

## Sprayed Optimised Concrete

<b>1. Zielerreichung und Projektstatus .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum .....</b>	<b>2</b>
<b>2.1. Projektleitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2.2. wissenschaftliche Leitung .....</b>	<b>2</b>
<b>2.3. Nachhaltigkeit .....</b>	<b>4</b>
<b>2.4. Ausgangsstoffe und Bindemittelwirkungsweise .....</b>	<b>5</b>
<b>2.5. Betontechnologie .....</b>	<b>10</b>
<b>2.6. Spritztechnologie, Auftrag, Verarbeitbarkeit .....</b>	<b>13</b>
<b>2.7. Prüfverfahren und Festbetoneigenschaften .....</b>	<b>18</b>
<b>3. Erläuterung von wesentlichen Änderungen bei den Kosten .....</b>	<b>19</b>
<b>4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit .....</b>	<b>19</b>

### 1. Zielerreichung und Projektstatus

Im Berichtsjahr wurde das Gesamtziel des Projekts SpOC die Entwicklung einer CO<sub>2</sub>-armen, dauerhaften und effizienten Spritzbeton-Bauweise weiter konsequent verfolgt. Die im Antrag formulierten vier Schwerpunkte (neue Bindemittel/Rohstoffe, Weiterentwicklung der Spritztechnik und Qualitätssicherung, Erschließung neuer Anwendungen sowie Life-Cycle-Bewertung) haben sich als fachlich hoch relevant erwiesen und sind weiterhin gültig und realistisch. In Summe wurden die gesetzten Ziele im Berichtsjahr erreicht, was nachfolgend detaillierter beschrieben wird.

#### 1. Nutzung neuer Rohstoffe für CO<sub>2</sub>-arme Bindemittel

Die Arbeiten zu alternativen Bindemitteln wurden deutlich vertieft. Tone sowie Eisen- und Calciumcarbonate aus großteils heimischen Ressourcen wurden weiter charakterisiert und hinsichtlich Reaktivität, Dauerhaftigkeit und CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial untersucht. Durch optimierte Mischungsentwürfe konnten sowohl eine gute Verarbeitbarkeit als auch eine ausreichend hohe Frühfestigkeit bei gleichzeitig reduziertem Klinker- und CO<sub>2</sub>-Gehalt nachgewiesen werden. Damit ist das Ziel, neue rohstoffeffiziente Bindemittelooptionen für Spritzbeton zu entwickeln erreicht und die Basis für zukünftige neue Produkte in der Branche geschaffen. Ein weiterer – ursprünglich nicht geplanter – Meilenstein war der erstmalige erfolgreiche Einsatz des neuartigen, portlandzementfreien Bindemittels Celitement als Spritzbeton-Bindemittel.

#### 2. Mix-Design und Spritztechnik für faserbewehrten Spritzbeton

Ein Schwerpunkt lag auf der Optimierung des Mischungsentwurfs für faserbewehrten Spritzbeton, um zukünftig permanente Faserspritzbetonschalen ausführen zu können. Durch umfangreiche Laborversuche und großtechnische Spritzversuche konnte demonstriert werden, dass Rezepturen mit sehr hohen Fasergehalten (z.B. 160 kg/m<sup>3</sup> Stahlfasern) erfolgreich hergestellt und verarbeitet werden können. Gleichzeitig gelang es, den Klinkergehalt auf außergewöhnlich geringe 200 kg/m<sup>3</sup> zu senken, ohne Einbußen bei Spritzbarkeit und Frühfestigkeit und somit enthaltene CO<sub>2</sub>-Äquivalente zu minimieren. Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, insbesondere zur Pulsation des Förderstroms, zeigten, dass eine verbesserte Pumpbarkeit und höhere Fasergehalte nicht allein über einen erhöhten Zementgehalt, sondern vor allem durch eine optimierte Sieblinie und den gezielten Einsatz von Luftporenbildnern erreicht werden können. Dies stellt ein zentrales Highlight im Hinblick auf die Zielerreichung dar.

#### 3. Dauerhaftigkeit, Anwendungen und Umweltwirkung

Die Auswirkungen der optimierten Mischungen auf Mikrostruktur, Dichtigkeit und Dauerhaftigkeit wurden weiter untersucht. Es zeigt sich, dass Rezepturen mit hohen Fasergehalten und niedrigen Klinkergehalten eine verbesserte Leistungsfähigkeit aufweisen und neue, materialeffiziente Bauweisen (z.B. dünnere, dauerhafte Spritzbetonschalen) ermöglichen. Fasern haben dabei einen starken Einfluss auf das Treibhauspotenzial (GWP), sodass die Umweltauswirkung nur durch ganzheitlich optimierte Mischungsentwürfe (Bindemittel, Sieblinie, Fasergehalt, Zusatzmittel) zuverlässig reduziert werden kann. Die

Arbeiten zur Bewertung der Umweltbilanz und zur Ableitung von Entscheidungsgrundlagen wurden fortgeführt und liefern eine belastbare Basis für zukünftige Leitfäden.

Die gewonnenen Erkenntnisse bestätigen die ursprüngliche Zielrichtung des Projekts und zeigen, dass eine CO<sub>2</sub>-arme, dauerhafte und effiziente Spritzbeton-Bauweise technisch realisierbar ist. Herausforderungen wie z.B. die Beherrschung hoher Fasergehalte bei gleichzeitig niedrigem Klinkeranteil und kontrollierter Pulsation konnten durch die gezielte Optimierung von Mischungsentwurf und Spritztechnik weitgehend adressiert werden. Die Ziele bleiben damit nicht nur aktuell, sondern gewinnen vor dem Hintergrund von Klimaschutz und Ressourceneffizienz weiter an Bedeutung.

Basierend auf den bereits erzielten, richtungsweisenden Ergebnissen ergibt sich ein klarer Mehrwert für die Branche durch die Fortführung des Projekts in ein viertes Jahr: Im Bereich CO<sub>2</sub>-reduzierter, nachhaltiger Rohstoffe sollen die Wirkmechanismen und Kombinationen (z. B. mit feinen Kalksteinmehlen und Zusatzmitteln) vertieft untersucht, verbesserte Dauerhaftigkeitskennwerte systematisch nachgewiesen und neue Stoffe erschlossen werden. Parallel werden die optimierte Pump- und Spritztechnik unter Praxisbedingungen evaluiert und mit innovativen Rezepturen (Fasern, Luftgehalt, Siderit, Tone) für zusätzliche Einsatzzwecke geprüft; zudem ermöglicht ein weiteres Jahr die umfassende Nachhaltigkeitsbewertung unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit, Dauerhaftigkeit, sowie ökologischer und ökonomischer Faktoren. Das Vorhaben wird durch bereits erreichte technische Verbesserungen (u. a. Prüfkonzept mit Drucksensoren, Integration von Erkenntnissen zur Betonstrom-Pulsation in die neue Richtlinie Spritzbeton, hohe Fasergehalte bei geringen Bindemittelgehalten) sowie durch die fortgesetzte Unterstützung der bisherigen Industriepartner bestärkt.

## **2. Durchgeführte Arbeiten im Berichtszeitraum**

### **2.1. Projektleitung**

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Der Fertigstellungsgrad dieses Arbeitspakets beträgt 100 %, das Arbeitspaket ist somit vollständig abgeschlossen.

Im Berichtszeitraum umfasste die Projektleitung insbesondere die laufende Vertretung des Projekts gegenüber der FFG, die zeitliche und kaufmännische Gesamtkoordination, die Planung und Organisation von Projektbesprechungen sowie die Sicherstellung einer reibungslosen Kommunikation zwischen allen Projektpartner:innen. Dazu gehörten sowohl die Abstimmung zwischen wissenschaftlichen und industriellen Partnern als auch das Vertrags- und Kostenmanagement über die gesamte Projektlaufzeit.

Die vorgesehenen Arbeitsschritte konnten wie geplant umgesetzt werden; es traten keine wesentlichen Abweichungen oder Änderungen auf. Eine Anpassung der ursprünglichen Planung war daher nicht erforderlich. Personell fand der Abgang von Ing. Jürgen Silberknoll sowie die Aufnahme von Dr. Ufuk Yilmaz als neuer Forschungsreferent der ÖBV statt.

### **2.2. wissenschaftliche Leitung**

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Im Rahmen der wissenschaftlichen Leitung wurden im Berichtszeitraum umfangreiche Forschungsarbeiten koordiniert und durchgeführt. Dazu zählen unter anderem zwei weitere Großspritzversuche sowie eine große Zahl ergänzender Laboruntersuchungen. In diesem Bericht werden daher bewusst nur eine zusammenfassende Übersicht der bearbeiteten Themen und ausgewählte, besonders aussagekräftige Ergebnisse dargestellt; detaillierte Versuchsbeschreibungen, Auswertungen und Diskussionen sind in gesonderten Einzelberichten sowie in Fachpublikationen dokumentiert.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt bei 100 %. Die vorgesehenen Arbeitsschritte konnten planmäßig durchgeführt werden, es kam zu keinen wesentlichen Abweichungen, sodass die ursprüngliche Planung nicht angepasst werden musste. Im dritten Forschungsjahr zeigten weitere potentielle

Projektpartner Interesse an SpOC, und das Forschungsteam freut sich, die Aufnahme des Bauunternehmens Rombold&Gfröhler GmbH & Co KG, des Bindemittelherstellers Goerg&Schneider GmbH & Co KG, sowie der Brennerbasistunnel-Errichtungsgesellschaft BBT SE vorantreiben zu können, um die mitteleuropäische Spritzbetonbranche noch breiter abdecken zu können.

