             |                     |  | aus Durch- flussmessung | laut Einwaage- protokoll |                 | Trocknung Mikrowelle |                | interpoliert      |                         |                     |                |
|             |                     |  | l                       | kg                       |                 | M%                   | %              | N/mm <sup>2</sup> | N/mm <sup>2</sup>       | N/mm <sup>2</sup>   |                |
| P1          | REF                 | Sehr gut                               | 28,9                    | 63,4                     | 0,46            | 7,74                 | 28             | 0,8               | 9,1                     | 43,5                |                |
| P2          | MIX1 wb hoch 360    | Gut, trocken                           | 36,3                    | 66,5                     | 0,55            | 8,49                 | 18             | 0,8               | 7,6                     | 44,0                |                |
| P3          | Mix1 wb mittel 360  | trocken                                | 23,8                    | 63,4                     | 0,38            | 6,02                 | 37             | 1,0               | 11,9                    | 50,5                |                |
| P4          | Mix1 wb niedrig 360 | Spritzstrahl unregelmäßig              | 24,9                    | 60,8                     | 0,41            | 4,84                 | 20             | 1,0               | 9,5                     | 58,1                |                |
| P5          | Mix1 wb hoch 320    | Feucht, glänzend                       | 36,2                    | 57,4                     | 0,63            | 7,61                 | 14             | 0,7               | 4,7                     | 41,9                |                |
| P6          | Mix1 wb mittel 320  | Trocken, Spritzstrahl unregelmäßig     | 23,0                    | 55,2                     | 0,42            | 6,38                 | 30             | 0,9               | 6,1                     | 41,0                |                |
| P7          | Mix1 wb niedrig 320 | trocken                                | 21,8                    | 53,2                     | 0,41            | 5,76                 | 30             | 0,8               | 8,4                     | 37,5                |                |
| P8          | MIX1 Bentonit       | gut                                    | 44,5                    | 63,8                     | 0,70            | 8,13                 | 13             | 0,6               | 1,5                     | 35,3                |                |
| P9          | MIX1 Seta           | Trocken, Stopfer                       | 16,0                    | 45,5                     | 0,35            | n.b.                 | 29             | 0,5*              | 6,8*                    | 30,2                |                |
| P10         | MIX 1 CHA           | Gut, kommt rasch                       | 30,0                    | 64,8                     | 0,46            | 8,06                 | 23             | 0,9               | 9,3                     | 45,3                |                |
| P11a        | MIX 1 CSA           | OK, Düse wächst zu                     | 12,7                    | 31,6                     | 0,40            | 7,67                 | n.b.           | 7,2               | 10,9                    | 54,6                |                |
| P11b        | MIX 1 CSA           | Düse wächst schnell zu, Rückprall hoch | 12,5                    | 33,8                     | 0,37            | 8,72                 | 14             | 6,7               | 10,5                    | 51,2                |                |
| P12         | MIX 1 SIT           | Gut, etwas einseitiger Spritzstrahl    | 32,4                    | 63,4                     | 0,51            | 8,52                 | 14             | 0,8               | 4,7                     | 41,4                |                |
| P13         | MIX MGO             | Gut, wenig Rückprall                   | 38,3                    | 63,2                     | 0,61            | 8,93                 | 15             | 0,9               | 8,9                     | 34,7                |                |
| P14         | MIX CSA-2           | Gut, etwas zu schnell                  | 27,3                    | 62,4                     | 0,44            | 6,02                 | 14             | 3,4               | 6,1                     | 48,0                |                |

\*Kiste für Frühfestigkeiten wurde mit höherem W/B- Wert gespritzt (0,49 anstatt 0,35).



**Abbildung 3: Versinterungspotential, Versuche Wopfung**

Die Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Mischungen mit einem BM- Gehalt von  $\sim 320 \text{ kg/m}^3$  sind prinzipiell spritzbar, haben aber einen höheren Rückprall (RP) und bei ähnlichem W/B- Wert schlechtere Endfestigkeiten. Es ist anzunehmen, dass durch die schlechteren Verarbeitungseigenschaften, die Qualität des Spritzbetons z.B. durch Spritzschatten und eingespritztem RP vermindert wird.
- Eine Reduktion des W/B Werts unter  $\sim 0.45$  führt zu einer signifikanten Erhöhung des RP.
- Die Kombination von Calciumsulfoaluminatzementen (CSA) und herkömmlichen Portlandzementen als Alternative zu Spritz-Bindemittel (SPBM) wurde untersucht. Die Mischungen (P11a, b & P14) waren spritzbar und zeigte eine sehr rasche Frühfestigkeitsentwicklung (J3) und hohe Endfestigkeiten. Eine Feinjustierung der Erstarrungszeiten kann durch die Zugabe einer Verzögerer Komponente (z.B.:  $\sim 0.1 \text{ M\%}$  des BM an Zitronensäure) erfolgen.
- Die Zugabe von fein gemahlenem Siderit (P12) zum Bindemittel zeigte eine ähnliche Wirkung auf die Reduktion des RV- Werts wie Metakaolin (P2).
- „Self- Healing-Agents“ zeigen keine deutliche Wirkung bezüglich einer Reduktion des RV- Werts.
- Die Wirkung von Bentonit als RP- Minderer konnte nicht verifiziert werden, da der W/B Wert dieser Mischung (P8) sehr hoch war (0,7).
- Kalksteinmehlsuspensionen können mit entsprechender Ausrüstung im Trockenspritzverfahren eingesetzt werden. Die im Versuch (P9) aufgetretenen Verarbeitungsprobleme (Stopfer) sind auf einen zu niedrig eingestellten W/B- Wert zurückzuführen.

Nassspritzversuche Zams III 9.11.2019 bis 12.1.2019

Da es zum damaligen Zeitpunkt nicht erklärbare Probleme beim Einsatz von verzögerten Mischungen in der Versuchsserie KAT3 gab, lag der Versuchsschwerpunkt im Studium des Verhaltens verschiedener Verzögerer-Typen bei der Verarbeitung von Nassspritzbeton. (Tab. 6) Darüber hinaus wurden einige Mischungen mit spezieller Zusammensetzung und Kornaufbau sowie alternativen Zusatzstoffen getestet.

Die gesetzten Ziele der Verzögerer-Versuche waren:

- Ermittlung der Verzögerungsleistung im Laborversuch an 4 mm Mörtelproben zur Festlegung der Verzögerer-Dosierung
- Bestimmung des Einflusses auf die Konsistenz (Fließmaß und Ausbreitmaß) des Ausgangsbetons
- Bestimmung des Einflusses bei verschiedenen Verzögerungszeiten und Dosierungen auf die Frühfestigkeitsentwicklung
- Bestimmung des Einflusses auf die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit, Spritzbarkeit, Rückprall)
- Bestimmung des Einflusses auf die Dauerhaftigkeit (28d, 90d Druckfestigkeit, RV, WU, Sulfat/Thaumasit-Beständigkeit)
- Studium des Verhaltens des neuentwickelten Spritzbetons bei kühler Witterung. Dies war der Grund für die Terminauswahl im November.

Im Allgemeinen wurden mit der Mischungsentwicklung und den Versuchen die Ziele des Programmes ASSpC wie Verbesserung der Dauerhaftigkeit (Nutzungsdauer) und Reduzierung der Umweltwirkung (Nachhaltigkeit) weiterverfolgt.

**Tabelle 6: Für die Untersuchung eingesetzte Verzögerer-Typen (grau hinterlegt nur in Voruntersuchungen)**

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

Die meisten Versuche wurden mit CEM I zusammen mit „Premium AHWZ-Zams III“ bestehend aus:

- 58 M.% Hüttensand „HÜS 4900“ (Gmunden)
- 21 M.% Feinstkalzit (Kalksteinmehl) „CAL-EGU“ (Omya)
- 21 M.% Metakaolin O (Getemperter Ton) „METAVER-O“ (newchem)

durchgeführt. Das Grundrezept lautete:

- 280 kg/m<sup>3</sup> CEM I 52,5R SZV
- 140 kg/m<sup>3</sup> Premium AHWZ – Zams III
- 1934 kg/m<sup>3</sup> Gestein 0/4 und 4/8 TBA Zams
- 0,47 W/B
- 0,73 % Verflüssiger Glenium Sky 894
- 0,16 – 1,2 % Verzögerer je nach Sorte
- 0,13 % Luftporenbildner Micro-Air 9001

Die Mischungszusammensetzung kann man den drei Tabellen 7 entnehmen.

