

## Sprayed Optimised Concrete

<b>1. Zielerreichung und Projektstatus .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum .....</b>	<b>1</b>
<b>2.1. Projektleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2.2. wissenschaftliche Leitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3. Nachhaltigkeit .....</b>	<b>3</b>
<b>2.4. Ausgangsstoffe und Bindemittelwirkungsweise .....</b>	<b>4</b>
<b>2.5. Betontechnologie .....</b>	<b>9</b>
<b>2.6. Spritztechnologie, Auftrag, Verarbeitbarkeit .....</b>	<b>13</b>
<b>2.7. Prüfverfahren und Festbetoneigenschaften .....</b>	<b>16</b>
<b>3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten .....</b>	<b>16</b>
<b>4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit .....</b>	<b>16</b>

### 1. Zielerreichung und Projektstatus

Die Zielsetzung des Forschungsprojekt SpOC (Sprayed Optimised Concrete) ist es, eine CO<sub>2</sub>-arme, dauerhafte und effiziente Spritzbeton-Bauweise zu erforschen und anhand von großtechnischen Versuchen zu demonstrieren. Um die Spritzbetontechnologie für die Herausforderungen der heutigen Zeit (Ressourcen- und Energieknappheit, Treibhausproblematik, steigende Kosten) zu wappnen, sollen die Ergebnisse im Rahmen des Collective Research Programms der gesamten Branche (Bauherren, Planer, Produzenten) zugutekommen.

Im zweiten Forschungsjahr wurden entscheidende Erkenntnisse bezüglich der Charakterisierung und des Einsatzes alternativer, ressourcensparender Ausgangsstoffe, der Auswirkungen von Faserverstärkung und Zusatzmitteln auf die Mikrostruktur, sowie der Auswirkungen auf die Beständigkeit und Dauerhaftigkeit des Baumaterials erzielt, und erneut Versuche vom Labor- bis zum Großversuchsmaßstab durchgeführt. Darüber hinaus wurden Untersuchungen und Auswertungen zum besseren Verständnis des Pump- und Spritzvorgangs und zum Einsatz von Faserverstärkung fortgesetzt. Die wichtigsten Erkenntnisse zusammengefasst:

1. Umweltfreundliche innovative Zementzusatzstoffe wurden für den Einsatz im Spritzbeton untersucht und deren (positive) Auswirkungen auf die Spritzbetoneigenschaften (erhöhte Beständigkeit, Frühfestigkeit, reduzierte CO<sub>2</sub>-Emissionen) festgestellt. Dabei wurde auch die Gewinnung dieser Zusatzstoffe aus lokal in Österreich verfügbaren Quellen (z.B. Tone, Eisenkarbonate) und nötige Weiterbehandlungsschritte (Kalzinieren, Mahlen) erfolgreich bis zum Prototypen-Maßstab demonstriert.
2. Die Auswirkungen dieser neuen Zementzusatzstoffe, der Optimierung von Packungsdichte und Kornsummenkurven, sowie des Einsatzes von abgestimmten Zusatzmitteln auf die Verarbeitbarkeit sowie die Mikrostruktur wurden analysiert sowie die Spritzbetonrezepturen entsprechend angepasst. Darüber hinaus wurde auch die Bewertung der Leistungsfähigkeit sowie der Umweltbilanz von Spritzbetonrezepturen vom Labor- bis zum Großversuchsmaßstab vorgenommen.
3. Basierend auf dem umfangreichen Prüfprogramm des ersten Forschungsjahres wurden Untersuchungen und Auswertungen von Faserspritzbeton (Festbetoneigenschaften, Mikrostruktur) sowie die Erforschung der Spritzbeton-Lagigkeit durch Förderstompulsion fortgesetzt und so neue Erkenntnisse über die Voraussetzungen für dauerhafteren, dichten Spritzbeton gewonnen.

### 2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum

#### 2.1. Projektleitung

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Neben der Vertretung gegenüber der FFG wurden während der Projektlaufzeit die terminliche und kaufmännische Projektkoordination, die Organisation von Projektmeetings, die Koordination der Kommunikation zwischen den ProjektpartnerInnen, die Partnerkommunikation (Wirtschaft und Wissenschaft) sowie das Vertrags- und Kostenmanagement abgewickelt.

Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden.

Es gab keine wesentlichen Abweichungen oder Veränderungen.

## **2.2. wissenschaftliche Leitung**

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Aufgrund der umfangreichen Forschungsarbeiten, wie erneut zweier Großspritzversuche sowie einer großen Zahl von Laborstudien, werden im Folgenden in diesem Bericht nur eine Übersicht der durchgeführten Arbeiten und einige wenige besonders interessante Ergebnisse präsentiert. Detaillierte Ergebnisse und deren Diskussion sind in Einzelberichten und in Fachpublikationen aufgearbeitet.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets beträgt 100%. Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan durchgeführt werden, es gab keine wesentlichen Abweichungen. Durch die Aufnahme der Bauunternehmen Implenia Österreich GmbH und Marti Österreich GmbH wurde das Konsortium im 2. Forschungsjahr weiter verstärkt und die Branche noch breiter abgedeckt.

Die Kommunikation der wissenschaftlichen Partner wird durch regelmäßige Treffen in kleineren Arbeitsgruppen sowie einem monatlichen Gesamtmeeting abgewickelt. Neben diesen Treffen und weiteren kleineren Diskussionsrunden und Besprechungen mit Industriepartnern wurden folgende Treffen abgehalten:

Besprechung mit Schleibinger bezüglich Sliper-Prüfgerät, online, 15.01.2024

Besprechung mit Omya, online, 25.01.2024

Planung Großspritzversuche, online, 27.02. 2024, 12.03.2024 sowie 16.05.2024

Packungsdichteoptimierung, Graz, 28.02.2024

Mössbauer-Spektroskopie in Salzburg, 15.03.2024

Zwischensitzung, Zams, 19.06.2024

Jahresabschlussitzung, Wien, 25.11.2024

Workshop der wissenschaftlichen Partner, 25.-26.11.2024

Außerdem wurden 2 Newsletter zur Information an alle industriellen Partner versandt. Über spezifische Versuchsdurchführungen wurden und werden Berichte, Konferenzbeiträge und Fachjournal-Artikel verfasst und studentische Abschlussarbeiten erstellt. Die Wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse wurde weiter vorangetrieben und die erzielten Erkenntnisse wurden bzw. werden in folgenden Veröffentlichungen aufbereitet:

Konferenzbeiträge:

2.  $\mu$ CT-Symposium der TU Graz, 14.02.2024

- Soares, A.C.M., et al.: Influence of setting accelerator and spraying method on the porosity of shotcrete

RILEM Spring Convention, 07.-12.04.2024, Mailand, Italien

- Pons Piñeyro, M., et al.: Siderite's ( $\text{FeCO}_3$ ) reactivity in cementitious systems and its potential use as a future SCM

ILCCC 2025, London, UK

- Pons Piñeyro, M., et al.: Early Hydration Analysis of Siderite ( $\text{FeCO}_3$ )-Cement Systems

Grazer Betonkolloquium, 12.-13.09.2024, Graz, Österreich

- Soares, A.C.M., et al.: Influence of the Spraying Process on Air Entrainment in Shotcrete

Spritzbetontagung, 23.-24.01.2025, Alpbach, Österreich

- Pons Piñeyro, M., et al.: From the laboratory to large scale: Siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) and calcined clays as supplementary cementitious materials for sprayed concrete applications
- Sakoparnig, M., et al.: Pulsationsgrad - Kennzahl zur Abschätzung von maschinenbedingter Lagenbildung im Spritzbeton
- Soares, A.C.M., et al.:  $\text{CO}_2$ -reduced fiber sprayed concrete for permanent tunnel liners (Part 2): A Rheological investigation
- Juhart, J., et al.:  $\text{CO}_2$ -reduzierter Faserspritzbeton für permanente Tunnelinnenschalen (Teil 1): Konzept und erste Testergebnisse

RILEM Spring Convention 2025 and Conference on durability of infrastructures, 22.-28.03.2025, Mendrisio, Schweiz

- Soares, A.C.M., et al.: Shotcrete: The Spraying Process influences on the Air content

Journalpublikationen in Ausarbeitung:

- Mittermayr, F., et al.: Exploring Natural Siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) as a Novel Supplementary Cementitious Material
- Pons Piñeyro, M., et al.: Sulfate Resistance of Siderite ( $\text{FeCO}_3$ )-Cement Systems
- Soares, A.C.M., et al.: On the benefit of artificial air entrainment in various fiber-reinforced concretes for shotcrete application (Arbeitstitel)
- Pons Piñeyro, M., et al.: Sulfate Resistance of Siderite ( $\text{FeCO}_3$ )-Cement Systems (Arbeitstitel)
- Pons Piñeyro, M., et al.: Influence of Siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) and Ankerite ( $\text{CaFe}(\text{CO}_3)_2$ )-rich waste material on  $\text{Ca}^{2+}$ -leaching and carbonation durability of cementitious systems (Arbeitstitel)

Studentische Abschlussarbeiten

- Max Eckhart: Schwinden von Faserspritzbeton für permanente Tunnelinnenschalen (Masterarbeit, Technische Universität Graz, 2024)

Dissertationen in Ausarbeitung

- Sakoparnig, Marlene
- Pons Piñeyro, Marjorie
- Soares Cezar, Augusto Maciel

### 2.3. Nachhaltigkeit

**Fertigstellungsgrad:** 90%

Für die Bewertung der im Projekt entwickelten Spritzbetonrezepturen wurde zunächst eine Datenerhebung bezüglich der verwendeten Materiale durchgeführt. Hierfür war auch die Zusammenarbeit mit den anderen Arbeitspaketen (4-7) maßgeblich, um Materialkenngrößen und Leistungsfähigkeitsdaten der Rezepturen abzurufen. Basierend auf diesen Kenngrößen wurden danach Lebenszyklusbewertungen für die ausgeführten Spritzbetonrezepturen durchgeführt (z.B. Rezepturen des Großversuchs Zams IV, siehe Abbildung 2.3.1). Weitere Kenngrößen und Daten werden nach wie vor durch weitergeführte Prüfungen erhoben, weshalb die Lebenszyklusbewertungen noch nicht abgeschlossen werden konnten. Die

Fertigstellung der geplanten Arbeiten liegt daher derzeit bei 90%, was durch vermehrten Ressourceneinsatz im 3. Forschungsjahr ausgeglichen werden kann.

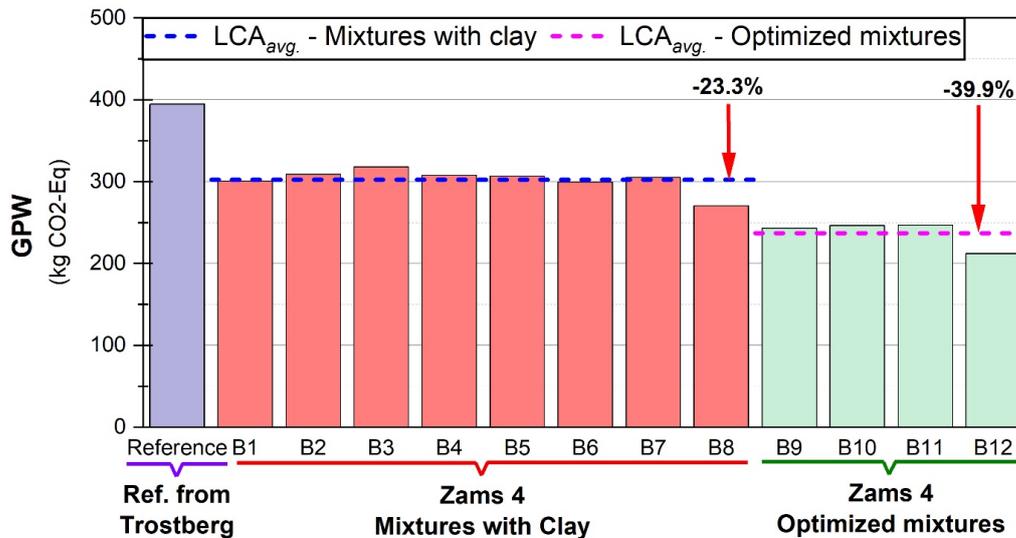


Abbildung 2.3.1: LCA-Bewertung der in den Großspritzversuchen in Trostberg bzw. Zams IV ausgeführten Spritzbetonrezepturen. Durch die Verwendung CO<sub>2</sub>-effizienter Bindemittel mit neuen Ausgangsstoffen (B1-B8) war bereits eine deutliche Reduktion des Global Warming Potentials (GWP) möglich. Durch die Optimierung der Packungsdichte und eine weitere Reduktion des Bindemittelgehalts konnte dieses GWP in den Rezepturen B

Darüber hinaus wurde die Notwendigkeit identifiziert, existierende Datenbanken um Daten für neue Betonbestandteile (z.B. Zusatzstoffe wie kalzinierte Tone oder Siderit, neuartige Gesteinskörnungen und Zusatzmittel, sowie Fasern) zu ergänzen. Aktuell gibt es für viele dieser innovativen Stoffe, die noch nicht am Markt verfügbar sind, noch keine Produktbewertungen (z.B. in Form von Umweltdeklarationen wie EPDs).

#### 2.4. Ausgangsstoffe und Bindemittelwirkungsweise

**Fertigstellungsgrad:** 100%

In diesem Arbeitspaket wurden die Eigenschaften neuer Zusatzstoffe wie Siderit, Ankerit und getemperter Tone und deren Reaktionsmechanismen in zementösen Mischungen untersucht. Der Fertigstellungsgrad der für das 2. Forschungsjahr geplanten Arbeiten liegt bei 100%. Durch die schlechte Verfügbarkeit kalziniertes Tone mussten Planungsschritte adaptiert werden, was sich letztendlich nicht in wesentlichen Abweichungen niederschlug, aber für das 3. Forschungsjahr speziell berücksichtigt werden wird.

Bereits in früheren Projekten konnten erste Hinweise für die Reaktionsmechanismen von Siderit und Ankerit (Eisen- bzw. Eisen-Calcium-Karbonat) gesammelt werden. Im Arbeitspaket wurde nun die Reaktion und Bindemittelleignung dieser Stoffe weitergehend untersucht. Die Materialien wurden durch den Projektpartner VA Erzberg zur Verfügung gestellt, an der TU Graz im Labormaßstab auf unterschiedliche Feinheiten gemahlen und chemisch-mineralogisch-physikalisch untersucht. Im zweiten Forschungsjahr wurde neben einem Fokus auf die Mechanismen während der frühen und späten Hydratation auch die Auswirkungen von Sideritzugabe auf die Dauerhaftigkeit genauer untersucht. Eine Publikation zu den Reaktionsmechanismen von Siderit in zementösen Systemen ist bereits ausgearbeitet und wird demnächst eingereicht.

Beispielsweise wurde die Auswirkung der Mahlfeinheit verschiedener Sideritmehle auf das Erhärtungsverhalten von Mörteln mit 25% Siderit im Bindemittel systematisch untersucht (Abbildung 2.4.1). Dabei wurde festgestellt, dass insbesondere hohe Feinheiten mit Blainewerten >3500 deutlich negative Auswirkungen auf die frühe Druckfestigkeit haben. Demgegenüber wurde die Spätfestigkeit von

verschiedenen Siderit-Feinheitsgraden nicht signifikant beeinflusst. Die Hydratationsreaktionen wurden darüber hinaus auch mittels Kalorimetrie, Röntgendiffraktometrie und Mössbauer-Spektroskopie untersucht.

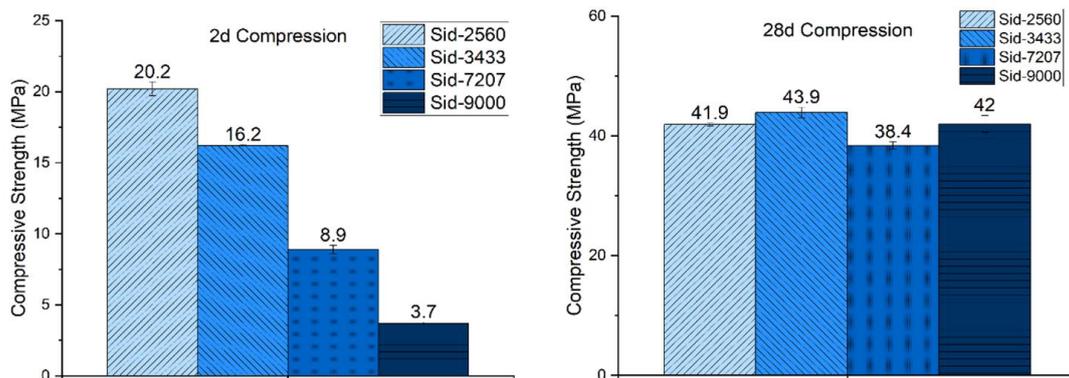


Abbildung 2.4.1: Druckfestigkeiten von Mörtelproben mit 25% Siderit unterschiedlicher Feinheit nach 2 und 28 Tagen.