Die Abstimmung zwischen den wissenschaftlichen Partnern erfolgte über regelmäßige Treffen in kleineren Arbeitsgruppen sowie über ein monatlich stattfindendes Jour Fix. Ergänzend fanden weitere Besprechungen und Diskussionsrunden mit den Industriepartnern statt. Unter anderem wurden folgende Termine abgehalten:

- Besprechung mit MBS zu Calcined Clays (online), 29.01.2025
- Besuch und Besprechung bei Rombold & Gfröhler zu Großspritzversuchen in Ditzingen, 05.03.2025
- Planung Großspritzversuche Hagenbach 2 mit Sika (online), 13.3.2025
- Besuch und Besprechung mit ÖBB Infrastruktur AG zu Ergebnissen 2.FJ in Graz, 18.03.2025
- Besuch und Besprechung bei VA Erzberg zu Eisenkarbonaten, 05.05.2025
- Zwischensitzung 3. Forschungsjahr in Wien, 11.06.2025
- Workshop der wissenschaftlichen Partner in Wien, 11.06.2025
- Besprechung mit Omya zu Kalksteinmehl (online), 02.07.2025
- Mehrere Besprechungen zur Planung Großspritzversuche Hagenbach 2 mit Sika (online), bis 10.07.2025
- Besprechung mit Baekert zu Ergebnissen Stahlfaser Spritzbeton (online), 26.08.2025
- Besprechung mit Omya zu Kalksteinmehl (online), 27.8.2025
- Besprechung mit Georg und Schneider zu Calcined Clays (online), 27.8.2025
- Mehrere Besprechungen zur Planung Großspritzversuche Ditzingen mit Rombold & Gfröhler (online), bis 05.09.2025
- Jahresabschlussitzung 3. Forschungsjahr in Wien, 02.12.2025
- Workshop der wissenschaftlichen Partner in Wien, 02.12.2025

Zur Information und Einbindung der industriellen Partner wurden zudem ein Newsletter versendet. Parallel dazu wurden und werden zu spezifischen Versuchsdurchführungen Berichte, Konferenzbeiträge und Fachzeitschriftenartikel ausgearbeitet sowie studentische Abschlussarbeiten betreut. Die wissenschaftliche Verwertung der Projektergebnisse wurde konsequent weitergeführt; die gewonnenen Erkenntnisse fließen bzw. sollen in folgende Formate ein:

#### **Konferenzbeiträge:**

- Galan et al., MinPet 2025 Leoben: The role of siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) in cementitious systems
- Galan et al., ICSBM 2025 Eindhoven: Siderite in cement mixes: impact on hydration and durability properties
- Pons Pineyro et. al, MinPet 2025 Leoben: Mössbauer Spectroscopy for identification of Fe-phases in Siderite ( $\text{FeCO}_3$ )-cement systems
- Mittermayr, F., et al., MinPet 2025 Leoben: Applied mineralogy in construction: toward greener building materials
- Pons Piñeyro, M., et al., Spritzbetontagung 2025, Alpbach: 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., Spritzbetontagung 2025, Alpbach: Pulsationsgrad - Kennzahl zur Abschätzung von maschinenbedingter Lagenbildung im Spritzbeton
- Soares, A.C.M., et al., Spritzbetontagung 2025, Alpbach:  $\text{CO}_2$ -reduced fiber sprayed concrete for permanent tunnel liners (Part 2): A Rheological investigation
- Juhart, J., et al., Spritzbetontagung 2025, Alpbach:  $\text{CO}_2$ -reduzierter Faserspritzbeton für permanente Tunnelinnenschalen (Teil 1): Konzept und erste Testergebnisse
- Soares, A.C.M., et al., RILEM Spring Convention 2025 and Conference on durability of infrastructures, Mendrisio, Schweiz

#### **Publikationen in Fachzeitschriften:**

- Mittermayr, F., et al.: Exploring Natural Siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) as a Novel Supplementary Cementitious Material in Cement and Concrete Research
- Pons Pineyro, M., et. al: How siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) enhances the sulfate resistance of cementitious systems in Cement and Concrete Research
- Wang et al. Utilizing calcined clays in shotcrete to improve early strength: physical and chemical effects (eingereicht)
- Soares, A.C.M., et al.: Air-Entrained Shotcrete: Effects of Pumping and Spraying (Einreichung in Vorbereitung)
- Pons Pineyro, M., et. al: Influence of iron carbonates on accelerated cementitious systems: Durability, mechanical properties, and microstructure (Arbeitstitel)
- Pons Pineyro, M., et. al: Influence of siderite ( $\text{FeCO}_3$ ) on hydration and phase composition of cement (Arbeitstitel)

#### **Studentische Abschlussarbeiten:**

Wessam Abou El Ela: Bachelorarbeit 'Workability retention and compressive strength of shotcrete with varying clay substitution levels'

Hung Tran: Bachelorarbeit ' Fresh properties of fiber-reinforced shotcrete'

#### **Dissertationen (in Ausarbeitung):**

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

Damit konnten die Aufgaben der wissenschaftlichen Leitung im Berichtszeitraum vollständig und gemäß Plan erfüllt werden.

### **2.3. Nachhaltigkeit**

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Im Berichtszeitraum wurden die begonnenen Arbeiten zur Nachhaltigkeitsbewertung und -optimierung der im Projekt entwickelten Spritzbetonrezepturen konsequent weitergeführt und im Wesentlichen plangemäß umgesetzt. Aufbauend auf dem nationalen und europäischen Stand der Technik wurden  $\text{CO}_2$ -reduzierte Betonstandards für Spritzbetone ohne und mit Fasern analysiert. Neben der Reduktion der Treibhausgasemissionen standen dabei die Performance der Betone – verstanden als Erfüllung der Anforderungen an Funktionalität, Frühfestigkeit, Dauerhaftigkeit (maximale Lebensdauer bei reduziertem Erhaltungsaufwand) und Qualität – im Fokus.

Zur quantitativen Bewertung der Umweltwirkung wurden für sämtliche relevanten Referenz- und Entwicklungsrezepturen Lebenszyklusbewertungen (LCA) in der Lebenszyklusphase A1 („embodied emissions“) durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass gegenüber einer herkömmlichen Spritzbetonrezeptur (z.B. Mischung B4 mit CEM I) mit rund  $480 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$  in A1 durch optimierte  $\text{CO}_2$ -reduzierte Rezepturen (D9 als Referenz für niedrigen Klinkergehalt) Emissionen von rund  $280 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$  erreicht werden können, was einer Reduktion um etwa 40 % bei vergleichbarer Performance entspricht (siehe Abbildung 2.3.1). Ein weiterer Schwerpunkt lag auf stahlfaserverstärkten Spritzbetonen, die aufgrund der  $\text{CO}_2$ -intensiven Stahlfaserherstellung typischerweise hohe GWP-Werte aufweisen. Im Projekt konnten Rezepturen mit hohem Stahlfasergehalt entwickelt werden, die die Verarbeitbarkeit sicherstellen und gleichzeitig das GWP deutlich reduzieren (z. B. etwa -30 % bzw. insgesamt bis über -40 % von B2 zu D11 bzw. B2 zu D15;  $670 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3 \rightarrow \text{ca. } 370 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3$ ). Diese Rezepturen schaffen die Grundlage für den zukünftigen Einsatz als dauerhafte Spritzbetonschalen in ausgewählten Tunnelabschnitten und können damit auch zur Vereinfachung von Bauabläufen und zu einer Materialreduktion beitragen.

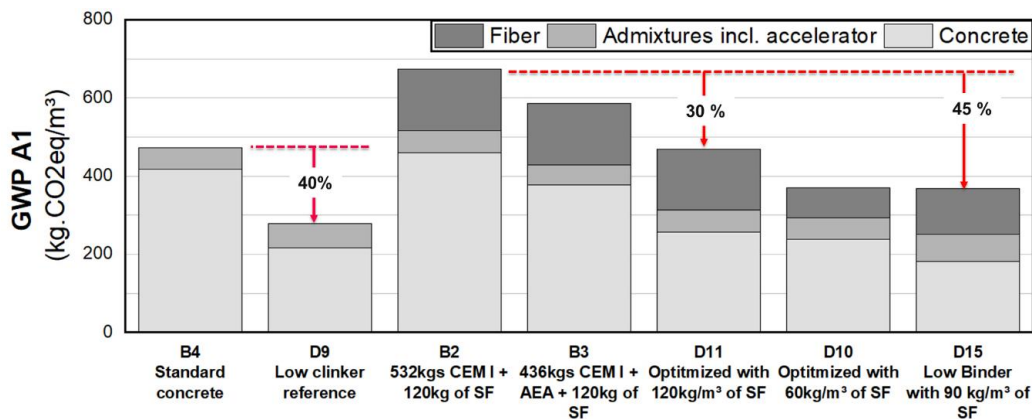


Abbildung 2.3.1: LCA-Bewertung der in den Großspritzversuchen in Hagerbach2 und Dietzingen ausgeführten Spritzbetonrezepturen. Durch den Einsatz CO<sub>2</sub>-effizienter Bindemittel mit neuen Ausgangsstoffen (Vergleich B4–D9) konnte das Global Warming Potential (GWP) bereits deutlich reduziert werden. Über die Optimierung der Packungsdichte und des Bindemittelgehalts wurden auch für stahlfaserbewehrte Spritzbetone (B2–D15)

Inhaltlich wurden die geplanten Schwerpunkte zur Nachhaltigkeit weitgehend umgesetzt: Im Vordergrund stehen die CO<sub>2</sub>-Reduktion und die Erhöhung der Dauerhaftigkeit, ergänzt um eine gesicherte Qualität der Betone. Parallel dazu wurden CO<sub>2</sub>-reduzierte und nachhaltige Bindemittel- und Zusatzstoffsysteme erforscht (z. B. niedrig gebrannte Tone, mechanochemisch aktivierte Tone, Siderit und weitere Eisenkarbonate, inkl. Haldenmaterial). Diese vielversprechenden Materialien wurden systematisch charakterisiert, in Rezepturen eingesetzt und mittels LCA bewertet; für mehrere dieser Komponenten konnten sehr geringe Umweltwirkungen bestätigt werden. Darüber hinaus wurden Aspekte der Kreislaufwirtschaft adressiert, insbesondere durch den Einsatz von Zusatz- bzw. Zumahlstoffen wie z. B. Hüttensand sowie durch die Erfassung und Bewertung des Spritzbetonrückpralls und dessen Reduktionspotenziale. Eine explizite Zirkularitätsbewertung (z. B. für Recyclingmaterial aus dem Tunnelausbruch oder Betonbruch als Gesteinskörnung) war im Berichtszeitraum nicht vorgesehen, wurde aber konzeptionell vorbereitet und könnte künftig auf Basis der entwickelten CO<sub>2</sub>-reduzierten Bindemittelsysteme weiter vertieft werden.