**Tabelle 7a: Mischungszusammensetzung [kg/m<sup>3</sup>] der ausgeführten Rezepturen Teil a**

| Dichte kg/l |                                     | 1,20                              | 1,03  |      | 1,44                                | 1,00                     |       | 2,78  | 2,78  | 3,12                              | 3,18                            | 2,89                           | 2,8                              | 2,8                             | 2,80                                     |                                       |
|-------------|-------------------------------------|-----------------------------------|---|------|-------------------------------------|--------------------------|-------|---|---|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--|---------------------------------------|
| Nr.:        | Beschreibung                        | Glenium Sky 894 kg/m <sup>3</sup> | LP-Bildner Masterair 9001 kg/m <sup>3</sup> | EB % | Sigunit L 5601 AF kg/m <sup>3</sup> | Wasser kg/m <sup>3</sup> | W/B   | TBA-Sand 0-4 mm (im Silo) kg/m <sup>3</sup> | TBA-Kies 4-8 mm (im Silo) kg/m <sup>3</sup> | CEM I (im Silo) kg/m <sup>3</sup> | SR0 (im Silo) kg/m <sup>3</sup> | Hüs 4500 Gmu kg/m <sup>3</sup> | AHWZ-Zi-Vils-1 kg/m <sup>3</sup> | AHWZ-Zi-W&P-2 kg/m <sup>3</sup> | Premium-AHWZ (im Silo) kg/m <sup>3</sup> | gewählter BM-Gehalt Kg/m <sup>3</sup> |
| M0          | Referenz ohne Verzögerer            | 2,73                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 196,91                   | 0,469 | 1375,8                                      | 458,6                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M1          | VZ1 niedrig                         | 2,31                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 194,88                   | 0,464 | 1380,7                                      | 460,2                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M2          | VZ1 hoch                            | 2,10                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 193,65                   | 0,461 | 1383,7                                      | 461,2                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M3          | VZ2 niedrig                         | 1,89                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 192,85                   | 0,459 | 1385,7                                      | 461,9                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M4          | VZ5 Langzeit                        | 2,52                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 194,42                   | 0,463 | 1381,3                                      | 460,4                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M5          | VZ2 hoch                            | 2,10                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 190,71                   | 0,454 | 1389,8                                      | 463,3                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M6          | VZ3 niedrig                         | 1,89                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 195,37                   | 0,465 | 1380,5                                      | 460,2                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M7          | VZ3 hoch                            | 2,10                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 193,65                   | 0,461 | 1383,7                                      | 461,2                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M8          | VZ6 Langzeit                        | 2,10                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 192,81                   | 0,459 | 1385,4                                      | 461,8                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M9          | VZ7mittel                           | 1,89                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 194,95                   | 0,464 | 1381,3                                      | 460,4                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M9 a        | VZ7 hoch VZ nach 10 min zugeben     | 2,52                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 192,74                   | 0,459 | 1384,8                                      | 461,6                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  |                                 | 140,0                                    | 420,00                                |
| M10         | Optimierung ZSK q=0,29 VZ           | 7,32                              | 2,00  | 7,00 | 28,00                               | 190,25                   | 0,476 | 1395,3                                      | 465,1                                       |                                   | 249,0                           | 71,0                           |                                  |                                 | 59,0                                     | 400,00                                |
| M11         | Optimierung ZSK + Sand-SL; wenig BM | 8,68                              | 2,01  | 7,00 | 26,53                               | 180,02                   | 0,475 | 1124,2                                      | 476,4                                       |                                   | 247,0                           | 52,0                           |                                  |                                 | 59,0                                     | 379,00                                |
| M12         | Siderit statt Met-O                 | 2,10                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 195,33                   | 0,465 | 1387,3                                      | 462,4                                       | 280,0                             |                                 | 81,2                           |                                  |                                 |  | 420,00                                |
| M13         | Mischung 1 VÖZ-Vils                 | 2,52                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 196,94                   | 0,469 | 1376,1                                      | 458,7                                       | 280,0                             |                                 |                                | 140,0                            |                                 |  | 420,00                                |
| M14         | Mischung 2 VÖZ-W&P                  | 2,52                              | 1,26  | 7,00 | 29,40                               | 196,94                   | 0,469 | 1376,1                                      | 458,7                                       | 280,0                             |                                 |                                |                                  | 140,0                           |  | 420,00                                |
| M15         | Y1 Reserve                          | 8,01                              | 2,00  | 7,00 | 26,46                               | 180,19                   | 0,477 | 1138,9                                      | 476,0                                       | 233,0                             |                                 | 72,5                           |                                  |                                 | 55,0                                     | 378,00                                |

**Tabelle 7b: Mischungszusammensetzung [kg/m³] der ausgeführten Rezepturen Teil b**

| Dichte kg/l |                                     | 1,04            |                  | 1,11  |                    | 1,11  |                            | 1,20  |                    | 1,20  |                        | 1,20  |   |
|-------------|-------------------------------------|-----------------|------------------|-------|--------------------|-------|----------------------------|-------|--------------------|-------|------------------------|-------|---|
| Nr.:        | Beschreibung                        | VZ1 %           | VZ1 Zucker kg/m³ | VZ2 % | VZ2 Phosphat kg/m³ | VZ3 % | VZ3 Phosphonob. + CS kg/m³ | VZ5 % | VZ5 Gluconat kg/m³ | VZ6 % | VZ6 Delvo HCA-20 kg/m³ | VZ7 % | VZ7 Alkaliphosphat Monosaccharide kg/m³ |
| M0          | Referenz ohne Verzögerer            | ohne Verzögerer |                  |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M1          | VZ1 niedrig                         | 0,50            | 2,10             |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M2          | VZ1 hoch                            | 0,80            | 3,36             |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M3          | VZ2 niedrig                         |                 |                  | 1,00  | 0,00               |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M4          | VZ5 Langzeit                        |                 |                  |       |                    |       |                            | 0,60  | 0,00               |       |                        |       |   |
| M5          | VZ2 hoch                            |                 |                  | 1,50  | 0,00               |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M6          | VZ3 niedrig                         |                 |                  |       |                    | 0,40  | 0,00                       |       |                    |       |                        |       |   |
| M7          | VZ3 hoch                            |                 |                  |       |                    | 0,80  | 0,00                       |       |                    |       |                        |       |   |
| M8          | VZ6 Langzeit                        |                 |                  |       |                    |       |                            |       |                    | 1,00  | 0,00                   |       |   |
| M9          | VZ7mittel                           |                 |                  |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        | 0,50  | 0,00                                    |
| M9 a        | VZ7 hoch VZ nach 10 min zugeben     |                 |                  |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        | 1,00  | 0,00                                    |
| M10         | Optimierung ZSK q=0,29 VZ           |                 |                  |       |                    | 0,25  | 0,00                       |       |                    |       |                        |       |   |
| M11         | Optimierung ZSK + Sand-SL; wenig BM |                 |                  |       |                    | 0,25  | 0,00                       |       |                    |       |                        |       |   |
| M12         | Siderit statt Met-O                 |                 |                  |       |                    | 0,40  | 0,00                       |       |                    |       |                        |       |   |
| M13         | Mischung 1 VÖZ-Vils                 |                 |                  |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M14         | Mischung 2 VÖZ-W&P                  |                 |                  |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |
| M15         | Y1 Reserve                          |                 |                  |       |                    |       |                            |       |                    |       |                        |       |   |

**Tabelle 7c: Mischungszusammensetzung [kg/m³] der ausgeführten Rezepturen Teil c**

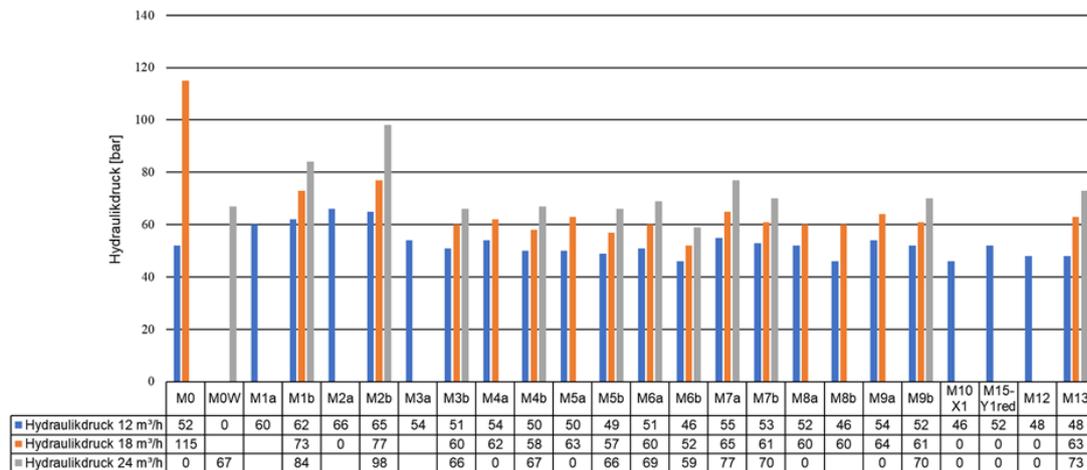
| Dichte kg/l |                                     | 2,74          |               | 2,74          |         | 3,8   |                 | 2,6                |                      | 1,10                |  | 2,6 |  | 2,89 |  | 2,8 |  | 2,8 |       |
|-------------|-------------------------------------|---------------|---------------|---------------|---------|---|-----------------|--------------------|----------------------|---------------------|--|-----|--|------|--|-----|--|-----|-------|
| Nr.:        | Beschreibung                        | CAL-Set Kg/m³ | CAL-EGU Kg/m³ | Siderit Kg/m³ | MiSi-Q1 | Levasil kollidales Siliika (Suspension 15%) | Metaver O Kg/m³ | Hüs 4500 Gmu kg/m³ | AHWZ-ZI-Vils-1 kg/m³ | AHWZ-ZI-W&P-2 kg/m³ |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M0          | Referenz ohne Verzögerer            |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M1          | VZ1 niedrig                         |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M2          | VZ1 hoch                            |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M3          | VZ2 niedrig                         |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M4          | VZ5 Langzeit                        |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M5          | VZ2 hoch                            |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M6          | VZ3 niedrig                         |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M7          | VZ3 hoch                            |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M8          | VZ6 Langzeit                        |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M9          | VZ7mittel                           |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M9 a        | VZ7 hoch VZ nach 10 min zugeben     |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M10         | Optimierung ZSK q=0,29 VZ           | 10,3          |               |               |         | 12,5  | 4,0             | 71,0               |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M11         | Optimierung ZSK + Sand-SL; wenig BM | 10,3          |               |               |         | 12,5  | 3,8             | 52,0               |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M12         | Siderit statt Met-O                 |               |               | 29,4          | 29,4    |   |                 |                    |                      | 81,2                |  |     |  |      |  |     |  |     |       |
| M13         | Mischung 1 VÖZ-Vils                 |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     | 140,0 |
| M14         | Mischung 2 VÖZ-W&P                  |               |               |               |         |   |                 |                    |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     | 140,0 |
| M15         | Y1 Reserve                          | 6,9           |               |               |         | 11,5  | 3,8             | 72,5               |                      |                     |  |     |  |      |  |     |  |     |       |

Die Mischung erfolgte in der Mischanlage der TBA Zams unter teilweiser händischer Zugabe ergänzender Ausgangsstoffe. Der Beton wurde dann im Fahrmischer, meist in 3 m³ Chargen zur Spritzmaschine SIKA PM500 geliefert. Gespritzt wurde in Kisten sowie teilweise im EVI-Stollen (Abb.4).



**Abbildung 4: Spritzmobil und seine Beschickung**

Das Spritzmobil war mit einer Vielzahl an Drucksensoren ausgestattet, um näherer Auskünfte über die auftretenden Druckverläufe zu gewinnen und einen Zusammenhang zu den Frischbetonprüfungen (AM, FM, LP, T, Gleitrohr-Rheometer, Filterpresse, Auslaufzeiten) herzustellen (Abb. 5).