Bezüglich der Dauerhaftigkeit wurden positive Auswirkungen der Sideritzugabe auf die Sulfatbeständigkeit und das Ca-Auslaugverhalten festgestellt. Derzeit werden zwei Publikationen mit den erzielten Ergebnissen bearbeitet. Beispielsweise wurde in einer Prüferie zur Sulfatlängenänderung nach SIA 262-1 selbst nach doppelter Prüfzeit keine problematische Sulfatdehnung von siderithaltigen Mörteln festgestellt, während Mörtel mit inerten oder ohne Zusatzstoffe nicht sulfatbeständig waren und innerhalb von 84 bis 152 Tagen zerstört wurden.

Während im ersten Forschungsjahr bereits erste Erkenntnisse zur Verwendung von kalzinierten Tonen im Spritzbeton gemacht und u.a. deutliche Unterschiede in der Wirkungsweise aufgrund der Beschleunigerzugabe festgestellt wurden, war im zweiten Forschungsjahr die Bereitstellung, Charakterisierung, Aufbereitung und bindemitteltechnische Untersuchung verschiedener kalzinierten Tone und ihr Einsatz im Großmaßstab eine zentrale Forschungsaufgabe. Beispielsweise wurden die Auswirkungen dreier ausgewählter kalzinierten Tone auf die Verarbeitbarkeit und Druckfestigkeit, auch in Vorbereitung für einen Großspritzversuch, durch Zugabe von 25 M% kalzinierten Tone im Bindemittel von Mörtelprismen untersucht. Dabei wurde zunächst der Fließmittelbedarf eruiert, der für das Erreichen eines Mörtel-Ausbreitmaßes von  $26 \pm 2$  cm nötig ist (Abbildung 2.4.2). Wie aufgrund von Abbildung 2.4.2 zu erwarten ist, nahm die nötige Fließmitteldosierung mit steigender Brenntemperatur und damit sinkender spezifischer Oberfläche des Tons ab. Allerdings ist auch unterschiedliches Verhalten der 3 Tone bei gleicher Brenntemperatur feststellbar. Die Druckfestigkeiten der resultierenden beschleunigten Mörtel mit vergleichbarer Verarbeitbarkeit (Abbildung 2.4.2) unterschieden sich allerdings stark von Mörtel ohne Fließmittelzugabe. Da der Einfluss der spezifischen Oberfläche durch die Fließmittelzugabe reduziert wurde, konnte kein eindeutiger Zusammenhang zwischen Festigkeit und Oberfläche mehr festgestellt werden. Dies lässt darauf schließen, dass andere Faktoren, wie die chemische Zusammensetzung und Reaktivität der Tone, eine weitere wesentliche Rolle auf die Mikrostruktur und damit die Festigkeit spielen. Allerdings konnte auch hier festgestellt werden, dass alle Mörtel mit Ton im Bindemittel eine höhere 6h-Festigkeit als die reine Zement-Referenz erzielten, was den positiven Einfluss kalzinierten Tone in Kombination mit Erstarrungsbeschleuniger auf die Frühfestigkeit unterstreicht.

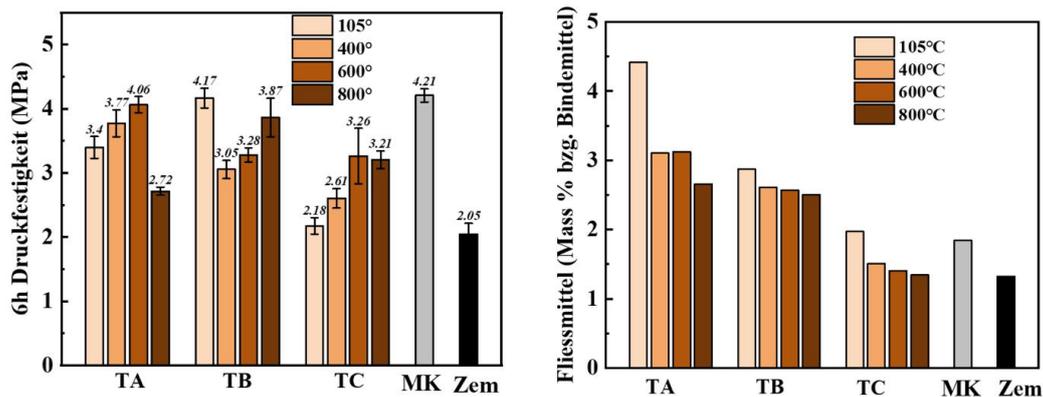


Abbildung 2.4.2: Links: 6h-Druckfestigkeiten von beschleunigten Mörtelprismen mit jeweils 25% der 3 für die Spritzversuche Zams IV untersuchten Tone im Bindemittel (bei jeweils 4 unterschiedlichen Brenntemperaturen) im Vergleich mit Metakaolin und 100% Zement. Rechts: Fließmittelbedarf der entsprechenden Rezepturen.

Die im Labor erzielten Ergebnisse für kalzinierte Tone und Siderit wurden bei der Planung der Großversuche Zams IV berücksichtigt. Aus Gründen der Verfügbarkeit wurden drei Tone ausgewählt: Ton Z2 mit Kalzinierung bei 400 °C und 600 °C, weiters Ton Z0, welcher bereits in ausreichender Menge mit Kalzinierung bei 800 °C vorlag, sowie Ton Z9 nach einer Niedrig-Temperatur-Behandlung (im Wesentlichen Trocknung) bei 150 °C, um die Beschleunigungseffekt im jungen Alter im Großversuch zu charakterisieren. Die Kalzinierung und Mahlung des Rohtons Z2 wurde in Leoben bei der Firma ARP Aufbereitung, Recycling und Prüftechnik GmbH durchgeführt. Der Siderit wurde im Auftrag der VA Erzberg an der Montanuniversität Leoben am Lehrstuhl für Aufbereitungstechnik verarbeitet.

In enger Abstimmung mit Arbeitspaket 5 Betontechnologie wurden verschiedene Spritzrezepturen für zwei Prüfserien entworfen (siehe Abbildung 2.4.3 und Abbildung 2.4.4) und die Rezepturen während der Spritzversuche vom 17. bis 21. Juni 2024 in Zams auf dem Gelände der TBA ausgeführt (siehe Abbildung 2.4.5). Details zu diesem Versuch sind insbesondere dem detaillierten Versuchsbericht zu entnehmen; im Folgenden werden die wichtigsten Prüfergebnisse beispielhaft beschrieben. Die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in der Beschreibung des nächsten Arbeitspakets (AP5) zusammengefasst.

Mischung	CEM I 52,5R	Hüttensand	Betocarb <sup>2)</sup>	Z0	Z2	Z2	Z9	Siderit
	SZV	SZV	UF	800°C	400°C	600°C	150°C	<0,1 mm
	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
B1 <sup>1)</sup>	273,0	118,0	29,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B2	273,0	84,0	0,0	0,0	0,0	0,0	63,0	0,0
B3	273,0	84,0	0,0	63,0	0,0	0,0	0,0	0,0
B4	273,0	84,0	29,4	33,6	0,0	0,0	0,0	0,0
B5	273,0	84,0	0,0	0,0	63,0	0,0	0,0	0,0
B6	273,0	84,0	0,0	0,0	0,0	63,0	0,0	0,0
B7	273,0	0,0	29,0	42,0	21,0	0,0	0,0	55,0
B8	231,0	118,0	29,0	0,0	42,0	0,0	0,0	0,0

Abbildung 2.4.3: Zusammensetzung der Rezepturen der Mischungen B1-B8 (Fokus Bindemittelentwicklung). In jedem Fall wurden ein Bindemittelgehalt von 420 kg/m<sup>3</sup> bei gleichbleibender Gesteinskörnung und Wasserzugabe vorgesehen.