Gegenüber der ursprünglichen Planung ergaben sich keine grundlegenden Zieländerungen, jedoch Verschiebungen in der Schwerpunktsetzung: Zum einen musste aufgrund der Vielzahl neuartiger Bindemittel und Zusatzstoffe ein erhöhter Aufwand in die Erweiterung und Plausibilisierung der Ökobilanzdatenbanken investiert werden, da für viele innovative Komponenten keine etablierten Produktbewertungen (z. B. EPDs) vorliegen. Zum anderen wurde – stärker als ursprünglich vorgesehen – der Fokus auf anwendungsorientierte Performance-Nachweise (insbesondere Verarbeitbarkeit und Frühfestigkeit bei stahlfaserverstärkten Rezepturen) gelegt, um die praktische Umsetzbarkeit der CO<sub>2</sub>-reduzierten Betone zu demonstrieren. Diese Verschiebungen führten zu einem etwas höheren Ressourcenbedarf, haben aber insgesamt positive Auswirkungen auf die Qualität und Aussagekraft der Nachhaltigkeitsbewertung, da nun eine breitere und belastbarere Datengrundlage vorliegt.

Die Planung wird vor diesem Hintergrund dahingehend adaptiert, dass im verbleibenden Projektverlauf vor allem Konsolidierung und Ergänzung der LCA-Daten (inkl. der neuen Materialien), die Dokumentation der anwendungsorientierten Nachhaltigkeitsbewertung im Vordergrund stehen. Insgesamt können die Arbeiten im Arbeitspaket „Nachhaltigkeit“ zum Ende des Berichtszeitraums mit einem Fertigstellungsgrad von etwa 90 % bewertet werden. Der verbleibende Aufwand betrifft hauptsächlich die abschließende Auswertung, und Aufbereitung der Ergebnisse für den Gesamtprojektabschluss.

#### 2.4. Ausgangsstoffe und Bindemittelwirkungsweise

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Im Berichtszeitraum wurden im Arbeitspaket „Ausgangsstoffe und Bindemittelwirkungsweise“ zwei zentrale Materialgruppen vertieft untersucht: (i) kalzinierte und mechanisch aktivierte Tone sowie der Spezialbinder Celitement und (ii) eisenkarbonatreiche Ausgangsstoffe (Siderit und ankeritreiche Materialien vom steirischen Erzberg) sowie Kalziumkarbonat (vorrangig „Feinstkalzit“). Aufbauend auf den Arbeiten des 2. Forschungsjahres lag der Schwerpunkt im 3. Forschungsjahr auf der detaillierten Aufklärung der Bindemittelwirkungsweise, der Dauerhaftigkeit und der Übertragung in großtechnische Spritzbetonanwendungen. Die meisten Arbeitsschritte konnten wie geplant umgesetzt und in mehreren Bereichen (mechanische Aktivierung, Spezialbinder, vertiefte Analytik) sogar erweitert werden.

### Laboruntersuchungen zu Tonen und Spezialbindern

Bei den Tonen wurden drei natürliche Tone (zwei kaolinitische, ein illitischer Ton) sowie ein kommerzielles Metakaolin ausgewählt und untersucht. Die Tone wurden getrocknet bei 105 °C und bei 400/600/800 °C kalziniert. Systematisch untersucht wurden der Einfluss von Brenntemperatur und spezifischer Oberfläche auf den Fließmittelbedarf und das Konsistenzverhalten beschleunigter Mörtel (Ausbreitmaß  $26 \pm 2$  cm). Wie erwartet, stieg der Fließmittelbedarf mit zunehmender spezifischer Oberfläche bzw. abnehmender Brenntemperatur; Unterschiede zwischen den drei Tonen bei gleicher Brenntemperatur konnten auf Mineralogie und Reaktivität zurückgeführt werden. Mit einem ICS-basierten Hochleistungsfließmittel konnte die Verarbeitbarkeit über mindestens 30 Minuten weitgehend stabil gehalten oder teilweise sogar verbessert werden.

Da die hierzu erforderlichen Fließmittelgehalte die Hydratation deutlich beeinflussen, wurde der Einfluss des Fließmittels mittels isothermer Kalorimetrie untersucht. Höhere Dosierungen führten zu verzögerter, niedrigere Dosierungen zu beschleunigter Hydratation, womit klar wurde, dass Frühfestigkeitsvergleiche nur unter Berücksichtigung des Fließmitteleinflusses möglich sind.

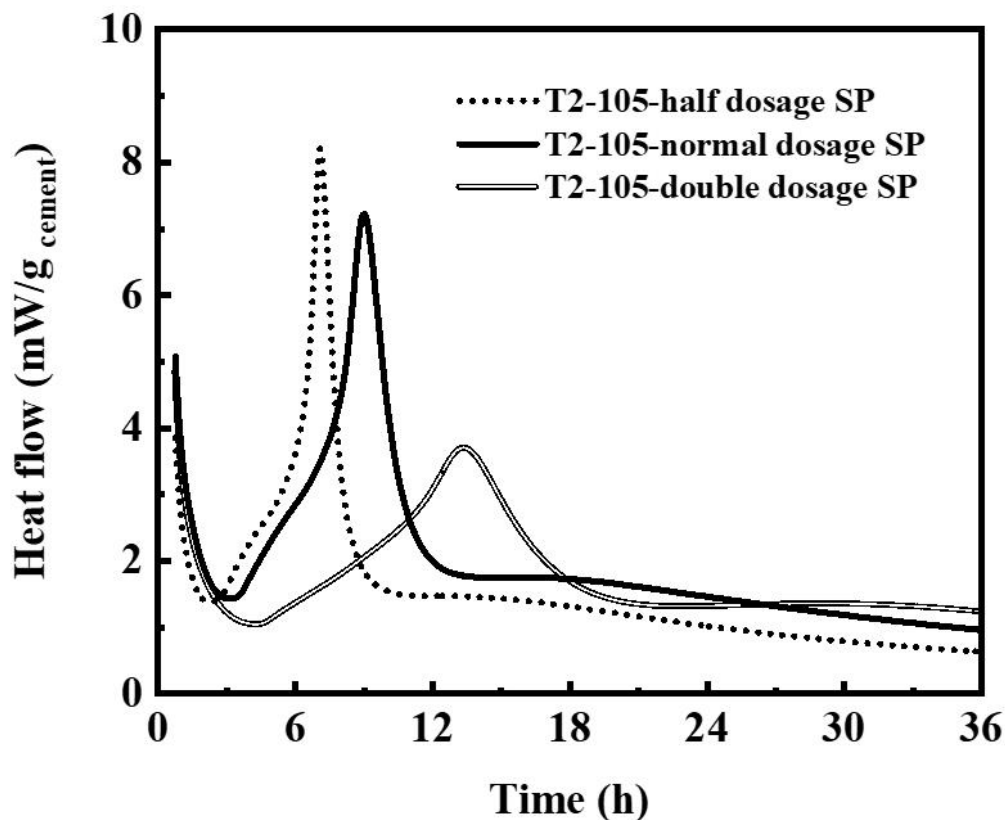


Abbildung 2.4.1: Ergebnisse der isothermen Kalorimetrie von Zementleimen mit einem bei 105 °C behandelten Ton und drei unterschiedlichen Fließmittelgehalten (Dosierung für 26 cm Ausbreitmaß, doppelte bzw. halbe Dosierung).

Zur isolierten Bewertung des Toneinflusses auf die Frühfestigkeit wurden ergänzend Leime und Mörtel mit erhöhtem  $w/b = 0,60$  ohne Fließmittel geprüft. Alle tonhaltigen Mischungen zeigten nach 6 h höhere Druckfestigkeiten als die reine Zementreferenz, Metakaolin erzielte die höchsten Werte. Besonders jene kalzinierten Tone mit hohem Fließmittelbedarf (hohe Oberfläche/hohe Reaktivität) wiesen die stärksten Frühfestigkeitssteigerungen auf. Die Spätfestigkeit korrelierte dagegen deutlich mit der puzzolanischen Reaktivität (u. a. aus  $R^3$ -Tests), sodass sich bestätigte:

- Frühfestigkeit wird v. a. durch hohe Oberfläche und/oder hohe chemische Reaktivität gesteigert
- Spätfestigkeit korreliert hauptsächlich mit der puzzolanischen Reaktivität des Tons

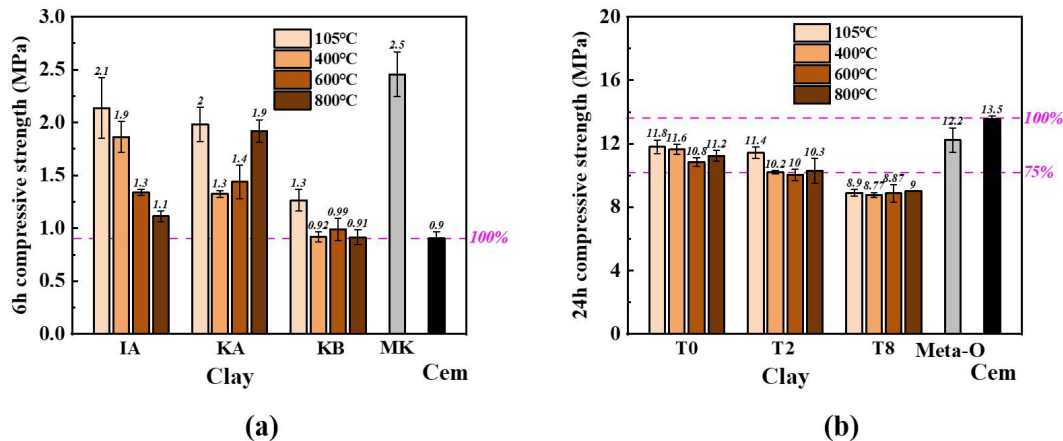


Abbildung 2.4.2: 6-Stunden-Druckfestigkeit beschleunigter Mörtelprismen mit  $w/b = 0,60$  ohne Fließmittelzugabe.