**Abbildung 5: Vergleich der Hydraulikdrücke verschiedener Mischungen und Fördermengen**

Am aufgetragenen Spritzbeton wurden die Frühfestigkeiten gemessen und eine große Zahl an Bohrkernen für die Dauerhaftigkeitsuntersuchungen und die technologischen Kennwerte gezogen. Die Druckfestigkeitsergebnisse nach 28 Tagen zeigen einige äußerst bemerkenswerte Aspekte, die in nachfolgender Aufzählung näher erläutert und diskutiert werden:

- Außerordentlich überraschend waren die extrem hohen Druckfestigkeitswerte bei den gespritzten Null-Proben ohne Beschleuniger. Statt der Würfelprobe des Ausgangsbetons wurden Spritzkisten ohne Beschleunigerzusatz hergestellt und geprüft, sodass ein sinnvoller Vergleich zwischen gleichwertigen Luftporengehalten bzw. Beton-Dichten durchgeführt werden konnte. Der Festigkeitsabfall fiel dem entsprechend mit 41 bis 60 % sehr hoch aus.
- Der Festigkeitsabfall bei den beiden Proben der Zementindustrie und den Spezialmischungen mit Siderit und höheren Zusatzstoffgehalten ohne oder wenig Metakaolin fiel hingegen sehr viel geringer aus und lag bei 13 bzw. 20 %. Daraus könnte man schließen, dass der Anteil von Metakaolin, ---in den VÖZ-Mischungen M13 und M14 und der Siderit-

Mischung M12 war Metakaolin nicht enthalten---, besonders empfindlich auf Beschleuniger reagiert. Dass diese Hypothese nicht haltbar ist, zeigten die nachträglich durchgeführten Untersuchungen.

- Die Absolutwerte der Bohrkernfestigkeiten beliefen sich im ähnlichen Festigkeitsband zwischen 43 und 51 MPa, sodass in dieser Hinsicht kein allzu großer Effekt erkennbar war.
- Auch bezüglich der Verzögerer konnte kein wesentlicher Einfluss auf die 28 Tage Festigkeit festgestellt werden.
- Die Spezialmischungen M12 (Siderit statt Metakaolin) und ganz besonders M15 (erhöhter Hüttensandgehalt +Mikrosilika) zeigten signifikant höhere 28-Tage Druckfestigkeiten, was eine Verbesserung in der Dauerhaftigkeit erwarten lässt. Auch in diesem Fall deutet der niedrige Festigkeitsabfall auf hier nicht eingesetztes Metakaolin als Verursacher hin.

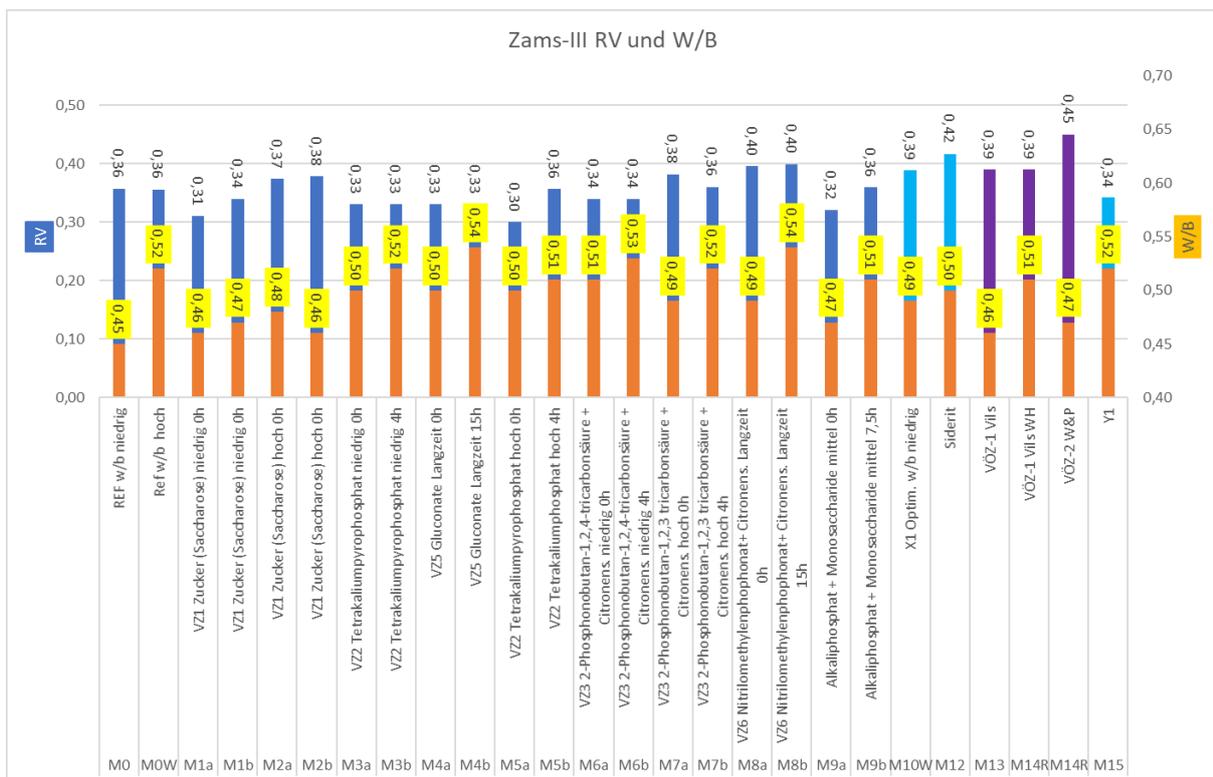
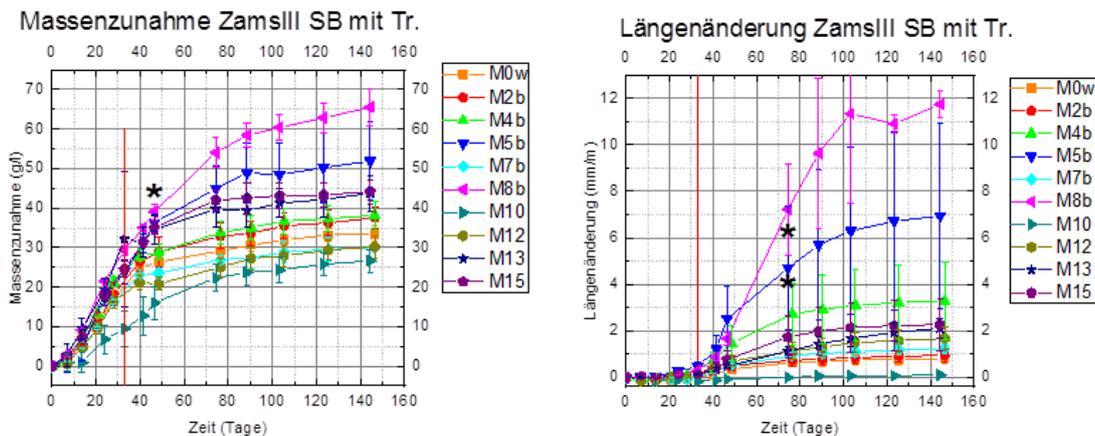


Abbildung 6: Graphische Darstellung der RV-Test Ergebnisse der Verzögerer-, VÖZ- und Spezialmischungen (W/B mit K=1 gerechnet)

Die RV-Prüfungen (Abb. 6) zeigten:

- Verzögerer scheinen kaum Einfluss auf das RV-Test-Ergebnis zu haben. Die Werte liegen mit Werten von 0,31 bis 0,40 nur wenig über dem Streubereich der Methode.
- Der W/B-Wert wirkt auf das RV-Ergebnis sich im vorliegenden Bereich von 0,45 bis 0,54 kaum erkennbar aus.
- Siderit zeigt zwar positive Effekte hinsichtlich RV-Minderung, schneidet im Vergleich zu Metakaolin aber schlechter ab.
- VÖZ-Vils mit Mikrosilika zeigt mit dem RV-Wert von 0,39 ein signifikant besseres Ergebnis als VÖZ-W&P mit Trass als Zusatzstoff, welches den Wert 0,45 erreichte.
- Beide VÖZ-Mischungen können die RV-Werte von Metakaolin-hältigen Mischungen kaum erreichen.
- Die Reduktion des Gehalts an Portlandzement (CEM I) von ~270 kg/m<sup>3</sup> auf ~220-240 kg/m<sup>3</sup> (z.B.: durch Optimierung der Sieblinie) wirkte sich erwartungsgemäß auch positiv auf den RV- Wert aus (M10w, M15).

Die Sulfatlängenänderung wurde nach SIA 262 (Abb. 7) geprüft und die Beständigkeit gegen Sulfat-Thaumasit-Angriff durch Auslagerungsversuche von geschnitten und geschliffenen Prismen in  $\text{Na}_2\text{SO}_4$  Lösung mit Gips und Kalzit im Überschuss für 18 Monate untersucht (Details im Bericht Dauerhaftigkeit).



**Abbildung 7a-b: Massenzunahme und Längenänderung Bohrkern Zams-III SB mit Trocknung**

Im Zuge der Auswertung der Zams III GSV ergaben sich folgende Fragestellungen hinsichtlich Effektes der niedrigen Temperaturen beim GSV, zu Reaktionsmechanismen von Siderit und Verzögerern und Nullbeton Festigkeiten. Diese wurden im Nachgang im Labor an Leim- und Mörtelproben untersucht und unter AP 7: Grundlegende Reaktionsmechanismen, und im Bericht Zams III beschrieben:

Zusammenfassend kann gesagt werden:

- Verzögerer in angepasster Dosierhöhe haben praktisch keinen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit und Pumpbarkeit.
- Bei kühler und feuchter Witterung kann es jedoch bei langer Haltezeit zu Kondensationserscheinungen im Mischwagen kommen, was zu einer beträchtlichen Erhöhung des W/B-Wertes um bis zu 0,05 führen kann und als Folge eine Verminderung der Festigkeit und Dauerhaftigkeit hat.
- Manche Verzögerer sind für Langzeitverzögerung nicht geeignet, weil sie nach mehr als 8 Stunden die Verzögerung nicht mehr gewährleisten können und zu Ansteifeffekten neigen.
- Bei Überdosierung von Verzögerern und bei Langzeitverzögerung kann es zu beträchtlicher Absenkung der Frühfestigkeit bis 24 Stunden kommen. Die Frühfestigkeitsminderung kann bis zu 70% betragen.
- Auf die Endfestigkeit haben Verzögerer hingegen keinen merklichen Einfluss.
- Auf die Dauerhaftigkeit des Spritzbetons haben Verzögerer bis jetzt keinen eindeutig feststellbaren Einfluss, es sei denn indirekt als Folge von W/B-Wert-Erhöpfung infolge Kondensation bei kalter und feuchter Witterung und langer Haltezeit. Eine Ausnahme bilden die Proben mit langer Haltezeit, vor allem, wenn der Verzögerer für Langzeitverzögerung nicht geeignet war. In diesen Fällen konnten Verschlechterungen bei der Frostbeständigkeit festgestellt werden.
- Langzeit-verzögerte Spritzbetone zeigten eine verminderte Sulfat-Beständigkeit, die allerdings mit großer Wahrscheinlichkeit dem durch Kondensation verursachten W/B-Anstieg anzulasten ist. Die Auswirkungen besonders durch Zucker basierende Verzögerer auf beschleunigte Thaumasitbildung konnte noch nicht geklärt werden (Versuche laufen noch über das Projektende hinaus).
- Verzögerer scheinen die Fähigkeit von Metakaolin zur Bindung von Portlandit leicht zu schwächen. Ein wesentlicher Einfluss auf den RV-Wert besteht jedoch nicht.