Mischung	CEM I 52,5 R	Hütten- sand	Betocarb UF <sup>1)</sup>	Z2 400°C	Z2 600°C	Siderit <0,1 mm	Summe BM	Makrofüller	
								Weißjura 200µm	Siderit >0.1 mm
	kg	kg	kg	kg	kg	kg	kg/m <sup>3</sup>	kg/kg/m <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>
B9	218,9	72,2	21,9	-	-	-	313,0	190,7	218,3 <sup>2)</sup>
B10	218,9	72,2	21,9	-	-	-	312,9	190,6	210,0 <sup>3)</sup>
B11	218,9	0,0	26,3	34,6	16,4	18,5	314,6	218,3	210,0 <sup>3)</sup>
B12	200,0	0,0	24,8			76,0	300,8	267,8	194,6 <sup>2)</sup>

Abbildung 2.4.4: Zusammensetzung der Rezepturen der Mischungen B9-B12 (Fokus Korngrößenoptimierung). Im Gegensatz zu B1-B8 wurde hier die Zusammensetzung der Gesteinskörnung sowie der Bindemittelgehalt variiert.



Abbildung 2.4.5: Impression des Spritzversuchs Zams IV, im Bild das eingesetzte Spritzgeräte PM 500 zur Verfügung gestellt von Sika Services.

Bezüglich der Frühfestigkeiten liegen die 6-h-Werte im Bereich von 5 bis 9 Mpa und damit im Bereich J3 (siehe Abbildung 2.4.6). Die Mischung B1 weist einen höheren Wert von 11,3 MPa auf. Bei den 1 Tages-Werten ergibt sich für Mischung B1 ein Wert von knapp 20 MPa. Bei den übrigen Mischungen liegen die Werte im Bereich 16 bis 17 MPa. Die Mischungen B5 (Ton 2 400 °C) und B7 (ohne Hüttsand und mit Siderit) zeigen die niedrigsten Druckfestigkeiten um 13 MPa. Es sei angemerkt, dass die Spritzversuche bei sonnigen Tagen mit Lufttemperaturen von 23 bis 28 °C durchgeführt wurden. Betreffend des Versinterungspotentials (Abbildung 2.4.7) wurden positive Einflüsse durch die Zugabe von kalzinierten Tonen (insbesondere bei höheren Brenntemperaturen), die Zugabe von Siderit sowie die Packungsdichteoptimierung und Bindemittelreduktion festgestellt.

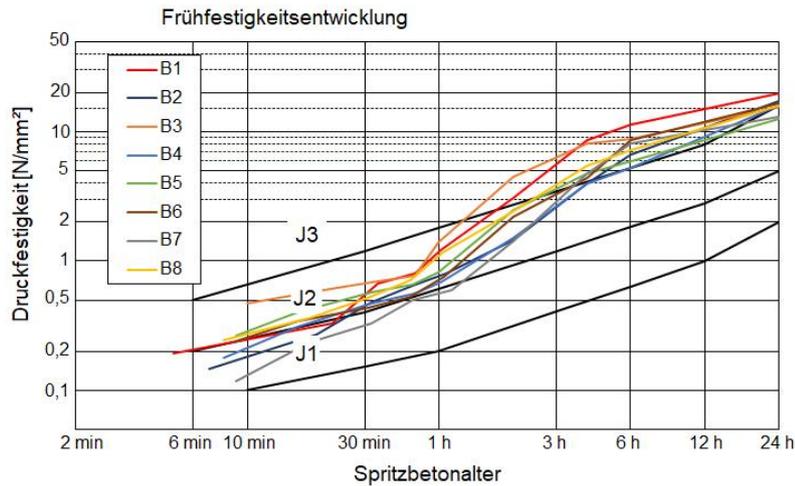


Abbildung 2.4.6: Frühfestigkeitsentwicklung der in Zams IV ausgeführten Rezepturen mit Zugabe von kalziniertem Ton und/oder Siderit.

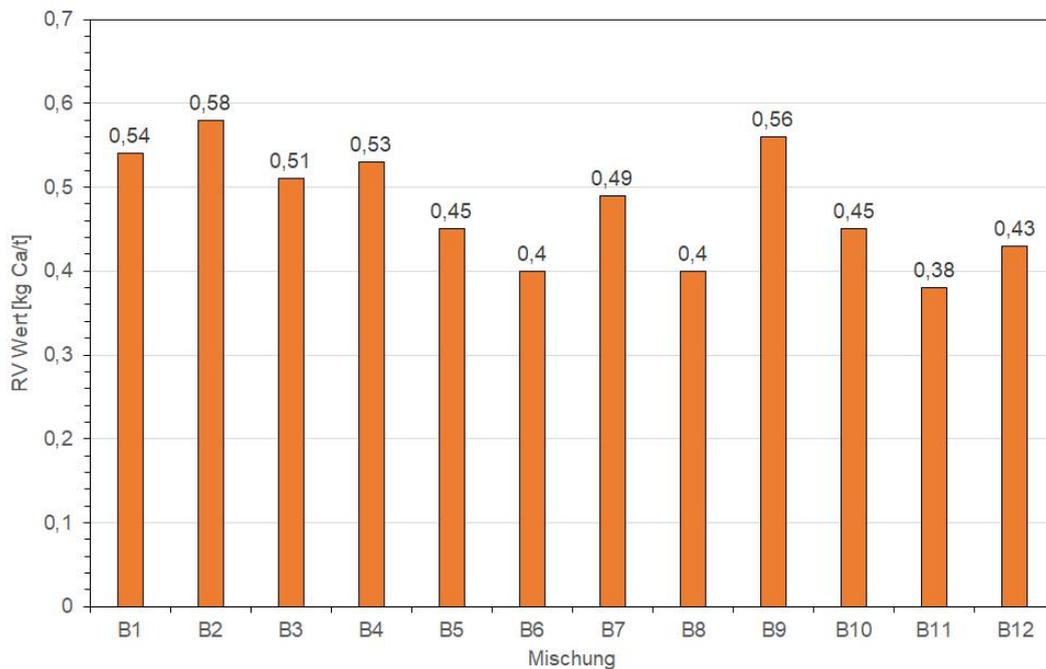


Abbildung 2.4.7: Versinterungspotentiale der in Zams IV ausgeführten Rezepturen.

Zusammenfassend ergeben sich folgende Aussagen aus den Ergebnissen der Spritzversuche Zams IV: Kalzinierte Tone sowie Siderit sind als Zusatzstoffe im Bindemittel auch bei Spritzbeton anwendbar (Ausmaß des Klinkerersatzes insgesamt bis zu CEM II/C möglich) und können Zement aber auch Hüttensand im Bindemittel ersetzen. Es können Mischungen von Tönen mit geringer bis hoher hydraulischer Reaktivität eingesetzt werden, wobei die geeignete Abstimmung der verwendeten kalzinierten Tone wichtig ist. Im Gegensatz zu feinem Siderit wirkt sich Siderit-Feinsand (>0.1mm) deutlich weniger negativ auf die Frühfestigkeit aus, kann aber trotzdem die Dauerhaftigkeit erhöhen. Die Reduktion von (i) Zementklinker im

Bindemittel und (ii) des gesamten Bindemittelgehalts im Spritzbeton als weiterer Beitrag zur CO<sub>2</sub>

Emissionsreduktion von „embodied emissions“ ist möglich, wenn die Verarbeitbarkeit (Fließvermögen) und der Wasserbedarf über die verbesserte Zusammensetzung der Gesamtsieblinie mit Makrofüllern optimiert wird. Ein solches Mix-Design weicht vom klassischen deskriptiven Betonentwurf ab, der resultierende Beton muss performancebasiert am Frisch- und Festbeton bewertet werden. Im Fall der 4 Makrofüller-optimierten Betonvarianten ergeben sich sehr unterschiedliche Beständigkeiten unter diversen Expositionen (WU, RV, XC, FTW), sodass die Einsatzbereiche und Anforderungen (Festigkeiten, Expositionsklassen) spezifisch ausgewählt werden müssen bzw. eine Gesamt-Performance-Bewertung (Betongüte & LCA über den Lebenszyklus) angewandt werden sollte.

## 2.5. Betontechnologie

**Fertigstellungsgrad:** 100%

In Vorbereitung auf die Großspritzversuche Zams IV wurden, neben umfangreichen Laborversuchen z.B. zur Wirksamkeit von Fließmitteln mit kalzinierten Tonen, auch Spritzbetonrezepturen entwickelt.