Als besonders vielversprechend erwies sich ein mechanisch aktivierter Ton („meca-clay“), der ohne thermische Behandlung rein mechanisch und elektrisch erzeugt wird. Dadurch kann der  $CO_2$ -Aufwand laut Herstellerangaben gegenüber kalzinierten Tonen um etwa 42 % reduziert werden. In beschleunigten Mörteln mit 25 M-% Ton im Binder und  $w/b = 0,50$  wurden nach 6 h durchgehend höhere Druckfestigkeiten als in der reinen Zementreferenz erreicht; nach 24 h und 28 d lagen die Werte jedoch darunter. Das Festigkeitsverhalten von meca-clay ist laut Laboruntersuchungen insgesamt mit hochtemperaturkalzinierten Tonen vergleichbar, bei deutlich günstigerem  $CO_2$ -Fußabdruck.

Parallel dazu wurde Celitement erstmals systematisch für Spritzbetonanwendungen untersucht. Celitement ist ein hydrothermal erzeugtes, teilhydratisiertes Calciumsilikat mit geringer chemischer Wasseranforderung und praktisch ohne freies Calcium (kein Portlandit). Standardprüfungen nach EN 196-1 mit reduziertem  $w/z = 0,40$  ergaben nach 28 Tagen Druckfestigkeiten von ca. 28–32 MPa. Versuche mit üblichen aluminathaltigen Beschleunigern zeigten kaum Reaktivität. Auf Basis umfangreicher Materialcharakterisierung (XRD, DTG, „Zuckerlösungstest“, Chapelle-Test) konnte gezeigt werden, dass Celitement im Zuge der Hydratation kein wirksames  $Ca(OH)_2$  bereitstellt, sondern zusätzlich  $Ca(OH)_2$  bindet. Zur Sicherstellung einer wirksamen Beschleunigerreaktion wurde daher eine Zugabe von rund 5 M-% Portlandit zum Binder abgeleitet und experimentell bestätigt.

### Untersuchungen zu Eisen- und Kalziumkarbonaten

Bei den eisenkarbonatreichen Materialien standen Siderit und ankeritreiche Rohstoffe vom steirischen Erzberg im Fokus. Aufbauend auf früheren Arbeiten zu Hydratation und Sulfatbeständigkeit wurden im Berichtszeitraum Hydratationsmechanismen, Dauerhaftigkeit und Mikrostruktur vertieft untersucht. Hierfür kamen u. a. Mössbauer-Spektroskopie (durchgeführt an Laborgeräten der European Synchrotron Radiation Facility ESRF) an abgestopften Leimen (4 h–180 d, Portlandzement bzw. Weißzement) zum Einsatz. Es konnte gezeigt werden, dass Siderit als  $Fe^{2+}$ -Phase über lange Hydratationszeiträume erkennbar bleibt und sich zusätzlich  $Fe^{3+}$ -haltige Phasen bilden, die in erster Näherung als Ferrihydrit bzw. Fe-modifizierte

C-S-H/C-F-S-H-Phasen interpretiert werden können. Damit ist belegt, dass Siderit nicht inert wirkt, sondern aktiv in die Hydratation, Phasen- und Gefügeentwicklung eingreift. Ergänzende TEM- und Raman-Untersuchungen zur vertiefenden Phasenidentifikation sind für das 4. Forschungsjahr vorgesehen.

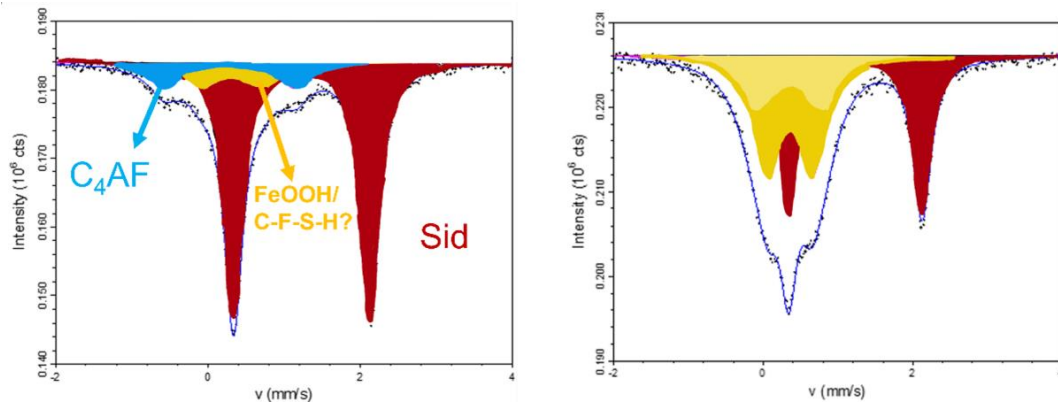


Abbildung 2.4.3: Mössbauer-Spektren zur Identifizierung der Fe-Phasen in siderithaltigen Zementleimen. Dargestellt sind eine nach 4 h Hydratation abgestoppte Probe (links) sowie eine Probe nach 180 Tagen Hydratation (rechts).

Parallel wurde das ankeritreiche Erzberg-Material (Haldenmaterial) intensiver untersucht. Es zeigte sich, dass bei geeigneter Mahlfeinheit und geeigneter Rezepturführung ähnliche Reaktionspfade wie in siderithaltigen Systemen auftreten können. Chemische, mineralogische und physikalische Kenngrößen (u. a. Blaine- und BET-Oberflächen) wurden erhoben. In diesem Bereich ist jedoch noch intensiver Forschungsbedarf notwendig.

Eine im Vorjahr begonnene Studie zum Ca-Auslaugungs- und Karbonatisierungsverhalten von Siderit- und Ankerit-Zusätzen steht unmittelbar vor der Fertigstellung. Mini-RV-Tests zeigten, dass alle eisenkarbonathaltigen Proben eine deutliche Reduktion der Ca-Auslaugung gegenüber Referenzen aufweisen; die stärksten Effekte wurden bei ultrafein gemahlenem Ankerit sowie bei Siderit beobachtet. Siderit als Feinzuschlag („Siderit-Sand“) führte zur größten Reduktion der Ca-Auslaugung in der Größenordnung von 60–70 %. Karbonatisierungsprüfungen ergaben ähnliche Karbonatisierungstiefen im Vergleich zu Referenzen ohne Eisenkarbonate. Als Fazit zur Karbonatisierung kann daher festgehalten werden: Trotz Portlanditreduktion in eisenkarbonathaltigen Proben wurde keine Verschlechterung des Karbonatisierungswiderstandes festgestellt.

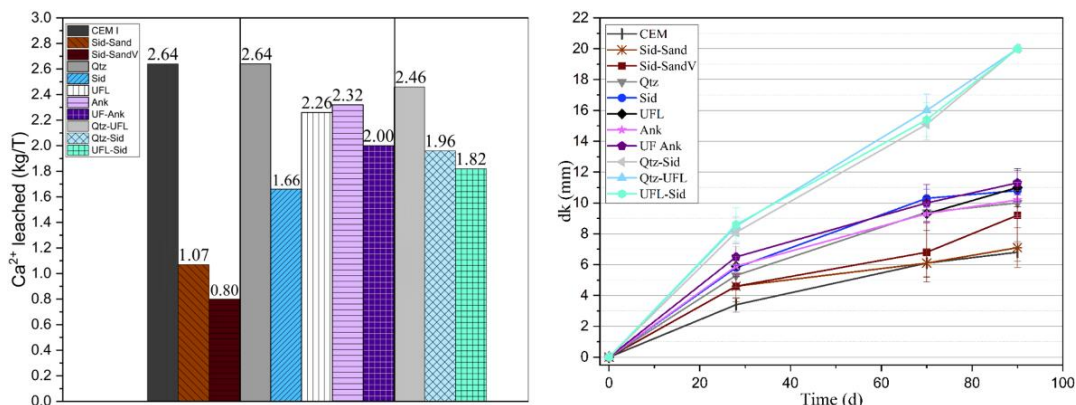


Abbildung 2.4.4: Ergebnisse des Ca-Auslaugversuchs (Mini-RV-Test) und der Karbonatisierungstiefe von Siderit- und Ankerit-haltigen Proben im Vergleich zu Referenzmischungen.

Ergänzend konnte gezeigt werden, dass ultrafeines Kalksteinmehl nur dann wirksam ist, wenn es eine ausreichend hohe spezifische Oberfläche aufweist: ein deutlich frühfestigkeitssteigernder Effekt in beschleunigten Rezepturen tritt erst ab etwa  $5 \text{ m}^2/\text{g}$  (spezif. Oberfläche mit BET gemessen) klar hervor.

Ein weiterer Schwerpunkt lag auf der Festigkeitsentwicklung und dem Gefüge von Mörteln mit Siderit als Feinzuschlag. Hier wurden deutlich erhöhte Spätfestigkeiten im Vergleich zu Quarzsand-Referenzen festgestellt. Als Ursachen kommen (i) in geringerem Maße die höhere Dichte und (ii) die kantige Kornform des Siderits in Betracht; maßgeblich ist vermutlich (iii) eine Verdichtung der Interfacial Transition Zone (ITZ). BSE- und EPMA-Analysen zeigten eine verdichtete ITZ mit lokaler  $\text{CaCO}_3$ -Anreicherungen um Sideritkörner; helle Reaktionszonen im Siderit selbst (vermutlich Ferrihydrit/ $\text{Fe}^{3+}$ -Phasen) traten nur in reagierten Proben auf und stützen die Interpretation, dass Siderit aktiv während der Hydratation reagiert.