- Bezüglich der Phasenentwicklung senken alle Verzögerer die Ettringit-Bildung naturgemäß auf bis zu einem Drittel ab. Ein kleiner positiver Einfluss besteht bei manchen Verzögerern auf die nach 48 h einsetzende Monocarbonat-Bildung.
- Fein aufgemahlener Siderit zeigt eine sehr hohe Reaktivität. Nach 24 h hat die Hälfte, nach 28 Tagen praktisch der gesamte Siderit reagiert.
- Ein negativer Einfluss von Siderit als Bindemittel-Bestandteil besteht für unbeschleunigten Beton vor allem zu ganz frühen Zeiten. Dieser gleicht sich jedoch mit der Zeit aus, sodass nach 28 Tagen nur mehr wenig Festigkeitsminderung von wenigen Prozenten zu verzeichnen sind.
- Bei beschleunigtem Spritzbeton zeigt feingemahlener Siderit als Bindemittel-Bestandteil eine Festigkeit steigernde Wirkung nach 6 Stunden, die in der Folge jedoch ins Gegenteil dreht und nach 28 Tagen immer noch zu einer Festigkeitsminderung von 12 % führt.
- Metakaolin bewirkt im Nullbeton eine bedeutende Festigkeitserhöhung, die jedoch mit Beschleunigern wieder zunichte gemacht wird, sodass das Festigkeitsniveau von Spritzbeton nicht auffällig ist. Aus den Nachuntersuchungen lässt sich dieses Phänomen jedoch nicht ableiten.
- Spritzbeton mit Metakaolin zeigt in Verbindung mit ausreichender Menge an Hüttensand keine verminderte Sulfatbeständigkeit.
- Sieblinien optimiert Spritzbetone zeigen geringere Abwitterung beim CDF-Test, geringere Längenänderung bei der Sulfatbeständigkeitsprüfung und geringere Wassereindringtiefen. Das führt zu höherer Dauerhaftigkeit.
- Die Spritzbetone mit den von der VÖZ zur Verfügung gestellten AHWZ zeigten durchwegs gute Eigenschaften. Lediglich der RV-Wert war bei VÖZ-2 (W&P) etwas höher. Der eingesetzte Trass scheint gegenüber Mikrosilika bzw. Metakaolin keine so große Bindekraft für Portlandit zu haben.

#### Nassspritzversuche Hagerbach 24.2.bis 27.2.2020

Die Versuche sollten offene Fragen bei den Versuchen mit verschiedenen Verzögerer-Typen aus dem GSV Zams III bei der Verarbeitung von Nassspritzbeton abklären. Zudem wurde der Pump- und Spritzvorgang abhängig von Verarbeitungseigenschaften des Nass-Mischgutes und von Maschinenparametern untersucht.

Die gesetzten Ziele waren:

- Ergänzung der Versuche zur Wirkung von (Langzeit-)Verzögerern im Projekt auf Spritzbeton. Bestimmung des Einflusses:
  - auf die Konsistenz (Fließmaß und Ausbreitmaß) des Ausgangsbetons
  - bei verschiedenen Verzögerungszeiten und Dosierungen auf die Frühfestigkeitsentwicklung
  - auf die Verarbeitbarkeit (Pumpbarkeit, Spritzbarkeit, Rückprall)
  - auf die Dauerhaftigkeit (28d, 90d Druckfestigkeit, RV, WU, Sulfat/Thaumasit-Beständigkeit)
- Zusammenhang zwischen Pump-Parametern und Lagenbildung bzw. Inhomogenität der EB-Verteilung im aufgetragenen Spritzbeton

Verspritzt wurde eine Grundmischung mit verschiedenen Verzögerer-Dosierungen. Die Mischung erfolgte an der kleinen Mischanlage im Tunnel. Der Beton wurde dann mit einem Trommel-nachmischer zur Spritzmaschine SIKA PM 500 gebracht (Abb. 8), die wieder gleich instrumentiert wie bei Zams III war (Abb. 9).

Das Bindemittel war eine Kombination von Portlandzement, Hüttensand, Metakaolin und feinem

Kalksteinmehl (CEM II/B-M (S,L,Q)). Die Versuchsabfolge ist Tabelle 8, die Mischungen sind Tabelle 9 zu entnehmen.

**Tabelle 8: Programmübersicht der Spritzversuche Hagerbach**

| Mischungen | Uhrzeit (~) | Verzögerer und Bemerkung     | ~Δt Herstellung & Spritzen |
|------------|-------------|------------------------------|----------------------------|
| H0         | 09:30       | Referenz kein Verzögerer     | 0h                         |
| H1a        | 11:00       | VZ3 niedrig konz. (VZ3-n-0h) | 0h                         |
| H1b        | 14:45       | VZ3 niedrig konz. (VZ3-n-4h) | 4h                         |
| H2a        | 15:45       | VZ3 hoch konz. (VZ3-h-0h)    | 0h                         |
| H2b        | 08:30       | VZ3 hoch konz. (VZ3-h-18h)   | 17h                        |
| H3a        | 10:00       | VZ1 niedrig konz. (VZ1-n-0h) | 0h                         |
| H3b        | 13:45       | VZ1 niedrig konz. (VZ1-n-4h) | 4h                         |
| H4a        | 14:45       | VZ1 hoch konz. (VZ1-h-0h)    | 0h                         |
| H4b        | 08:30       | VZ1 hoch konz. (VZ1-h-18h)   | 18h                        |

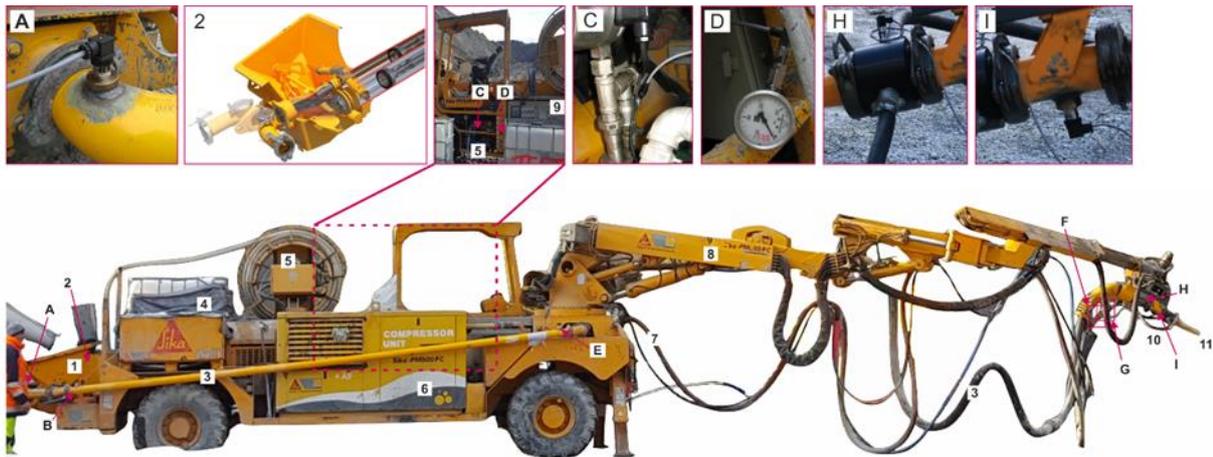
**Tabelle 9: Übersicht über die Mischungszusammensetzung der ausgeführten Rezepturen lt. Einwaageprotokoll (Luftporenbildner 0,5%, Fließmittel 1,0%, Erstarrungsbeschleuniger C-2 mit 7,0%, für W/B ist K=1)**

| Mi-<br>schung | Versuchs-<br>bezeichnung | CEM II B-<br>M (S,L,Q) | VZ1- %<br>v. BM | VZ3- %<br>v. BM | GK 0/1<br>trocken | GK 0/4<br>trocken | GK 4/8<br>trocken | Wasser-<br>gehalt | W/B   |
|---------------|--------------------------|------------------------|-----------------|-----------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------|
|               |                          | kg/m <sup>3</sup>      | % v.B           | % v.B           | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | kg/m <sup>3</sup> | -     |
| H0            | Referenz                 | 413                    | -               | -               | 39                | 960               | 705               | 198               | 0,480 |
| H1            | VZ3-n                    | 407                    | -               | 0,50%           | 62                | 954               | 700               | 197               | 0,485 |
| H2            | VZ3-h                    | 407                    | -               | 0,80%           | 61                | 952               | 697               | 200               | 0,491 |
| H3            | VZ1-n                    | 409                    | 0,60%           | -               | 55                | 959               | 700               | 197               | 0,481 |
| H4            | VZ1-h                    | 407                    | 1,40%           | -               | 62                | 953               | 698               | 197               | 0,484 |

Die Prüfungen erfolgten analog wie bei Zams III. Hier herrschten aber konstante Temperaturen. Die Zeitlupenaufnahmen konnten besser zu den Spritzlagen zugeordnet werden.