Die mehr konventionellen Mischungen (ca. 420 kg BM / m<sup>3</sup>) B1 bis B8 wurden mit dem Ziel entwickelt, den Einfluss kalzinierten Tone zu untersuchen – Details zu den Rezepturen und den erzielten Ergebnissen siehe unter AP4. Zusätzlich wurden auch Rezepturen mit optimierten Sieblinien und Wasser-zu-Mehlkorn-Verhältnissen entwickelt, um die Packungsdichte, Verarbeitbarkeit, Festigkeit und CO<sub>2</sub>-Bilanz zu optimieren. Hierfür wurden die Sieblinien der Ausgangsstoffe (Bindemittelbestandteile und Gesteinskörnungen, Beispiele siehe Abbildung 2.5.1) nach dem Ansatz von Funk-Dinger optimiert, wobei die Gesamtsieblinien aller Komponenten (z.B. auch der Feinanteil der Gesteinskörnungen) berücksichtigt wurde. Dafür nötige Randbedingungen (z.B. Zementgehalt, Zusatzstoffgehalte, Masseverhältnis von feiner zu grober Gesteinskörnung, Gesamtbindemittelgehalt, Verhältnisse von Wasser zu Gesamtmehlkorngehalt bzw. zu reaktivem Bindemittel, usw.) wurden im Vorfeld basierend auf bisherigen Erfahrungen definiert.

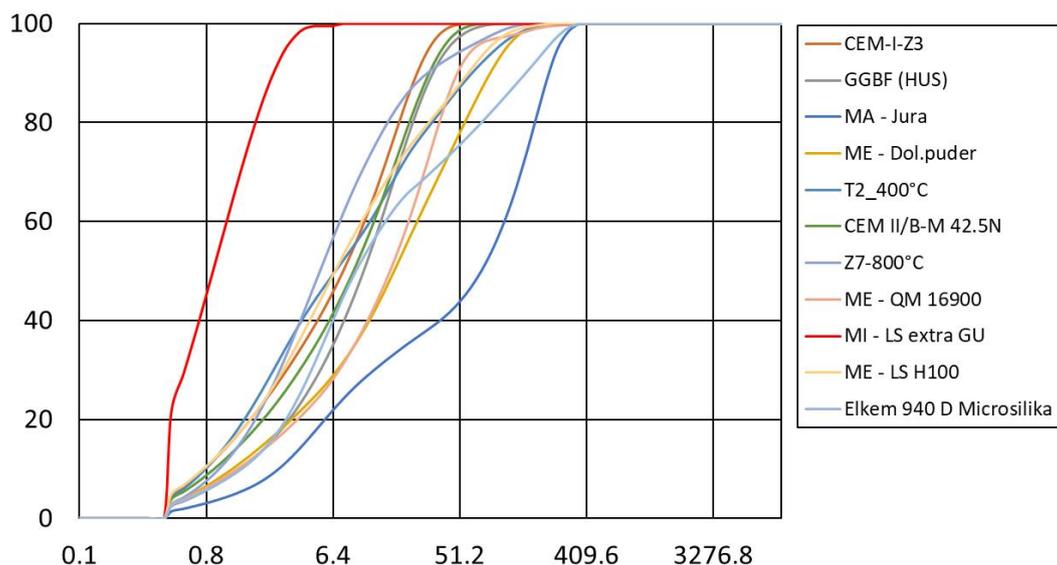


Abbildung 2.5.1: Siebkurven der eingesetzten Bindemittel-Komponenten, die für die Optimierung der Gesamtsieblinie herangezogen wurden.

Im Vorfeld sowie während des laufenden Versuchs wurden die erzielten Rezepturen auf ihre Rheologie und Verarbeitbarkeit untersucht. Dabei wurde beispielsweise der tatsächliche Wassergehalt, das Ausbreitmaß sowie Fließmaß, und der Luftgehalt der entwickelten Rezepturen untersucht (Abbildung 2.5.3).

Mittels Mikrowellentrocknung wurde der tatsächliche Wassergehalt der ausgeführten Rezepturen bestimmt und deutliche Abweichungen vom geplanten w/b-Wert, insbesondere bei den Rezepturen B9-B12, festgestellt. Dies ist vermutlich auf unterschiedliche Feuchtegehalte der Gesteinskörnung zurückzuführen.

Das Ausbreitmaß der Rezepturen wurde gemäß ÖN EN 12350-5 bestimmt, um den Richtwert von 60±5cm laut ÖBV-Richtlinie Spritzbeton zu eruieren. Obwohl mehrere Rezepturen (B2, B3, B4, B5 und B8) die Mindestanforderung von 55cm nicht erreichen konnten, waren alle Mischungen pumpbar.

Die Rheologie und Pumpbarkeit der Mischungen wurde darüberhinaus mit weiteren Prüfgeräten (z.B. Sliper-Gleitrohrreometer siehe Abbildung 2.5.2, Filterpresse, Trichterauslauf) bestimmt.

Rezeptur	Sliper-Beiwert (Fließgrenze) (10 <sup>-3</sup> bar)	a	Sliper-Beiwert (Viskosität) (10 <sup>-6</sup> bar h/m)	b
B1	0.19		2.39	
B3	0.36		7.78	
B4	1.80		3.22	
B5	2.11		3.09	
B6	1.79		3.42	
B7	-0.67		2.0	
B8	2.06		3.32	
B9	0.87		5.33	
B12	0.79		3.39	
B12w	1.54		4.1	

Abbildung 2.5.2: Ergebnisse der Rheologischen Prüfungen mittels Sliper-Gleitrohrreometer

Die Messungen des Luftgehalts war ebenso ein wichtiger Punkt während des Versuchs, da die Zugabe von Luftporenbildnern als Maßnahme zur Verarbeitbarkeitsverbesserung untersucht werden sollte. Gemäß bisherigen Erkenntnissen kann erhöhter Luftgehalt die Betonviskosität verringern und wird beim Spritzvorgang wieder weitgehend aus dem Beton entfernt. Der Luftgehalt wurde in folgenden Zuständen bestimmt: i) am Frischbeton direkt aus dem Fahrmischer entnommen, ii) an der Spritzmaschine direkt nach dem Pumpenauslass, iii) nach dem Pumpvorgang durch den Förderschlauch, d.h. also ohne Druckluft aus der Spritzdüse gepumpt, iv) gespritzt, d.h. ohne Beschleuniger aber mit Druckluft. Die wichtigsten Erkenntnisse i) typischerweise wird der Luftgehalt nach dem Pump- und Spritzvorgang auf etwa 3-5% reduziert (was auch zuvor gemachte Untersuchungen nochmal bestätigt), ii) der Pumpvorgang alleine führt nicht zu einer Reduktion des Luftgehalts, sondern typischerweise zu einer Erhöhung, die vermutlich durch die Funktionsweise der Kolbenpumpe verursacht wird, iii) im Gegensatz dazu führt der Pumpvorgang bei bezüglich der Korngrößenverteilung optimierten Mischungen nicht zu einer Erhöhung des Luftgehalts, d.h. die Fähigkeit dieser Mischungen, größere Mengen eingebrachte Luft dauerhaft zu halten, ist herabgesetzt (siehe Abbildung 2.5.3).