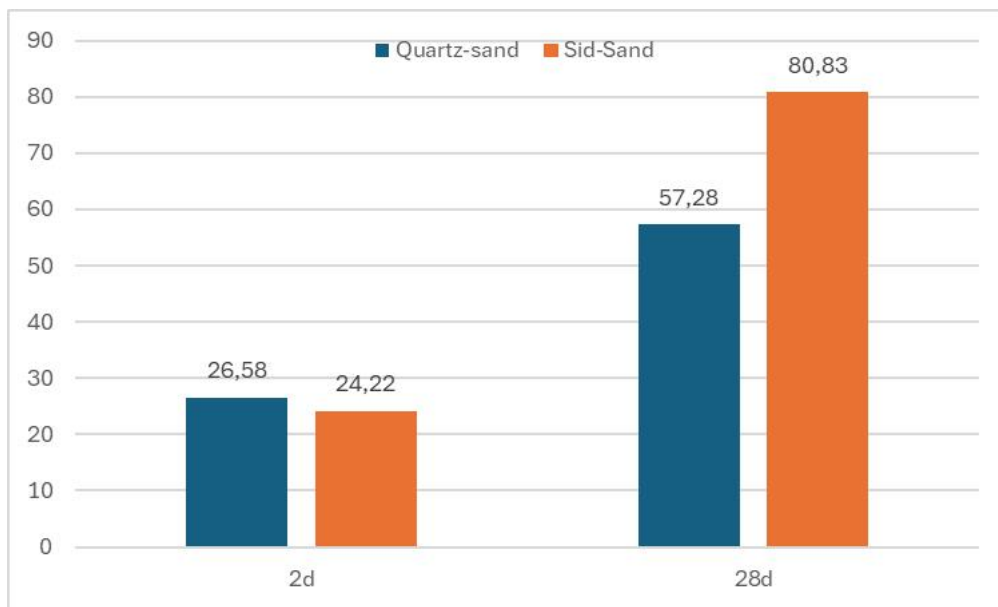


Abbildung 2.4.5: Druckfestigkeit von Mörteln mit Quarzsand bzw. Siderit-Sand nach 2 und 28 Tagen Rückstreuerelektronen- und Elementverteilungsaufnahmen der ITZ von Mörteln mit Siderit als Zuschlag. Die Bildbreite beträgt jeweils etwa 1 mm.

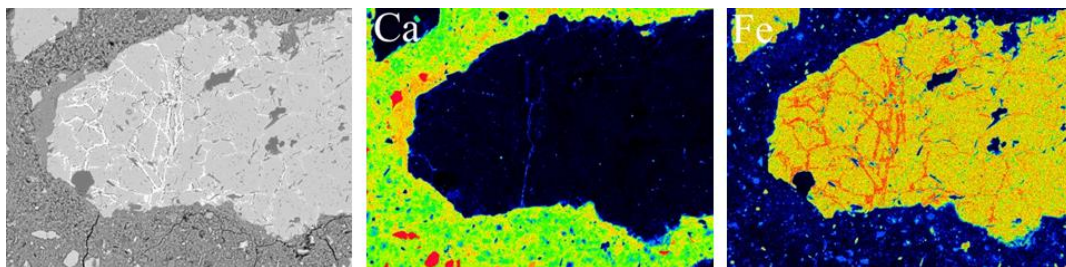


Abbildung 2.4.6: Rückstreuerelektronen- und Elementverteilungsaufnahmen der ITZ von Mörteln mit Siderit als Zuschlag. Die Bildbreite beträgt jeweils etwa 1 mm.

### Großtechnische Spritzbetonversuche und praktische Relevanz

Die im Labor gewonnenen Erkenntnisse zu Tonen, Celitement, Siderit, Ankerit und ultrafeinem Kalksteinmehl wurden konsequent in großtechnische Spritzbetonversuche überführt. Im 3. Forschungsjahr wurden im Großversuch Ditzingen (D) mehrere der entwickelten Konzepte kombiniert:

- Kalzinierte und mechanisch aktivierte Tone wurden in  $\text{CO}_2$ -reduzierten Spritzbetonrezepturen eingesetzt
- Celitement + 5 % Portlandit wurde als alternativer Spezialbinder unter Beschleunigerzugabe (6 % bezogen auf Binder) mit leicht reduziertem  $w/b = 0,47$  erprobt,
- Siderit und ankeritreiche Materialien wurden als feine Zuschläge integriert

- Ultrafeines Kalksteinmehl wurde in allen Mischungen gezielt zur Steigerung der Frühfestigkeit eingesetzt und bestätigte unter Praxisbedingungen die im Labor beobachteten positiven Effekte.

Die gewonnenen Proben aus Ditzingen werden derzeit hinsichtlich Festigkeit, Dauerhaftigkeit und Gefüge geprüft; die detaillierte Auswertung erfolgt im Bericht zum Großversuch Ditzingen und im Projektabschlussbericht des 4. Forschungsjahres.

### **Veröffentlichungen und Verwertung**

Die wissenschaftliche Verwertung der im Arbeitspaket erzielten Ergebnisse ist weit fortgeschritten. Zwei sideritbezogene Arbeiten wurden in einer Fachzeitschrift veröffentlicht und belegen die grundsätzliche Eignung von natürlichem Siderit als neuartiges Supplementary Cementitious Material (SCM) sowie dessen positiven Einfluss auf die Sulfatbeständigkeit zementöser Systeme [1,2]. Eine weitere Publikation zu Hydratationsmechanismen und Dauerhaftigkeitsverhalten (Ca-Auslaugung/Karbonatisierung) von Eisenkarbonaten ist derzeit in Vorbereitung.

Bezüglich Tone (kalzinierte und getrocknete Tone) wurde eine Publikation zu den Ursachen des unterschiedlichen Verhaltens in beschleunigten Systemen vorbereitet. Darüber hinaus fließen die Ergebnisse in interne Berichte (u. a. Ausgangsstoffe und GSV Ditzingen) und in praxisorientierte Empfehlungen zu CO<sub>2</sub>

□ reduzierten Spritzbetonbindersystemen ein.

### **Planerfüllung, Abweichungen und weiterer Projektverlauf**

Die im Arbeitsplan vorgesehenen Untersuchungen zur Bindemittelwirkungsweise kalzinierter Tone und eisenkarbonatreicher Ausgangsstoffe (inkl. Übertragung auf Großversuche) konnten im Berichtszeitraum plangemäß erarbeitet werden. Wesentliche Zieländerungen traten nicht auf, jedoch gab es einige inhaltliche Schwerpunktverschiebungen:

- Der Anteil vertiefender analytischer Methoden (Mössbauer-Spektroskopie, <sup>27</sup>Al-MAS-NMR, EPMA-Analysen) wurde deutlich erhöht, um die Rolle der Fe-Phasen und der Tonreaktivität auf Hydratation, Gefüge und Dauerhaftigkeit besser zu verstehen.
- Mit dem mechanisch aktivierten Ton („meca-clay“) und Celiment als Spezialbinder wurden zwei zusätzliche, ursprünglich nicht vorgesehene Schwerpunkte integriert, die neue CO<sub>2</sub>-Minderungspotenziale und alternative Bindemittelkonzepte für Spritzbeton erschließen.
- Aufgrund der sehr positiven Ergebnisse mit Siderit wurde der ankerreiche Rohstoff stärker in den Mittelpunkt gerückt und zusätzlich in großtechnische Versuche eingebunden.

Diese Anpassungen wirken sich insgesamt positiv auf die Projektziele aus, da sie die wissenschaftliche Tiefe erhöhen und die Anwendbarkeit der Ergebnisse verbreitern. Einzelne Arbeitsschritte – insbesondere TEM-/Raman-Analysen, Modellierungen der frühen Hydratation, Abschluss der Dauerhaftigkeitsprüfungen an den Proben der GSV Ditzingen sowie die weitere Auswertung der tonhaltigen Spritzbetone – werden aus zeitlichen Gründen in das 4. Forschungsjahr verschoben. Die Planung wurde entsprechend adaptiert, indem zusätzliche Labor- und Auswertekapazitäten für diese vertiefenden Untersuchungen vorgesehen werden.

Unter Berücksichtigung aller Arbeiten zu Tonen, Spezialzementen und Eisenkarbonaten wird der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets „Ausgangsstoffe und Bindemittelwirkungsweise“ zum Ende des Berichtszeitraums mit 100 % bewertet.

[1] Mittermayr, F., F. Steindl, M. P. Pineyro, L. Briendl, M. Sakoparnig and I. Galan (2025). "Exploring natural siderite (FeCO<sub>3</sub>) as a novel supplementary cementitious material". Cement and Concrete Research 197: 107975. DOI: 10.1016/j.cemconres.2025.107975.

[2] Pons Pineyro, M., F. R. Steindl, I. Galan, A. C. Maciel Soares and F. Mittermayr (2026). "How siderite (FeCO<sub>3</sub>) enhances the sulfate resistance of cementitious systems". Cement and Concrete Research 199. DOI: 10.1016/j.cemconres.2025.108010

## **2.5. Betontechnologie**

## Fertigstellungsgrad: 100%

Im Arbeitspaket Betontechnologie wurden im Berichtsjahr die Grundlagen für CO<sub>2</sub>-arme, faserverstärkte Spritzbetone systematisch weiterentwickelt. Aufbauend auf den Ergebnissen der Vorjahre lag der Schwerpunkt auf der Optimierung des Mischungsentwurfs für faserbewehrten Spritzbeton mit hohem Fasergehalten sowie auf der Reduktion des Bindemittelgehalts durch geeignete Sieblinienoptimierung, Luftporenmanagement und den Einsatz von Zusatzstoffen (SCM).

## Laborprogramm Vorbereitungen für Hagerbach 2025: Grundlagen für Faserspritzbeton mit hohem Fasergehalt

Im Labor wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit systematischer Variation von:

- Bindemittelgehalt ( $\approx 425\text{--}530\text{ kg/m}^3$ ),
- Sieblinien (drei optimierte Kombinationen Opt1–Opt3 mit unterschiedlichem Feinanteil),
- Luftporengehalt (ohne LP-Mittel, mittlere und hohe LP-Mittel Dosierung) sowie
- Stahlfasergehalt (bis  $160\text{ kg/m}^3$ )

durchgeführt. Ziel war es, die Zusammenhänge zwischen Bindemittelgehalt, Leimvolumen, Sieblinie, Luftporen und Fasergehalt auf Frischbetoneigenschaften und Pumpbarkeit zu verstehen.