**Abbildung 8: Beschickung des Spritzmobils**

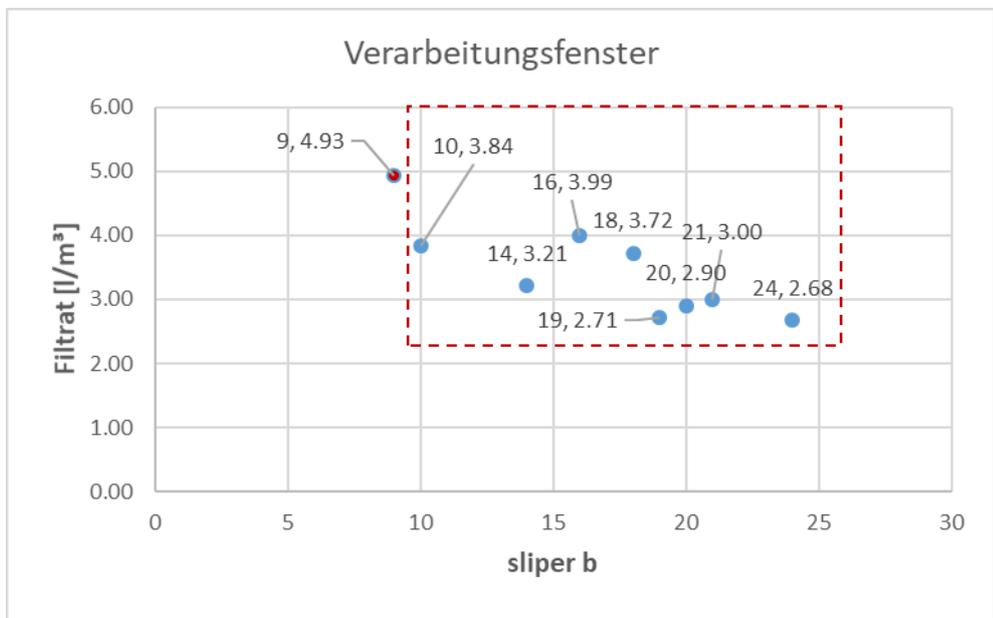


- Geräteteile:**
- 1... Aufgabetrichter für Frischbeton (Übergabe aus Fahrmischer)
  - 2... Doppelkolben- Betonpumpe mit entsprechender Hydraulik
  - 3... Betonförderleitung (Metallrohr + flexibles Rohr)
  - 4... Reservoir für EB
  - 5... EB Pumpe & EB Förderleitung
  - 6... Kompressor
  - 7... Druckluftleitung
  - 8... Spritz(roboter)arm
  - 9... Steuereinheit
  - 10... Aerosol-Konverter
  - 11... (Spritz-) Düse

- Position der Sensoren:**
- A... Betonpumpenauslass
  - B... Betonförderleitung (1)
  - C... Beschleunigerpumpe
  - D... Hydraulikdruckleitung (+Manometer)
  - E... Betonförderleitung (2)
  - F... Druckluftleitung
  - G... Beschleunigerzuleitung Spritzdüse
  - H... Aerosol-Konverter
  - I... Betonförderleitung vor Aerosol-Konverter

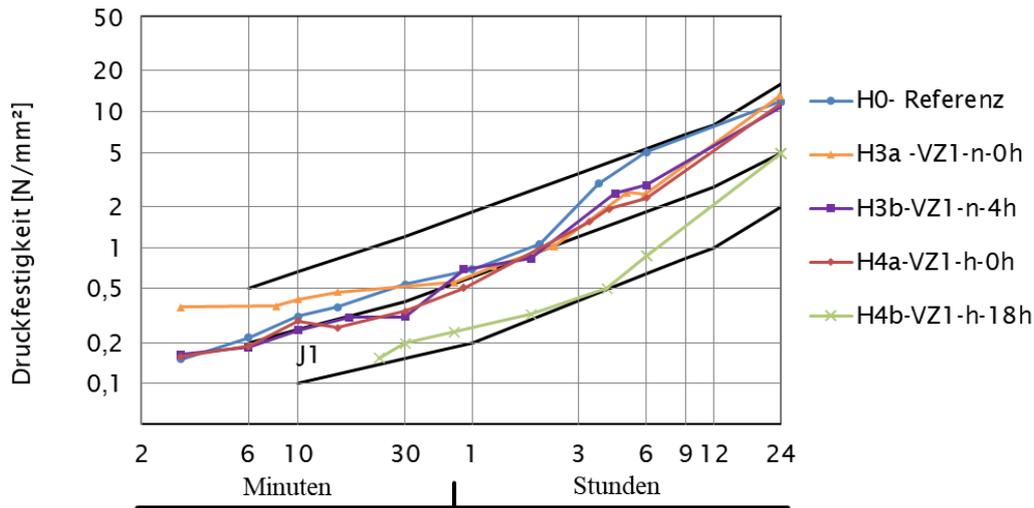
**Abbildung 9: Spritzmobil, ausgestattet mit einer Reihe von Drucksensoren, in Förderleitungen**

Die Verarbeitung der Mischungen unterschied sich nicht gravierend. Das Verarbeitungsfenster ist in Abb. 10 zu sehen.



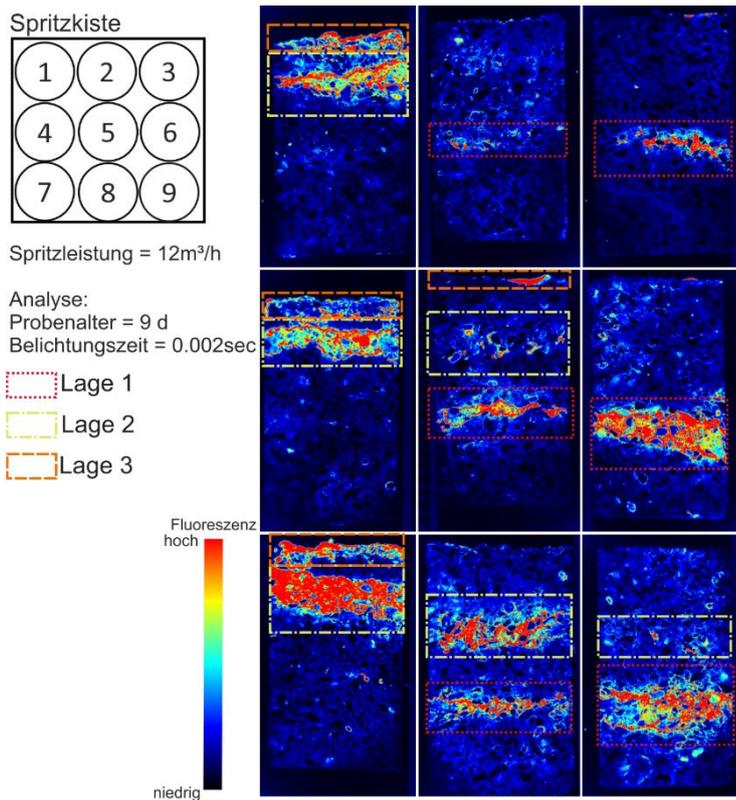
**Abbildung 10: Viskosität mit Sliper (b) gegen Filtratmenge: alle geprüften Mischungen mit Ausnahme H4.b waren gut verarbeitbar (H4.b hatte geringes Ausbreitmaß und hohe Viskosität) – Verarbeitungsfenster nicht standardisiert, das Fenster gilt nur für diese Mischung**

Außer der Mischung H4b-VZ1-h-1 8h wiesen alle Mischungen Frühfestigkeiten im unterem J2 Bereich auf (Abbildung 11).



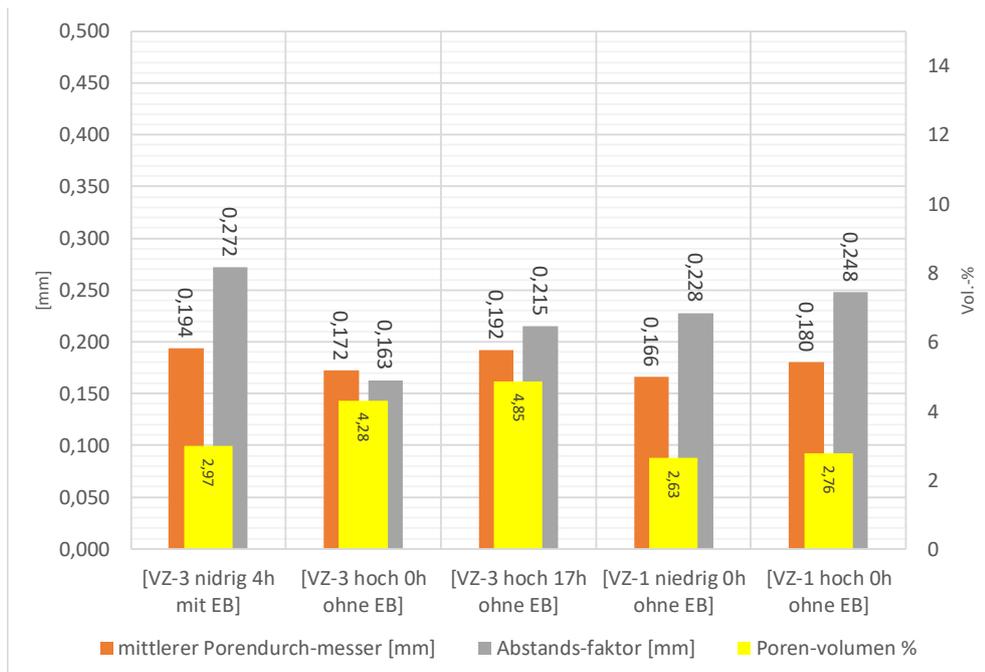
**Abbildung 11: Frühfestigkeiten eines Teils der Versuchsserie**

Im Zuge der Untersuchungen der Verteilung des Erstarrungsbeschleunigers mit Tracer Zusatz konnte klar der Zusammenhang mit der diskontinuierlichen Betonförderung aufgezeigt werden (Abb.12).