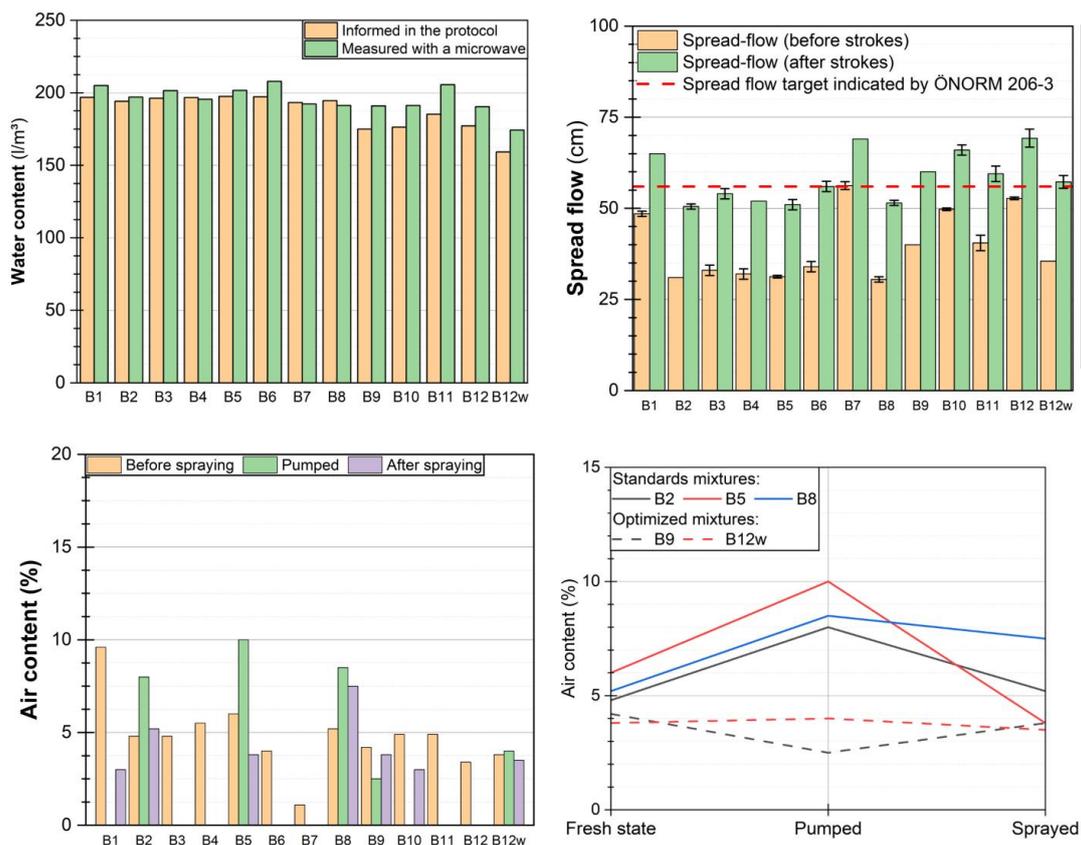


Abbildung 2.5.3: Ausbreitmaß, Fließmaß und Luftgehalt der für Zams IV entwickelten Spritzbetonrezepturen.

In einem weiteren, weniger umfangreichen Großversuch in den Einrichtungen des Hagerbach-Stollens wurden Versuchsserien zur Wirkungsweise verschiedener Zusatzmittel (Entschäumer, Tensid- und Aluminium-basierte Luftporenmittel) und deren Auswirkungen auf die Mikrostruktur und den Luftgehalt der erhärteten Betone. Hier kamen und kommen neben Luftgehaltbestimmung mittels Luftporentopf, optischer Mikroskopie (L300-Wert) und Messungen der offenen Porosität auch computertomographische Methoden zum Einsatz. Aufgrund der Komplexität dieser Methoden ( $\mu$ -CT Messungen in spezialisierten Labors der TU Graz bzw. auch am Europäischen Synchrotronbeschleuniger ESRF) sind die Untersuchungen noch nicht abgeschlossen.

Darüber hinaus wurden Auswertungen von bereits im 1. Forschungsjahr gesammelten Daten fortgesetzt. Dies betrifft einerseits die Untersuchung der Verarbeitbarkeit der Spritzbetone im 1. Großspritzversuche (Schollberg) als auch den Großspritzversuch in Trostberg bezüglich faserverstärktem Spritzbeton (Details siehe Versuchsberichte und Endbericht zum 1. Forschungsjahr). Es konnten weitere, im letzten Endbericht noch nicht verfügbare, Erkenntnisse gewonnen werden.

Bezüglich der Rheologie der beiden unterschiedlichen Spritzbetonrezepturen im GSV Schollberg kann zusammenfassend geschlossen werden:

1. Die beiden Betonrezepturen "F" und "G" zeigen vergleichbare Konsistenz und rheologisches Verhalten und sind zum Vergleich der Spritzmaschinen geeignet.
2. Bezüglich des rheologischen Verhaltens ist Rezeptur F mit einem Bindemittelgehalt von  $450\text{kg/m}^3$  und  $0,4\%$  Fließmittel steifer als Rezeptur G mit einem Bindemittelgehalt von  $450\text{kg/m}^3$  und  $0,7\text{-}0,8\%$  Fließmittel (siehe auch Abbildung 2.5.4). Eine Rezeptur ohne Zement könnte ebenso eingesetzt werden, müsste aber bezüglich ihrer rheologischen Eigenschaften noch besser an Pumpbeton angeglichen werden.

3. Ausbreitmaß, Luftgehalt, Dichte, w/b-Wert und Fließmittelgehalt wirken sich auf die mit dem Sliper-Prüfgerät festgestellten Verarbeitbarkeits-eigenschaften aus. Allerdings sind noch weitere Untersuchungen notwendig, um statistisch relevante Korrelationen erstellen zu können.

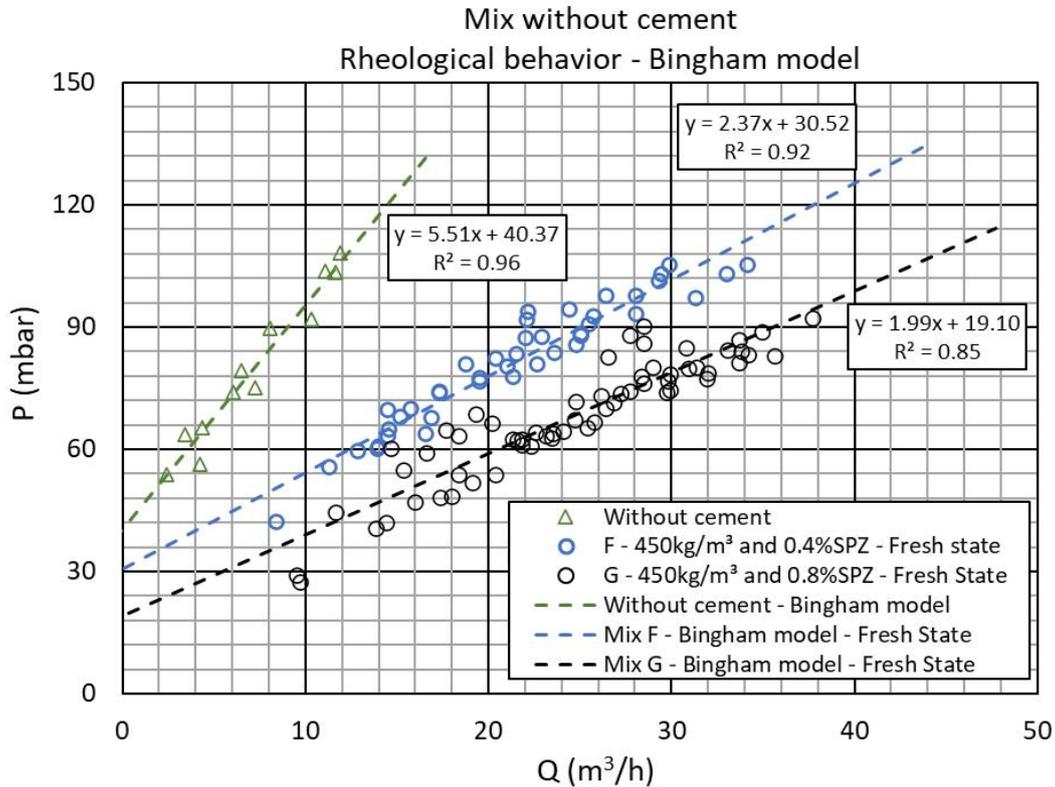


Abbildung 2.5.4: Rheologisches Verhalten der Rezepturen G und F und einer zementfreien „betonähnlichen“ Mischung, untersucht mit dem Sliper-Prüfgerät.

Weiters wurden die Erkenntnisse aus dem Großspritzversuche Trostberg weiter bearbeitet und weitere zusätzliche Schlüsse gezogen:

1. Die festgestellte gute Pumpbarkeit und damit Spritzbarkeit von Faserbeton liegt u.a. am erhöhten Gehalt von Mikro-Luftporen im Frischbeton, der durch erhöhten Lufteintrag bei Einmischung von Fasern bzw. künstlichem Luftporenbildner entsteht.
2. Freies Schwinden von Spritzbeton unterscheidet sich von freiem Schwinden von Normalbeton hauptsächlich in der Anfangsphase, was an der schnellen Festigkeitsentwicklung von beschleunigtem Spritzbeton liegt.
3. Geringe Auswirkung von Faserzugabe auf den Verlauf des (unbehinderten) Trocknungsschwindens. Bei behindertem Schwinden reduzierten Stahlfasern und Makropolymerfasern das Risiko von Trennrissen deutlich, während Mikrofasern keinen signifikanten Einfluss auf die Schwindreduktion zu haben scheinen.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspaket für das 2. Forschungsjahr beträgt 100%, da sämtliche Untersuchungen durchgeführt worden sind und die Auswertung planmäßig erfolgt bzw. im nächsten Forschungsjahr fortgesetzt werden kann. Insofern sind auch keine Abweichungen vom Arbeitsplan aufgetreten. Die in diesem Arbeitspaket gemachten Untersuchungen und Erkenntnisse sind insbesondere in den zusätzlichen detaillierten Berichten genauer aufbereitet. Aktuell wird eine Publikation zu den Themen Verarbeitbarkeit, Verhalten des Luftgehalts beim Pump- und Spritzvorgang, sowie Auswirkungen auf die Mikrostruktur vorbereitet.