Die Mischungen wurden hinsichtlich Ausbreitmaß, Luftgehalt, Dichte, Trichterauslaufzeit sowie Rheologie des Gleitfilms (SLIPER-Gleitrohrreometer) charakterisiert. Wesentliche Erkenntnisse sind:

- Steigende Bindemittel- bzw. Leimgehalte und ein erhöhter Feinanteil der GK Fraktion (Sieblinie Opt3 in Abbildung 2.5.1) reduzieren deutlich den Bedarf an Fließmittel und verbessern die Verarbeitbarkeit.
- Wie erwartet verringern Fasern die Fließfähigkeit, dieser Effekt kann aber durch optimierte Sieblinien und gezielten Lufteintrag deutlich gemindert werden.
- Entscheidend ist nicht allein der Zementgehalt, sondern die „effektive Leimschichtdicke“ um die Körner. Wird diese durch mehr Feinanteile und/oder Luftporen erhöht, können höhere Fasergehalte verarbeitbar gemacht werden.
- Hohe Fasergehalte bis  $160\text{ kg/m}^3$  sind mit geeigneten, fein abgestimmten Sieblinien und Luftporenbildnern möglich, ohne dass die Frischbetoneigenschaften auf ein nicht mehr pumpbares Niveau absinken.

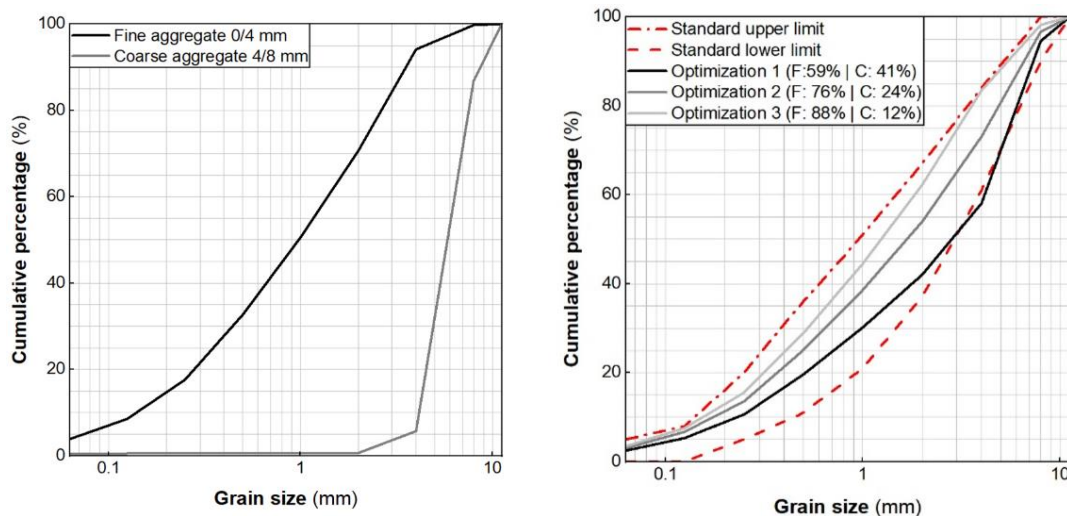


Abbildung 2.5.1: Sieblinien der Gesteinskörnungen; rechts: Darstellung der optimierten Sieblinien.

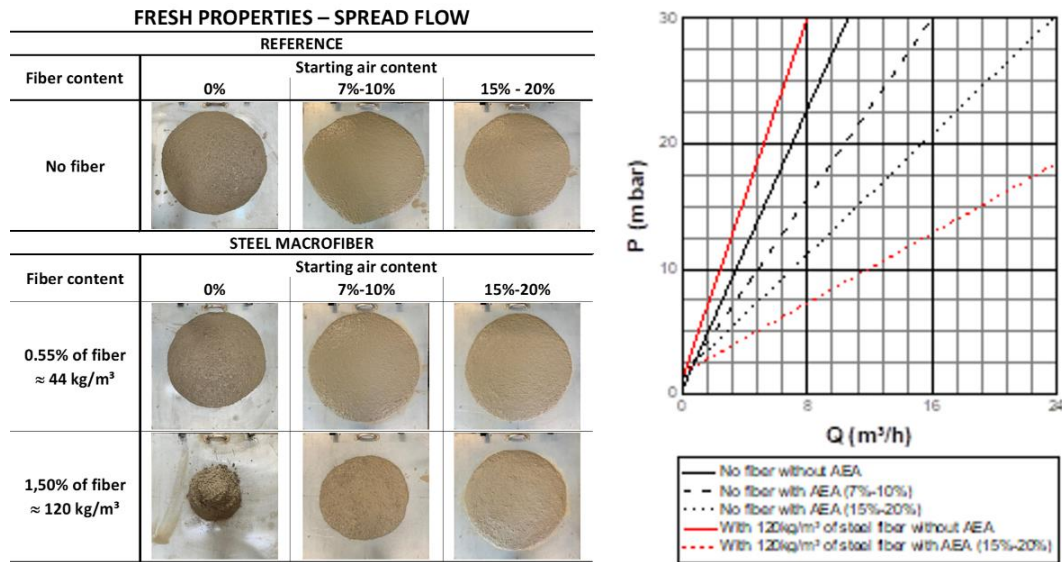


Abbildung 2.5.2: Vorbereitung im Labor für die „GSV Hagerbach 2“. Einfluss von Stahlfaserzugabe und Luftgehalt auf das Ausbreitmaß (links). Verhalten der Mischungen im Gleitrohrreometer (rechts).

Parallel wurde für ausgewählte Mischungen eine Ökobilanzierung (Lebenszyklusbetrachtung GWP, A1–A3) durchgeführt. Sie zeigt, dass Mischungen mit reduziertem Zementgehalt und erhöhtem künstlichen Luftporenanteil bei gleichbleibender Leistungsfähigkeit (Festigkeit, Energieaufnahme) deutliche CO<sub>2</sub>

□ Einsparungen ermöglichen. Insbesondere Mischungen mit „normalem“ Zementgehalt und hohem Faseranteil können durch gezielten Luftporenmittel-Einsatz auf deutlich niedrigere Bindemittelgehalte zurückgeführt werden, ohne die Pumpbarkeit zu verlieren.

### Laborprogramm Vorbereitungen für Ditzingen 2025: Optimierte Bindemittelsysteme, Sieblinien und Fasergehalte

In Vorbereitung der Spritzversuche in Ditzingen wurden weitere Laboruntersuchungen zur Sieblinien- und Bindemitteloptimierung durchgeführt:

- Entwicklung von Multilevel-Sieblinien auf Basis von 2 kombinierten Funk-Dinger-Packungsdichtefunktionen, mit gezielter Reduktion des Anteils an Körnern ≥ 1 mm und einem diskontinuierlich hohen Anteil an Feinsand (0,5-1mm), um den „Platz“ für Luftporen zu vergrößern.
- Systematische Variation der Luftporengehalte durch unterschiedliche LP-Mittelgehalte bei unterschiedlichen Sieblinien, um den zuvor beobachteten „De-Airing“-Effekt (Luftverlust bei zu dichter Gesteinskörnung) besser zu verstehen.
- Optimierung des Bindemittelsystems mit CEM I, CEM III/A, kalzinierten Tonen und Silikastaub in unterschiedlichen Gesamtdosierungen (≈ 350–418 kg/m<sup>3</sup>)
- Weiter Variation der Stahlfasergehalte und Fasertypen (PP-Fasern)

Die Ergebnisse zeigen:

- Eine Multilevel-Sieblinie mit angepasstem Anteil an feiner GK ist besonders geeignet, um zusätzliche Luftporen bei gleichzeitiger Faserzugabe im System zu halten. Hohe Luftgehalte können eingestellt werden, ohne dass die Viskosität des Betons zu hoch ansteigt.
- Für Mischungen mit hohem Fasergehalt bleiben Viskosität und Fließfähigkeit in kontrollierbaren Bereichen, wenn die Multilevel-Sieblinie und hohe Luftgehalte kombiniert werden. Dies ist ein zentraler Baustein für die spätere Spritzbarkeit.
- Bindemittelsysteme mit reduziertem Klinkeranteil (Anteil CEM III/A, Tone, Silikastaub) und Bindemittelgehalten ab ca. 350 kg/m<sup>3</sup> sind für Faserspritzbeton laut Laborergebnissen grundsätzlich geeignet; für die großtechnische Umsetzung wurden aus Festigkeits- und Frühfestigkeitsgründen vor allem Mischungen mit 385–418 kg/m<sup>3</sup> Bindemittel ausgewählt.

## Fazit, Abweichungen und Fertigstellungsgrad

Die im Arbeitspaket vorgesehenen Arbeitsschritte (Entwicklung, Laborvalidierung und ökologische Bewertung - siehe Arbeitspaket 3) von Spritzbetonrezepturen mit hohen Fasergehalten und geringen Klinkermengen) konnten im Wesentlichen planmäßig durchgeführt werden.

Es kam zu inhaltlichen Erweiterungen gegenüber der ursprünglichen Planung, insbesondere:

- stärkere Fokussierung auf Luftporenmanagement als „Leimersatz“ zur Reduktion des Zement- bzw. Bindemittelgehalts.
- Einführung und detaillierte Untersuchung von Multilevel-Sieblinien (ML2) sowie
- vertiefte Lebenszyklusanalysen (GWP in Relation zu Energieaufnahme und Druckfestigkeit).

Diese Anpassungen wirken sich positiv auf die Zielerreichung aus und erfordern keine grundlegende Änderung der Projektplanung. Einige Detailauswertungen (z. B. statistische Korrelationen zwischen Rheologieparametern und Druckverlust, weitergehende LCA-Szenarien) werden im nächsten Forschungsjahr fortgeführt.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets Betontechnologie für das 3. Forschungsjahr ist 100%.

### 2.6. Spritztechnologie, Auftrag, Verarbeitbarkeit

**Fertigstellungsgrad:** 100%

Im Arbeitspaket Spritztechnologie, Auftrag und Verarbeitbarkeit wurden die im Labor entwickelten Betonzusammensetzungen großtechnisch erprobt und hinsichtlich Pumpbarkeit, Spritzbarkeit, Energieaufnahme und Eignung für dauerhafte, faserbewehrte Spritzbetonschalen bewertet. Der Schwerpunkt lag auf der Kombination „hohe Fasergehalte – niedriger Bindemittelgehalt – optimierte Sieblinie – künstliche Luftporen“.