**Abbildung 12: Falschfarbenbild der Fluoreszenzanalysen von 9 Bohrkernen entnommen aus einer Kiste der Mischung H2a; gespritzt bei 12m³/h. 3 Lagen können unterschieden werden. Diese können mit Hilfe der Zeitlupenaufnahmen gut dem schwankenden Betonstrom zugeordnet werden.**

Bei den Festbetonprüfungen konnte auch wieder der günstige Einfluss des verwendeten Luftporenbildners auf Basis metallischen Aluminiums auf einen niedrigen Abstandsfaktor im Festbeton nachgewiesen werden (Abb. 13)



**Abbildung 13: Luftporenkennwerte Spritzversuche Versuchsstollen Hagerbach, Versuche VZ1 und VZ3**

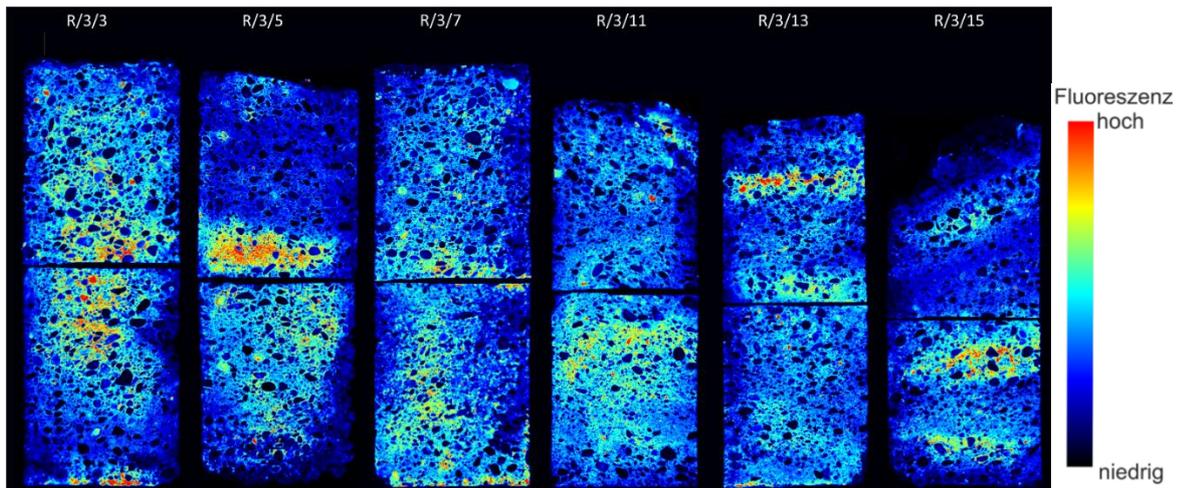
Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Die Mischungen mit dem gewählten Bindemittel aus einer Kombination von Portlandzement, Hüttensand, Metakaolin und feinem Kalksteinmehl (CEM II/B-M (S,L,Q)) waren gut pump- und spritzbar. Die Verzögerer hatten unmittelbar nach dem Mischen keinen bis leicht positiven Einfluss auf die Verarbeitbarkeit. Nach 4 Stunden Standzeit (H1b bzw. H3b) zeigte sich keine Abnahme der Konsistenz, während sich die Konsistenz nach einer Haltezeit von ~18 Stunden (H2b bzw. H4b) deutlich verschlechterte. Auf die Pumpbarkeit (i.d.R. Kolbenölldruck der Betonpumpe) hatte der Konsistenzrückgang jedoch keinen großen Einfluss. Der starke Konsistenzrückgang bei Mischung H4b (mit VZ3) führte aber zu einem ungenügenden Kolbenfüllgrad der Betonpumpe und der Versuch musste daher abgebrochen werden. VZ3 war für eine Langzeitverzögerung nicht geeignet.
- Die Verzögerer zeigten bei geringer Dosierung (Haltezeit 4h) keinen negativen Einfluss auf die Frühfestigkeit (bis 24h) im Vergleich zur Referenz ohne Verzögerer, während eine hohe Dosierung (Haltezeit ~18h) die Frühfestigkeit negativ beeinflusste. Mischungen mit Verzögerer, die am Ende der Haltezeit (entweder 4h oder 18h) gespritzt wurden, hatten maximal gleiche oder eine niedrigere Frühfestigkeit als jene, die kurz nach dem Mischen gespritzt wurden.
- Die Detektion von EB- Lagen mittels Tracer (Na- Fluoreszin) und Epifluorizenzanalysen zeigte, dass der Beschleuniger nicht homogen im Festbeton verteilt ist. Die Fluoreszenzbilder korrelieren auch mit der visuellen Beobachtung des Spritzstrahls. Bereiche (Lagen) mit erhöhtem Beschleunigergehalt wirken sich negativ auf den Karbonatisierungswiderstand aus.
- Der Verzögerer VZ1 und VZ3 hatten bei dieser Mischung und den gewählten Konzentrationen keine Auswirkung auf den RV-Wert, gleich wie bei den Versuchen von ZAMS III.
- Die Auswertung der Luftporen an Proben aus mehreren GSV ergab, dass LP-Mittel auf Basis von metallischem Aluminium deutlich bessere Abstandswerte im Vergleich zu tensid-

basierenden LPs ergaben.

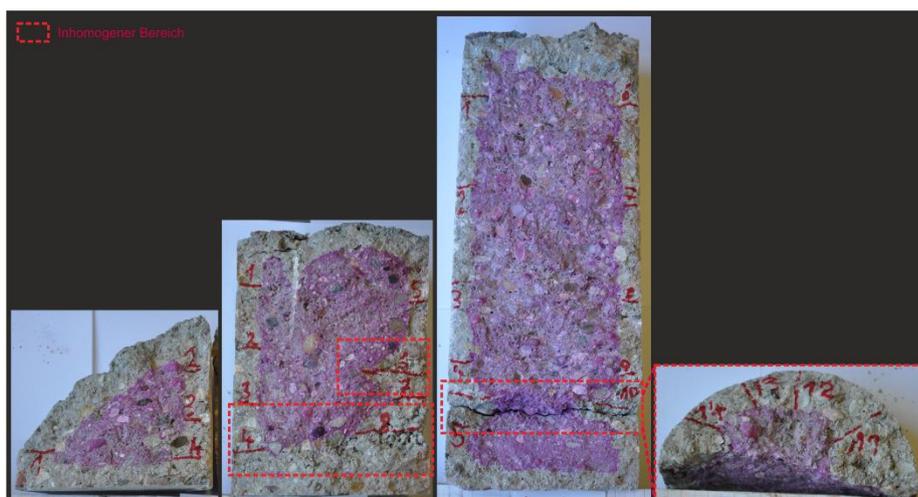
Ergänzender Nassspritzversuch ZaB II 23.9.2020

Am Zentrum am Berg fand ein Versuch mit dem Normet Spraymec 8199 VC statt. Der Beton wurde von der Baustelle des Semmering Tunnels angeliefert. (CEM I 52,5N SR0 C<sub>3</sub>A-frei, Flumix C, Dynamo LZ SP W 20, Mapetard VZ M) Dem Erstarrungsbeschleuniger (BASF Masterroc SA 193) wurde wieder ein Tracer zugesetzt. Damit kann jetzt auf die Daten von Sika PM500, Meyco Potenca und Normet Spraymec zugegriffen werden. Versuchsziel waren weitere Erkenntnisse zur Lagenbildung. Dazu wurden auch Bohrkern aus der Tunnelwand entnommen (Abbildung 14).



**Abbildung 14: Falschfarbenbild der Epifluoreszenzanalyse von Bohrkernen, welche mit 7 % Beschleuniger gespritzt wurden**

Neben den Falschfarbenbildern wurden auch Bohrkern auf Karbonatisierung geprüft. Die Lagerung erfolgte bei 3% CO<sub>2</sub> und 57% RF. Die Untersuchungen zeigen, dass durch die beschleunigte Karbonatisierung Bereiche mit größerer Karbonatisierungstiefen bereits nach 28 Tagen sichtbar gemacht werden können. Diese Bereiche sind Inhomogenitäten, wobei hier natürlich auch Spritzfehler auffallen, die aber bereits bei der optischen Bohrkernbegutachtung sichtbar sind (Abb. 15).



**Abbildung 15: Phenolphthaleintest nach 54 Tagen Auslagerung bei 3V%. Bei der dritten Probe ist der Bohrkern beim Spalten entlang der Längsachse auch bei der Inhomogenität gebrochen**

Änderungen beim Bericht KAT3

Auf Grund weiterführende Laborversuche und GSV mit Verzögerern wurden Ergebnisse der

Spritzversuche KAT3 im Bericht aktualisiert (siehe Bericht KAT3).

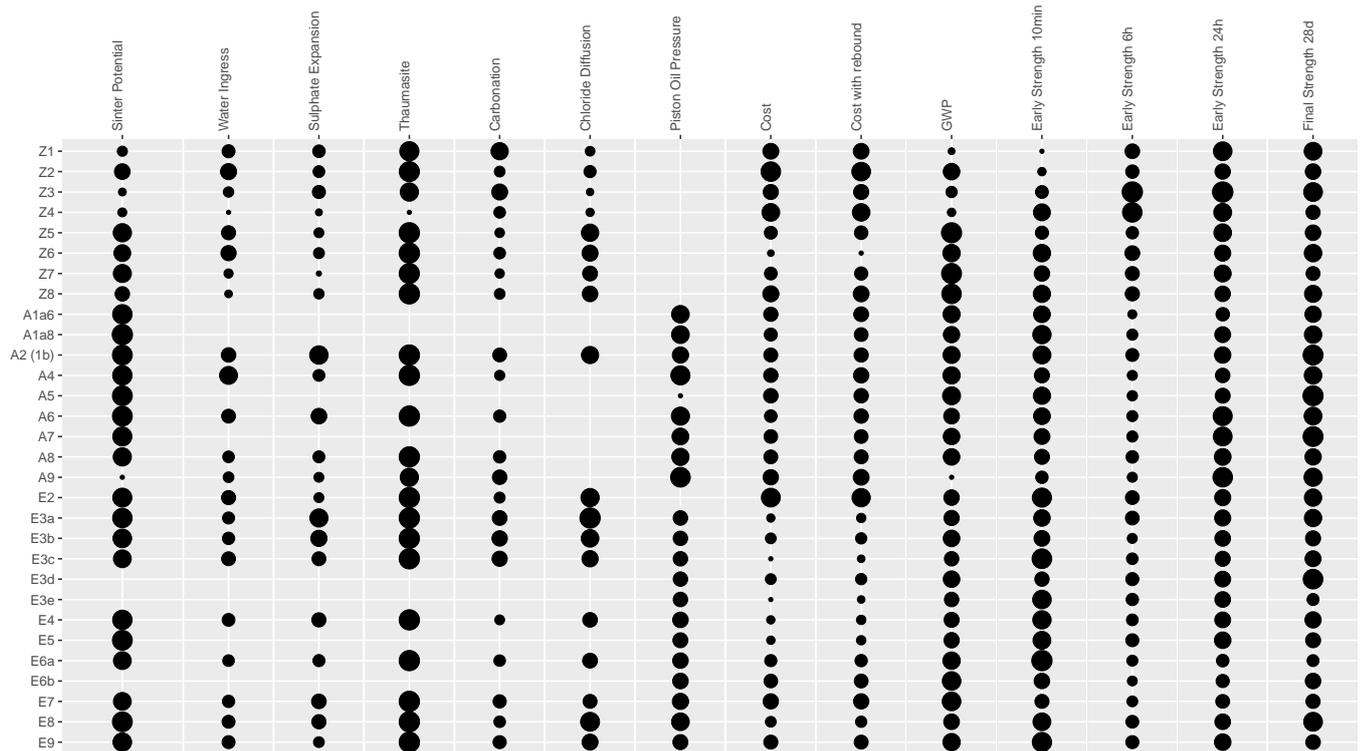
**Zusammenfassend** konnten durch die Auswertung der GSV folgende Erkenntnisse gewonnen werden