## 2.6. Spritztechnologie, Auftrag, Verarbeitbarkeit

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Die Untersuchung der Pulsation und der Lagenbildung, die bereits im 1. Forschungsjahr im Hauptfokus standen, wurden auch im zweiten Forschungsjahr fortgesetzt, indem die Großversuche Hagerbach II und Zams IV der Pump- und Spritzvorgang mittels Messsensorik unterstützt. Während des Spritzvorgangs wurde der Druck an 4 Stellen der Spritzmaschine (PM 500 zur Verfügung gestellt von Sika Services) gemessen: i) Hydrauliköl-Druck der Betonpumpe, ii) Betondruck in der Förderleitung, sowie iii) Betondruck knapp vor der Spritzdüse. Aus dem Druckverlauf an der Düse wurde der Pulsationsgrad ermittelt.

In der Abbildung 2.6.1 sind die Spritzleistung und der Pulsationsgrad beim Spritzen der Mischungen von Zams IV sowie der zugehörige Hydraulik-Druck zusammengestellt.

Mischung	Spritzleistung m <sup>3</sup> /h	Pulsationsgrad Düse		Hydraulik-Druck	
		Pulsation %	stabw <sup>1)</sup> %	Druck bar	stabw <sup>1)</sup> %
B1	10,9	24	9,7	51	3,9
B2	11,6	18	11,3	82	18,2
B3	10,2	13	12,6	147	11,4
B4	10,9	35	8,9	44	2,1
B5	10,9	38	9,6	50	2,8
B6	11,0	23	11,1	65	17,4
B7	10,9	32	9,3	42	1,3
B8	10,9	19	13,0	98	12,9
B9	10,9	22	27,8	45	22
B10	10,9	15	22,0	85	15
B11	10,8	24	46,3	44	26
B12	10,8	27	10,6	49	27

Abbildung 2.6.1: Pulsationsgrad und Hydraulik-Druck; 1) Standardabweichung

Aus den Ergebnissen ist ersichtlich, dass bei vorliegender Spritzmaschine und Spritzleistung mit höherem Hydraulik-Druck (hier ab 80 bar) ein Pulsationsgrad von kleiner 20% erreicht wird.

Durch die Auswertung der Drucksensorik konnte auch der Abfall des Betondrucks über die Förderleitung bestimmt werden (Abbildung 2.6.2). Dieser Druckabfall wurde auch mit den rheologischen Kennwerten der Rezepturen verglichen (Details siehe AP5), wobei beispielsweise eine Korrelation der per Sliper-Prüfgerät gemessenen Viskosität mit dem Druckabfall in der Leitung festgestellt wurde. Die weitere Auswertung dieser Vergleichswerte ist noch nicht abgeschlossen und wird im Bericht zum Großversuch Zams IV im Detail aufbereitet.

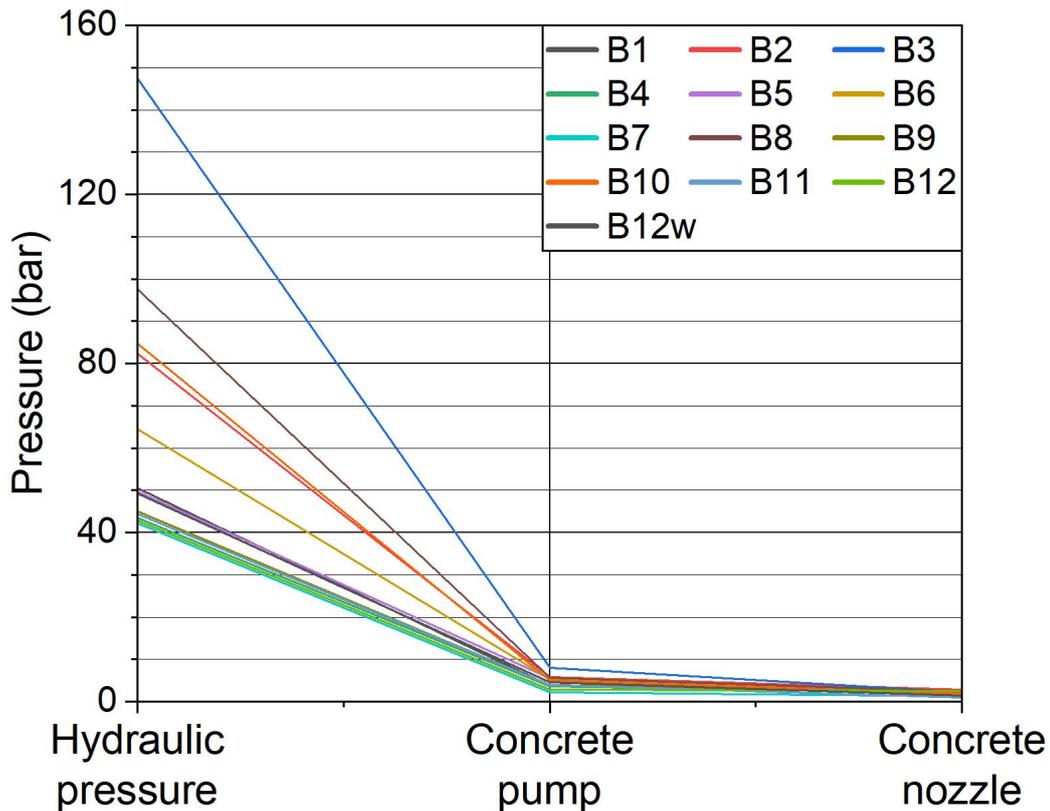


Abbildung 2.6.2: Unterschiedliche Druckmesswerte über den Verlauf der Betonförderstrecke vom Hydraulikdruck der Betonpumpe, dem Betondruck an der Pumpe bis zum Betondruck an der Düse.

Darüber hinaus wurden Untersuchungen der im 1. Forschungsjahr gewonnenen Proben fortgesetzt. Insbesondere wurden neue Methoden zur Detektion von Spritzlagen entwickelt und bewertet:

Mittels Karbonatisierung wurden Lagen an aus Spritzkisten entnommenen Bohrkernen geprüft, wofür die Bohrkern im CO<sub>2</sub>-Schrank bei 2% CO<sub>2</sub> und 65% relativer Feuchte (RH) gelagert und nach rund fünfzehn Monaten gespalten wurden, um sicher zu gehen, dass auch bei den Bohrkernen der Spritzmaschinen mit niedrigem Pulsationsgrad mögliche Lagen erkannt werden können. Bei allen Bohrkernen, unabhängig von der verwendeten Spritzmaschine, wurden Lagen, welche einen deutlich schlechteren Karbonatisierungswiderstand aufwiesen, festgestellt (Beispiele siehe Abbildung 2.6.3). Im weiteren Projektverlauf ist geplant, die Eignung der Prüfung des Karbonatisierungswiderstands als zusätzliche Methode der Lagendetektion zu untersuchen - aufgrund der geringen Probenmenge kann derzeit noch keine endgültige Aussage zur Eignung getroffen werden.