#### Großversuche Hagerbach 2025

Spritzbetone mit Stahlfasergehalten bis 160 kg/m<sup>3</sup> und Luftgehaltsoptimierung

Im Versuchsstollen Hagerbach wurden auf Basis der Laborergebnisse verschiedene Spritzbetone mit und ohne Stahlfasern im Realmaßstab erfolgreich getestet. Die wesentlichen Prozessparameter wurden systematisch variiert:

- Stahlfasergehalte von 0 bis 160 kg/m<sup>3</sup>,
- unterschiedliche Bindemittelgehalte bzw. Leimvolumina,
- Mischung mit und ohne Luftporenbildner bzw. unterschiedliche Luftgehalte bis 25% und
- optimierte Sieblinien mit erhöhten Feinanteilen.

Die Versuche umfassten Untersuchungen der Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß, Luftgehalt, V-Trichter, Wassergehalt), die Bestimmung der Rheologie des Gleitfilms mittels SLIPER Gleitrohrreometer, die Aufzeichnung der Pumpdrücke mittels Sensorik sowie die Erzeugung von Probekörpern (Bohrkernen und Platten) für Frühfestigkeitsentwicklung, 28-Tage-Druckfestigkeit und Energieaufnahme (Plattenbiegeversuch). Zentrale Erkenntnisse:

- Spritzbetone mit sehr hohen Fasergehalten (120–160 kg/m<sup>3</sup>) konnten bei geeigneter Sieblinie und LP-Mittel-Dosierung stabil gepumpt und gespritzt werden.
- Die Erhöhung des Fasergehalts führt erwartungsgemäß zu höheren Pumpdrücken; dieser Effekt kann jedoch durch künstliche Luftporen kompensiert werden. Mischungen mit reduziertem Zementgehalt und zusätzlicher Luft zeigen vergleichbare Pumpdrücke wie zementreichere Referenzmischungen.

- Durch Luft und optimierte Sieblinien wird der Gleitfilm an den Rohrwandungen der Spritzmaschine verbessert (niedrigere Viskosität), ohne dass dies die Endfestigkeit der gespritzten Proben negativ beeinflusst.
- Die mit 120 bzw. 160 kg/m<sup>3</sup> Stahlfaser ausgeführten Spritzplatten erreichten sehr hohe Energieaufnahmewerte (über den höchsten Klassen der ÖBV-Richtlinie), mit deutlich ausgeprägtem „strain-hardening“-Verhalten. Bei 160 kg/m<sup>3</sup> zeigen erste Ergebnisse allerdings, dass die Versagensform teilweise von Biegeverformung zu eher Durchstoß-Versagen übergehen kann. Dies könnte ein Hinweis sein, dass hier ein Fasersättigungsbereich erreicht wird.

Eine begleitende  $\mu$ CT-Auswertung einzelner Bohrkerns zeigte, dass mit zunehmendem Fasergehalt die Luftporosität im erhärteten Spritzbeton tendenziell abnimmt, was u. a. auf eine erhöhte Verdichtung und das höhere Gewicht der faserreichen Matrix zurückgeführt wird. Dies ist für die Interpretation der Pumpdrücke und des Tragverhaltens wichtig und wird in weiteren Auswertungen vertieft.

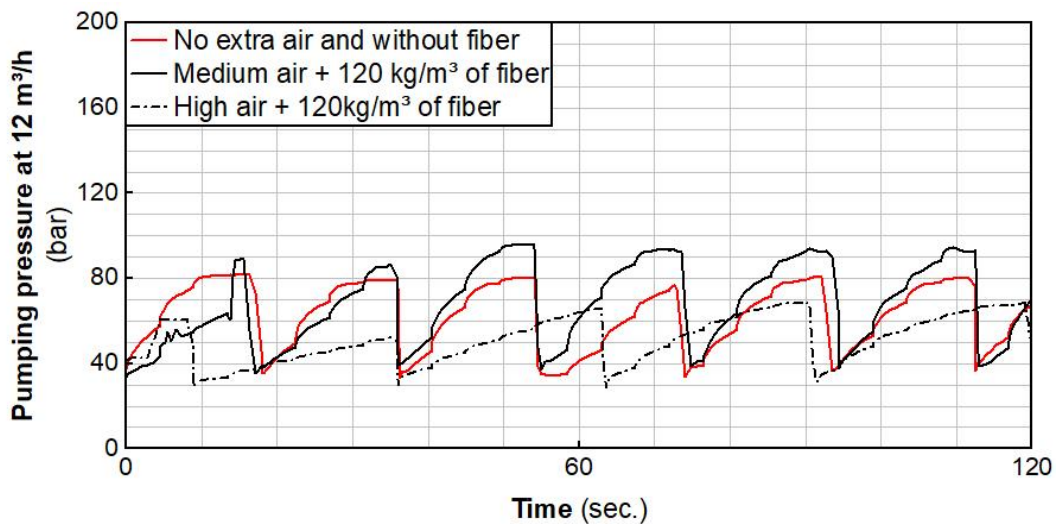


Abbildung 2.6.1: Hydraulikdruck und dessen Pulsation für drei Mischungen ohne Luftporenmittel und ohne Fasern (rote Linie) bzw. mit mittlerer Luftporenmitteldosierung und Stahlfasern (schwarze Linie) bzw. mit hoher Luftporenmitteldosierung und Stahlfasern (gestrichelte Linie). Während ein hoher Stahlfasergehalt erwartungsgemäß den Hydraulikdruck und die Pulsation erhöhte, führte ein hoher Luftporengehalt zu niedri

### Großversuch Ditzingen 2025: Optimierte Bindemittel mit und ohne Fasern

Im Großversuch Ditzingen wurden mehrere komplementäre Ansätze verfolgt: Einsatz von Bindemitteln mit unterschiedlichen kalzinierten und mechanisch aktivierten Tonen auf Basis eines CEM II/C-M (Q-LL), teilweiser Ersatz des Sandanteils der Gesteinskörnung durch Siderit sowie Haldenmaterial vom Erzberg, sowie Einsatz von Multilevel-Sieblinien und binderreduzierten Systemen (CEM I/CEM III/kalziniertes Ton/Silikastaub) mit 60, 90 oder 120 kg/m<sup>3</sup> Stahlfasern bzw. alternativ 1,5 Vol.-% Kunststoff-Makrofasern (zwei Fasergeometrien). Die Mischungen sind in der folgenden Tabelle im Überblick dargestellt.

	Nr.	Description	Binder (wt%)							w/b	Fibres vol%	Aggregates
			CEM I 52.5 N	CEM III/A or other*	OMYA Betocarb UF S-GU	G&S Kalzinat	KSM-S (1)	meca clay	Micro- silica			
Ref.	D1	Reference	95		5					0.5		company sieve line (7 fractions)
	D2	CEM III	0	95	5					0.5		
Clay-L Mixes & Cel.	D3	LQ Cement		100*						0.5		
	D4	Celitement		100*						0.5		
	D5	meca clay			5		10	30		0.5		
	D6 (2)	Kalzinat (puzzo grey plus)	55		5	30	10			0.5		
Erzberg- material	D7	Siderite Sand	95		5					0.5		
	D8	Berge Sand	95		5					0.5		
Low Clinker & High Fiber	D9	Low Binder (Fiber Reference)	49	26	5	15			5	0.6		multi-level sieve line optimization
	D10	Steel-B 60kg/m <sup>3</sup> +LP	49	26	5	15			5	0.6	0.75	
	D11	Steel-B 120 kg/m <sup>3</sup> +LP	49	26	5	15			5	0.6	1.5	
	D12	MacroPP-M 14 kg/m <sup>3</sup> +LP	49	26	5	15			5	0.6	1.5	
	D13	MacroPP-C 4 kg/m <sup>3</sup> +LP	49	26	5	15			5	0.6	1.5	
	D15	Low-Clinker SF 90 kg/m <sup>3</sup> + LP	45	38	13	0			0	5	0.6	1.5

Abbildung 2.6.2: Tabellarischer Überblick über die im Großspritzversuch hergestellten Betone mit Bindemittelvarianten.

Die Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß, Luftgehalt, V-Trichter, tatsächlicher Wassergehalt) sowie die Gleitfilmrheologie (SLIPER) wurden umfassend erfasst. Die wichtigsten Ergebnisse der Frischbetonprüfungen:

- Mit Ausnahme der Celitement-Rezeptur (deutlich steifer) konnte das geplante Ausbreitmaß von  $60 \pm 5$  cm gut eingehalten werden.
- Ohne Fasern lagen die Luftgehalte im Bereich von etwa 5–12 %, bei den Fasermischungen zwischen ca. 13 und 15 %.
- Alle Fasermischungen – einschließlich jener mit reduziertem Bindemittelgehalt – konnten mit Fasergehalten bis 120 kg/m<sup>3</sup> bei akzeptablen Pumpdrücken verarbeitet werden; die LL-Viskositäten lagen im Bereich bzw. nur leicht über jenen der Referenzmischungen ohne Fasern.
- Die Kombination aus Multilevel-Sieblinie (ML2) und moderatem Luftporenmittel-Einsatz erlaubt es, die Gleitfilmrheologie auch bei hohen Fasergehalten sicher zu kontrollieren.