- Feinstkalzit kann die Verarbeitbarkeit und Frühfestigkeitsentwicklung sehr positiv beeinflussen und beeinträchtigt in Kombination mit weiteren hydraulischen Zusatzstoffen wie zum Bsp. gemahlenem Hüttensand die Dauerhaftigkeit nicht.
- FM und VZ sollten auf den Einsatz unbedingt gut abgestimmt werden. Es wurden bei verschiedenen Produktkombinationen eine Reduzierung der Festigkeitsentwicklung festgestellt.
- Metakaolin ist hervorragend geeignet den RV-Wert zu reduzieren. Bei Sulfatangriff sollte es aber nicht als alleiniger Zusatzstoff eingesetzt werden.
- Hüttensandzusatz in Kombination mit abgestimmten weiteren Zusatzstoffen ist eine sehr gute Möglichkeit den Sulfat/Thaumasit-Angriff besser in den Griff zu bekommen.
- Die Visualisierung von Lagenbildung im aufgetragenen Spritzbeton zeigt Mikro- und Makrolagen. Das bestätigen Zeitlupenaufnahmen, Druckerfassungen während des Spritzvorgangs sowie Auswertungen von Tracerversuchen und chemisch mineralogische Zusammensetzungen.
- Die Beurteilung der Pumpbarkeit mit Sliper und Filterpresse ist deutlich aussagekräftiger als das Ausbreitmaß.
- Spezielle Luftporenbildner können Feinluft mit geringem Abstandsfaktor einführen.
- Es bestehen gute Möglichkeit ein Trockenmischgut für Sulfatangriff aus SR0 und Zusätzen herzustellen.
- Mit Siderit konnte ein neues Material gefunden werden, das als lokaler Zusatzstoff z.B. günstig das Versinterungspotential beeinflusst.
- Überraschend in Zams III war, dass bei kühler Witterung und nur bei hoher Luftfeuchtigkeit während der Haltezeit offensichtlich Wasser im Mischwagen kondensierte und den W/B-Wert der Mischung deutlich erhöhte.

## AP 6c Nachhaltigkeitsbewertung

Die Nachhaltigkeitsbewertung erfolgte unter Berücksichtigung der technologischen Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit. Nach intensiver Recherche, interner und externer Diskussion konnten für die Beurteilung von Spritzbeton 14 Indikatoren festgelegt werden. Anhand von Berechnungsalgorithmen konnten die unterschiedlichen Mischungen einander gegenübergestellt werden. Somit ist ein Vergleich hinsichtlich besonderer vorteilhafter Mischungen für individuelle Anforderungen nun möglich.

Beispielhaft wird im Folgenden ein Auszug der Bewertung für einige Nassspritzbetone demonstriert (Abb. 16). Die Datengrundlage, die Berechnungsmethoden und die vollständige Bewertung sowohl für Trocken- als auch für Nassmischungen sind im beigefügten Bericht Environmental Assessment enthalten.

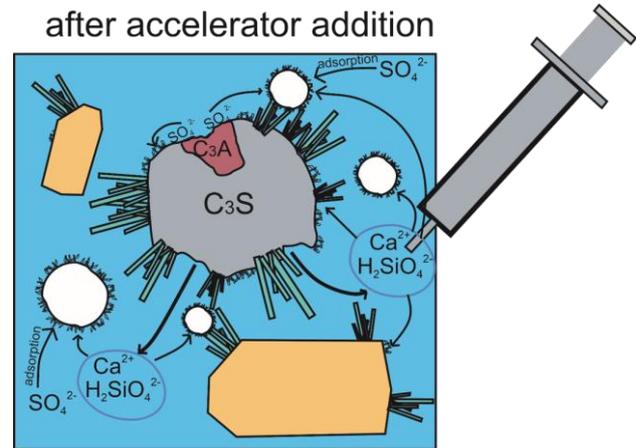
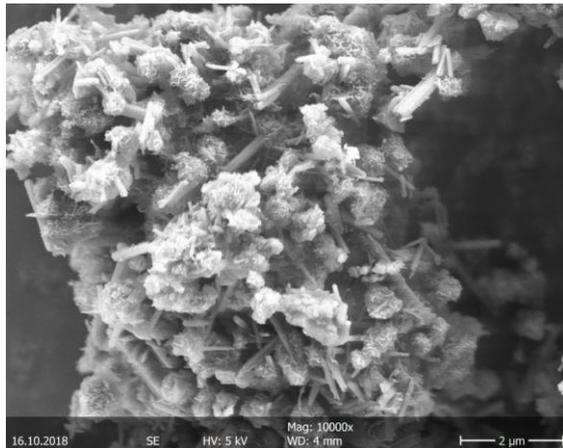


**Abbildung 16: Auszug aus der Nachhaltigkeitsbewertung für die GSV Zams I, Zams II und ZaB I. Darstellung von technologisch, dauerhaftkeits-, kosten- und umweltrelevanten Indikatoren für Spritzbeton. Je größer der dargestellte Kreis, desto besser die Leistung/Erfüllung.**

### AP 7: Grundlegende Reaktionsmechanismen

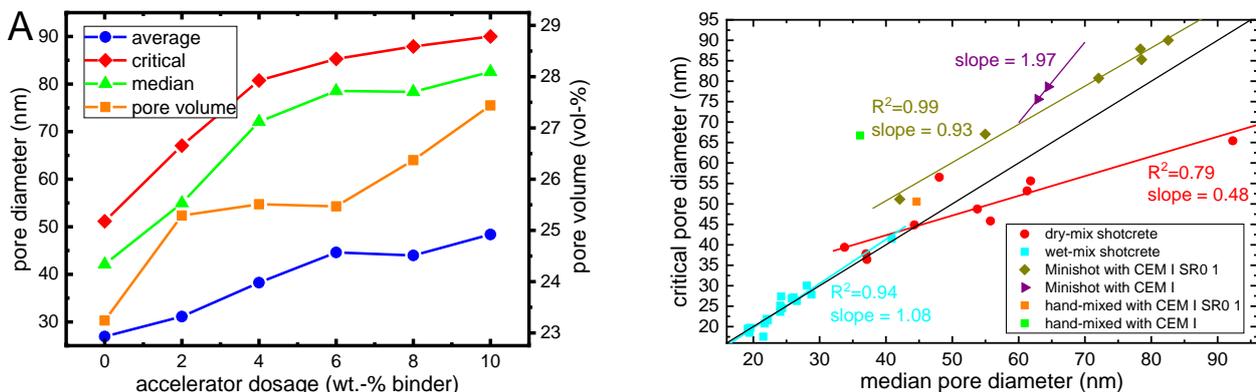
Im Verlaufe des gesamten Projektes und im Speziellen im 4.FJ wurden zahlreiche grundlegende Mechanismen für Spritzbeton untersucht und in vielen Bereichen auch weitgehend aufgedeckt. Basierend auf diesen Erkenntnissen entstand eine Vielzahl von Publikationen – eine Auflistung ist im zusätzlichen Bericht Dissemination angegeben. Erkenntnisse betreffend Dauerhaftigkeit sind direkt bei den Berichten der GSV bzw. im separaten Bericht Dauerhaftigkeit dokumentiert.

Die Ursachen zur enormen Frühfestigkeitssteigerung durch Zugaben von Feinstkalkzit konnte größtenteils entschlüsselt werden. Detailergebnisse sind in der Dissertation Lukas Briendl (voraussichtlicher Abschluss Anfang 2022), in zusätzlichen Berichten zur Hydratation und Publikationen in Fachjournalen enthalten. Folgende 2 Abbildungen 17 zeigen ein elektronenmikroskopisches Bild der initialen C-S-H Phasenbildung auf den Oberflächen der Kalksteinpartikel und ein schematisches Modell dazu.



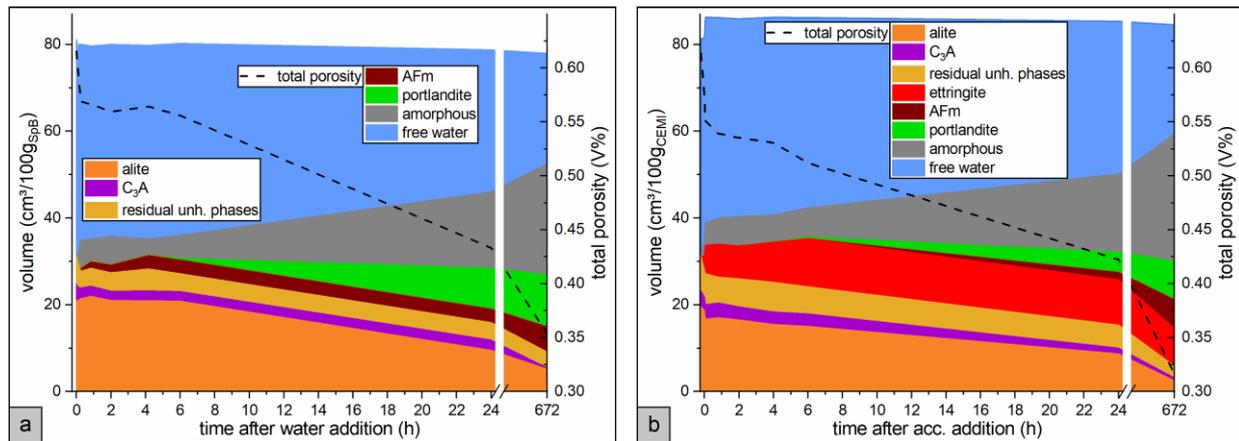
**Abbildung 17:** li.) SEM Bild wenige Minuten nach der Beschleunigerzugabe und re.) Modell der Phasenbildung in Anwesenheit von feinen Kalksteinpartikeln kurz nach Beschleunigerzugabe. Bilder aus Briendl et al. CCR 134 (2020)

Die Porosität und Porenstruktur der klinkerreduzierten Mörtel und Spritzbetone üben einen Einfluss auf die Permeabilität und Dauerhaftigkeit aus: Trockenspritzbetone zeigen insgesamt eine höhere Anzahl an relativ großen Poren als Nassspritzbetone. Kombinationen verschiedener Zusatzstoffe sind vorteilhaft für die Herstellung von Nassspritzbetonen mit optimierten Porenstrukturen. Die Zugabe von Erstarrungsbeschleunigern verursacht eine systematische Zunahme des Porenvolumens und eine gröbere Porenstruktur bei gespritzten Leimen und Spritzbetonen (Abb. 18).