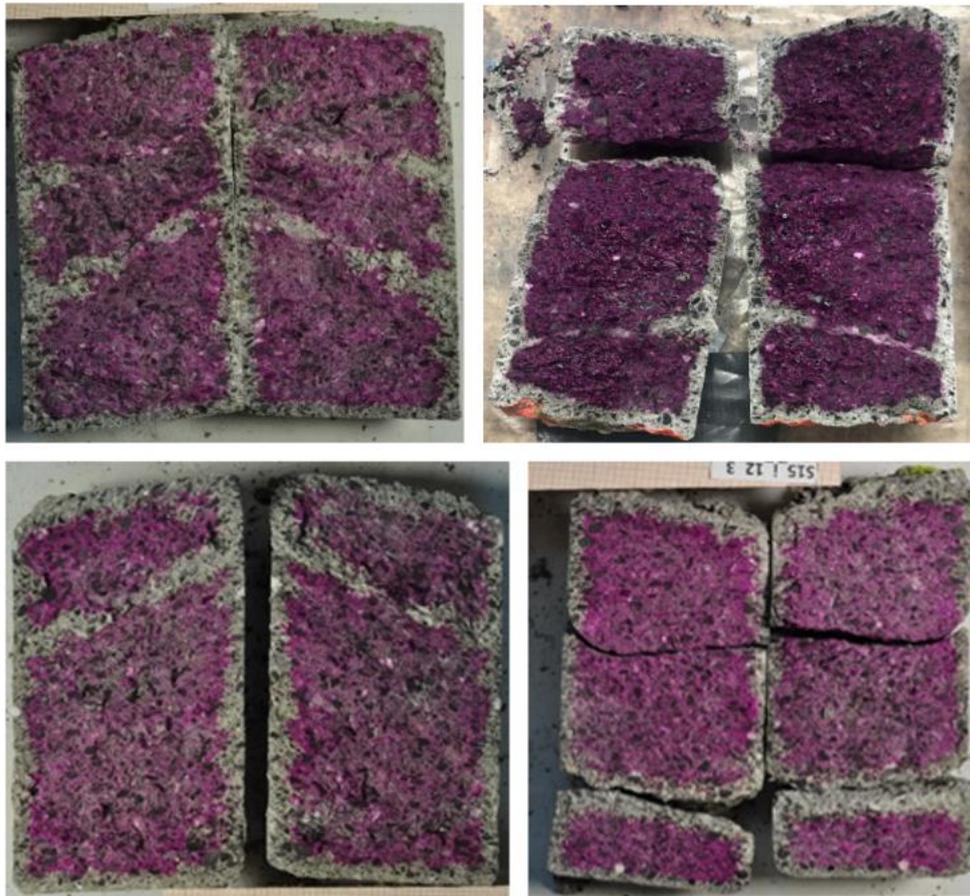


Abbildung 2.6.3: Lagendetektion mittels Karbonatisierung an 10 cm Bohrkernen

Mittels offener Porosität und über den Sulfatgehalt wurde ebenfalls versucht, Spritzlagen zu detektieren. Von jeder Spritzmaschine wurde ein langer Bohrkern untersucht und dafür in 3cm dicke Scheiben geschnitten. An diesen Scheiben wurden dann nach der Norm ÖN EN 1936 auf die offene Porosität gemessen. Im Anschluss wurde die entsprechende Scheibe halbiert und eine Hälfte zerkleinert und auf Korngröße  $<0,5$  mm gemahlen. Von der gemahlene Probe wurde 1g mit verdünnter Salzsäure aufgeschlossen und der  $SO_3$ -Gehalt photometrisch bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass optisch sichtbare Lagen beim Auftrocknen von den Bohrkernen meist mit einer erhöhten offenen Porosität einhergehen. Auch der Sulfatgehalt ist teilweise an diesen Stellen erhöht, jedoch weisen bei manchen Proben auch andere Scheiben höhere Werte auf als der Durchschnitt.

Versuchsweise wurde eine weitere Methode zur Lagendetektion getestet, die rein optisch funktioniert und mit einfachen Labormaterialien umgesetzt werden kann. Die Oberfläche der Prüflinge (Längs geschnittene Bohrkern) wurde mittels Filzstift schwarz eingefärbt und kurz im Trockenschrank bei  $55^{\circ}C$  getrocknet. Anschließend wurde grobes Kalksteinmehl aufgpinselt, welches die offenen Poren füllt und so die Lagen sichtbar macht. Um die Lagen automatisiert zu analysieren, wurde ein Computerprogramm basierend auf Python entwickelt, das auf Basis von Fotos die Lagen über die Anzahl von offenen Poren lokalisieren und deren Umfang erfassen kann. Bei einigen Proben ist eine deutliche Erhöhung der offenen Porosität bzw. des Hellkontrasts in den Lagen, bestimmt mittels Tracer und Epifluoreszenz, festgestellt worden, aber nicht alle höheren Beschleunigerkonzentrationen wurden über die Luftporosität detektiert. Als Fazit ist festzustellen, dass das entwickelte Verfahren einfach und schnell durchzuführen ist und eine grobe Einschätzung der Lagigkeit erlaubt. Allerdings ist es schwierig, allgemeingültige Parameter zu finden, d.h. es ist eine Anpassung der Auswerteparameter für jede Probe nötig.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets beträgt 100%. Die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan durchgeführt werden, es gab keine wesentlichen Abweichungen.

## **2.7. Prüfverfahren und Festbetoneigenschaften**

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Die Haupttätigkeit dieses Arbeitspakets bestand wie vorgesehen darin, Prüfungsmethodik für die anderen Arbeitspakete, insbesondere AP5 und AP6, bereitzustellen. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die erzielten Ergebnisse (Festigkeit, Dauerhaftigkeit, etc.) in den entsprechenden Kapiteln (s.o.) beschrieben. Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets beträgt 100% und die geplanten Tätigkeiten konnten ohne wesentliche Abweichungen durchgeführt werden. Im 3. Forschungsjahr werden bereits begonnene laufende Prüfungen weiter fortgeführt werden, was aber bereits eingeplant war.

## **3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten**

Durch die Ausrichtung zweier weiterer Großspritzversuche wurden erneut durch die Projekt-Industriepartner hohe Leistungen in Form von Material- und Personalbereitstellung und Dienstleistungen erbracht, die die zugesagten Inkind-Leistungen deutlich überstiegen. Durch den Wechsel von Dr. Isabel Galan vom Institut für angewandte Geowissenschaften zum Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie waren Kostenumschichtungen zwischen diesen wissenschaftlichen Partnern im Ausmaß von 30.000 € nötig, was aber aufgrund der guten interdisziplinären Zusammenarbeit keine Auswirkungen für die Finanzierung der Arbeitspakete und den Projektfortschritt hat.

## **4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit**

Durch die entwickelten beständigeren, leistungsfähigeren Spritzbetonrezepturen wird eine längere Lebensdauer mit geringerem Erhaltungsaufwand erreicht. Zudem wird eine CO<sub>2</sub>-Reduktion durch materialsparende Konstruktion ermöglicht (z.B. Einsparung einer geschalteten Ortbeton-Innenschale und geringere Spritzbeton-Schichtdicken möglich). Die CO<sub>2</sub>-Emissionen bei der Herstellung von Spritzbeton werden zusätzlich durch den Einsatz von Zementersatzstoffen reduziert. Dies liegt daran, dass die Produktion getemperter Tone im Vergleich zur Herstellung von Zementklinker deutlich weniger Energie benötigt — etwa ein Viertel des Energiebedarfs. Zudem entfallen die prozessbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Entsäuerung von Kalkstein weitgehend. Siderit als eine weitere intensiv beforschte Bindemittelkomponente bedarf generell keiner thermischen Behandlung, was den Energiebedarf und damit verbundene Emissionen noch weiter senken kann.

Die Untersuchung kalzinierter Tone als Zementzusatzstoff in der Spritzbetonherstellung eröffnet als Nebeneffekt auch neue Verwendungsmöglichkeiten für bisher ungenutzte Tone oder Tonbestandteile. Durch die Fokussierung auf regional verfügbare Rohstoffe wie Siderit sowie potenziell aufbereitete Reststoffe (z. B. siderit- oder tonreiches Haldenmaterial) kann die Nutzung vorhandener Rohstoffvorkommen optimiert und das Aufkommen zu deponierender Materialien reduziert werden.

Die konkreten Nachhaltigkeitseffekte der Forschungsarbeiten sind stark von der praktischen Umsetzung durch die Spritzbetonbranche abhängig. Durch die konsequente Umsetzung der bisherigen Forschungsergebnisse ist eine deutliche Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen von Spritzbeton erreichbar (am Beispiel des Großspritzversuchs Zams IV bis hin zur Halbierung der aktuellen CO<sub>2</sub>-Intensität, siehe hierzu und für die Quantifizierung der Effekte die beschriebenen Ergebnisse des einschlägigen Arbeitspakets 3 „Nachhaltigkeit“).