**Abbildung 18:** li) Einfluss der Beschleunigermenge auf die Porendurchmessergröße, re) Vergleichende Darstellung der kritischen Porendurchmessergrößen von Proben aus GSV Nass, GSV Trocken, Minishot und Handmischungen. Bilder aus Steindl et al. In Vorbereitung

Anhand von umfangreichen Laboruntersuchungen wurden die Unterschiede bei der Hydratation von Spritz-Bindemittel (SPM; Bindemittel für Trockenspritzbeton) und mit auf Aluminium Sulfat basierten Zusatzmittel beschleunigten Systemen untersucht (Abb. 19). Im Falle von SPM ist eine schnelle C<sub>3</sub>A-Auflösung und die Bildung von Karbonat-AFm-Phasen für die frühe Festigkeitsentwicklung hauptverantwortlich. Die dabei entstehenden hohen Al-Konzentrationen in der Porenlösung verzögern jedoch eine rasche C<sub>3</sub>S Reaktion über mehrere Stunden. Im Gegensatz dazu werden bei Nassspritzbeton, beschleunigt mit Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>, große Mengen an Ca aus der Porenlösung durch Ettringitbildung entfernt. Dies führt zu einer schnelleren C<sub>3</sub>S Reaktion und zu reduzierten Portlanditgehalten im Verlaufe der Hydratation. Die geringere Porosität von Spritzbeton mit Nass-Mischgut führt auch zu einer höheren Druckfestigkeit im Vergleich zu Spritzbeton mit Trocken-Mischgut.



**Abbildung 19: Phasenbildung und -auflösung sowie berechnete Porosität über die Zeit bis 28d; li) Trocken-Mischgut ; re) Nass-Mischgut. Bilder aus Briendl et al. In Vorbereitung**

**AP 8: Prüfverfahren**

Methodenentwicklungen und Optimierungen von Prüfmethode wurden weitgehend abgeschlossen und in den Arbeitspaketen 6 und 7 eingesetzt. Besonders erwähnenswert im 4 FJ ist die neue Methodenkombination, welche zur Aufdeckung der Lagigkeit im Spritzbeton eingesetzt werden kann. Wie detailliert bei den GSVs Zams III, Hagerbach und Zentrum am Berg II beschrieben, werden folgende Tools und Analytik herangezogen:

- Beimischungen eines Tracers in den Erstarrungsbeschleuniger. Im Festbeton kann damit die Beschleunigerverteilung mittels Epi-Fluoreszenzmikroskopie sichtbar gemacht werden.
- Im Zuge der GSV wurden Druckdaten zeitaufgelöst aufgezeichnet und mit Zeitlupenvideos korreliert.
- Chemische und Mineralogische Inhomogenitäten wurden mittels Elektronenstrahlmikrosonde,  $\mu$ -XRF und XRD detektiert.
- Zusätzlich kann noch die Karbonatisierungstiefe zur Sichtbarmachung von Lagen verwendet werden.

Diese methodische Weiterentwicklung wird für das zukünftige ambitionierte Ziel „lagenfreien Spritzbeton“ zu erzeugen, anwendbar sein.

**AP 9: Empfehlungen für die Praxis und ggf. Anpassungsvorschläge für Normen und Richtlinien**

3 Arbeitskreise arbeiteten an dem Thema Empfehlungen für die Praxis. Dabei wurden die Ergebnisse des Forschungsvorhabens mit den industriellen Partnern diskutiert und eine Empfehlung für baupraktische Anwendungen erstellt. Dadurch werden die industriellen Partner mit den Ergebnissen vertraut, die jungen Forscher lernen die verschiedenen Probleme bei der Umsetzung kennen. Diesem Endbericht beigelegt ist der Bericht Empfehlungen für die Praxis. Dieser Bericht kann für die Überarbeitung der öbv Richtlinie Spritzbeton herangezogen werden.

**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?

Seitens der Österreichischen Bautechnik Veranstaltungs GmbH wurde das Projektteam zusätzlich durch Jürgen Silberknoll unterstützt. Dies betraf einerseits die Unterstützung der Projektleitung und andererseits das Arbeitspaket 9 – Empfehlungen für die Praxis. Dies war insofern relevant und notwendig, da er in seiner Funktion als Referent für Forschung & Fachausschüsse auch eine zukünftige Überarbeitung zugehöriger Regelwerke betreuen wird.

Die Zielsetzungen und die förderbaren Gesamtkosten blieben dadurch unverändert. Es hat sich daraus lediglich eine geringfügige Umverteilung von den Drittkosten zu den Personalkosten ergeben.

#### 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?

Die Ergebnisse der vorliegenden Untersuchungen sind sehr relevant für den Praxiseinsatz von Spritzbeton im Tunnelbau. Deshalb wurden die Ergebnisse in regelmäßigen Sitzungen mit der öbv den industriellen Partnern präsentiert und der Fachwelt durch Publikationen bekannt gemacht. Als Beispiele seien hier genannt:

- der Effekt der Frühfestigkeitssteigerung durch Feinstkalzit und die damit verbundenen Möglichkeiten für den erhöhten Einsatz von umweltfreundlichen und für die Dauerhaftigkeit förderlichen Zusatzstoffe, mögliche Zementreduktion und Dauerhaftigkeitserhöhung,
- die Auswirkung unterschiedlicher Verzögerertypen auf die technologischen Eigenschaften und
- die Visualisierung von Lagenbildungen im aufgetragenen Spritzbeton.

Die neuen Erkenntnisse wurden auch in Arbeitskreisen für „Empfehlungen für die Praxis“ pragmatisch zur Anwendung in Planung und Bauausführung aufbereitet.

Durch das Projekt sind auch im 4. Forschungsjahr wieder zahlreiche Publikationen, teilweise in den weltweit führenden Fachzeitschriften, erschienen. Zusammengefasst wurden im 4. FJ 3 Studentische Abschlussarbeiten fertiggestellt, 6 befinden sich in Bearbeitung. 13 wissenschaftliche Artikel wurden publiziert, 5 befinden sich im Druck und 5 weitere sind in Vorbereitung. Außerdem wurden seitens der Universitäten jeweils Pressemitteilungen abgesetzt, welche von einer Vielzahl von Medien aufgegriffen wurden. Eine detaillierte Aufstellung der Abschlussarbeiten und Publikationen im 4 FJ und über die gesamte Projektzeit ist dem beigelegten Bericht Dissemination und Publikationen zu entnehmen.

Das interdisziplinäre Team schlägt vor, neue Forschungen auf folgenden Gebieten einzuleiten, um für die Baubranche weitere Vorteile zu erzielen:

- Neue alternative Ausgangsstoffe zu untersuchen und bereit zu stellen
- Revolutionär verbesserten Spritzbetonauftrag (ohne Lagenbildung) durch verbesserte Maschinenteknik zu ermöglichen
- Spritzbeton als dauerhaften Konstruktionswerkstoff in neuen Anwendungen (z.B. permanente, wasserdichte Schalen) einsetzen und für diese Anwendungen zu optimieren
- Ein „life-cycle decision making tool“ bereitzustellen, um Umweltauswirkungen durch zukunftsweisende Planung zu minimieren

Dazu sind neue Forschungsanträge geplant.

#### 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.

Abgesehen von der am 15.01.2020 übermittelten Anpassung der InKind-Leistungen (darüber hinaus gehende InKind-Leistungen wurden zusätzlich zur Verfügung gestellt) als Drittkosten und der geringfügigen Umverteilung von den Drittkosten zu den Personalkosten (wie auch in Punkt 3 beschrieben) kam es zu keinen Abweichungen.

## 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

Der hier vorgegebene Umfang des Berichtes ist für Detailergebnisse zu gering, daher werden folgende Detailberichte und 4 ausgewählte Publikationen beigelegt:

- Bericht Zams III
- Bericht KAT3 update
- Bericht Hagerbach
- Bericht ZaB 2
- Bericht Dauerhaftigkeit inklusive Porosität
- Bericht Verarbeitung
- Bericht Hydratation
- Bericht Nachhaltigkeit
- Bericht Dissemination/Publicationen
- Bericht Empfehlungen für die Praxis
- Dissertation Steindl
  
- Briendl et al.: Early hydration of cementitious systems accelerated by aluminium sulphate: Effect of fine limestone. Cement and Concrete Research 134 (2020) 106069.
- Steindl et al.: Sulfate durability and leaching behaviour of dry- and wet-mix shotcrete mixes. Cement and Concrete Research 137 (2020) 106180.
- Saade et al.: (Sprayed) Concrete production in Life Cycle Assessments: a systematic literature review. The International Journal of Life Cycle Assessment 25 (2020) 188-207.
- Sakoparnig et al.: Saxer, A.; Thumann, M.; Mittermayr, F.: Durability of clinker reduced shotcrete: Ca<sup>2+</sup> leaching, sintering, carbonation & chloride penetration. Materials and Structures (2021) 54:78.

Sämtliche Berichte sind im internen Bereich auf der öbv Webseite für die Industriepartner herunterladbar. Bei Bedarf kann die Weitergabe von Publikationen direkt beim Forschungsteam angefragt werden.