Bezüglich der Festbetoneigenschaften wurden folgende zentrale Erkenntnisse gemacht:

- Sämtliche Mischungen zeigen trotz zum Teil deutlich reduzierter Klinkergehalte eine Frühfestigkeitsentwicklung, die mit der Referenz vergleichbar ist; die meisten Mischungen liegen über die ersten 24 Stunden im Bereich J2. Die Mischungen D3 und D4 weisen im Zeitraum 1–8 h geringere Frühfestigkeiten (J1-Bereich) auf.
- Spritzproben (Bohrkerne und Platten) erreichten ausreichende 28-Tage-Druckfestigkeiten; die negativen Einflüsse der Luftporen auf die Festigkeit werden durch den Spritzvorgang („De-Air-Effekt“) weitgehend kompensiert.
- RV Ergebnisse liegen zwischen 0,36 und 0,82 für die Referenz (siehe Abbildung 2.6.3)

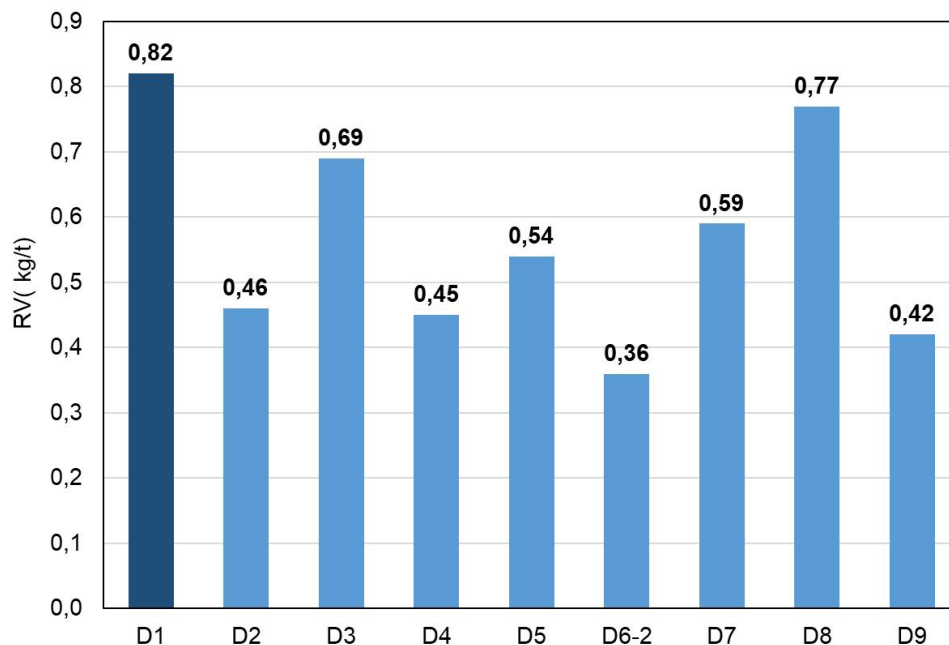


Abbildung 2.6.3: Ergebnisse der Bestimmung des reduzierten Versinterungspotentials der in Ditzingen verspritzten Rezepturen. Die Referenz D1 zeigte die höchste Ca-Auslaugung, während Zusätze von Hüttensand (D2), kalzinierten oder mechanisch aktivierten Tonen (D3, D5, D6-2) sowie Eisenkarbonaten (D7, D8) bzw. von Spezialbindemitteln (D4) oder Stoffkombinationen (Hüttensand+kalziniertes Ton, D9) teils deutlich reduziert

Besonders relevant für den Einsatz als permanente Spritzbetonauskleidung sind die Ergebnisse der Plattenbiegeversuche nach EN 14488-5:2006 (Energieabsorption – Plattenbiegeversuch):

- Alle untersuchten Stahlfaserbetone erreichten sehr hohe Energieaufnahme-Klassen (E1000); insbesondere die Kombination aus binderoptimierten Systemen und 120 kg/m<sup>3</sup> Stahlfaser zeigte ein günstiges Verhältnis von Tragfähigkeit, Duktilität und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (siehe Abbildungen 2.6.4 und 2.6.5).
- Kunststoff-Makrofasern erwiesen sich grundsätzlich als geeignet für energieabsorbierende Spritzbetonschalen: Bei geeigneter Faserlänge (≈ 50 mm) konnten sogar Energieaufnahme-Klassen im Bereich EA 1000 erzielt werden, wenn auch unterhalb der Stahlfasermischungen.
- Die vergleichende Bewertung bestätigt, dass Stahlfasern aufgrund ihres höheren E-Moduls und der höheren Streckgrenze weiterhin das beste Tragverhalten liefern, Polymerfasern jedoch eine interessante Option für spezielle Anwendungsfälle darstellen (z. B. korrosionskritische Bereiche oder Anwendungsfälle mit nichtmetallischer Bewehrung).

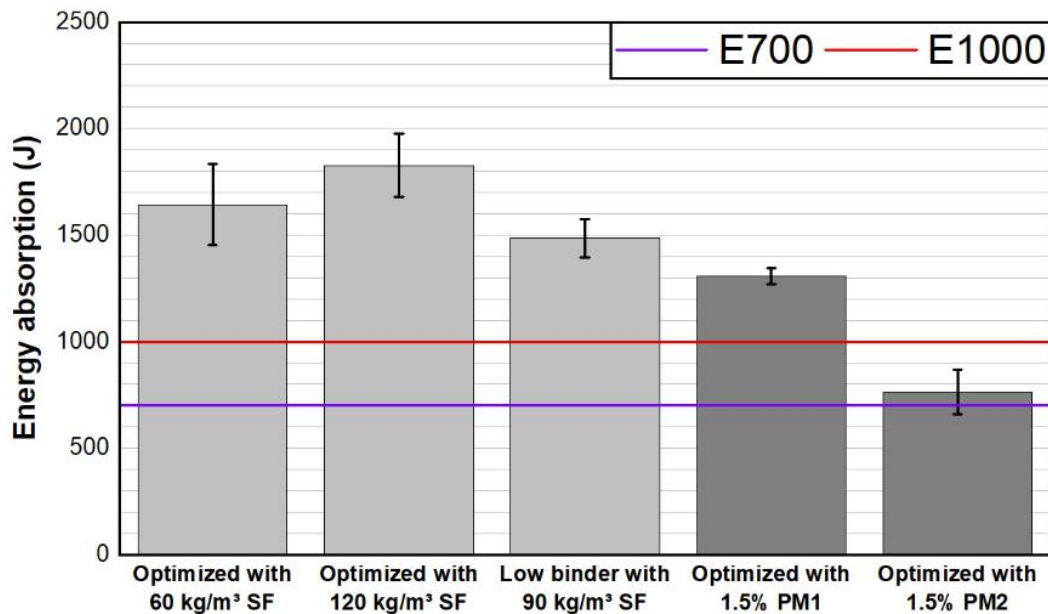


Abbildung 2.6.4: Energieabsorptionsvermögen (in J) von plattenförmigen Prüfkörpern, hergestellt mit Stahlfasern (SF) bzw. Polymerfasern (PM). Stahlfasern erreichten die beste Energieaufnahme, Kunststoff-Makrofasern erwiesen sich aber ebenfalls als tauglich (bis zu Energieaufnahmeklasse E1000).

Ergänzend wurde – basierend auf den Materialdaten – eine Abschätzung des Global Warming Potentials (GWP) der Ditzingen-Mischungen vorgenommen. Dabei zeigte sich, dass die optimierten FR-SpOC-Mischungen mit reduziertem Bindemittelgehalt und angepasster Sieblinie den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck deutlich senken, ohne Einbußen bei Pumpbarkeit, Spritzbarkeit oder Energieaufnahme hinnehmen zu müssen wie anhand der „CO<sub>2</sub>-Intensität“ in Abbildung 2.6.5 dargestellt (siehe auch Arbeitspaket 3).

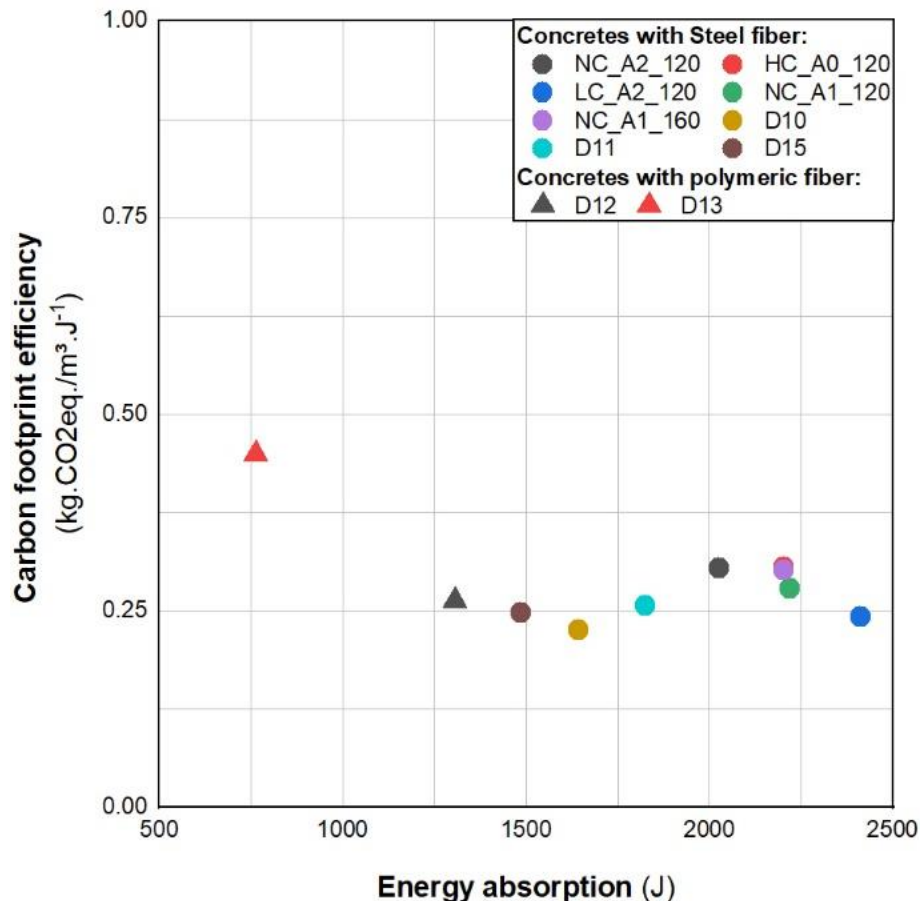


Abbildung 2.6.5: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von faserverstärktem Spritzbeton im Verhältnis zur Energieaufnahme ("CO<sub>2</sub>-Intensität").

### Planerfüllung, Abweichungen und Fertigstellungsgrad

Die im Arbeitspaket geplanten Arbeitsschritte zur Durchführung großtechnischer Spritzversuche wurden vollständig umgesetzt; die Arbeitsschritte konnten gemäß Plan erarbeitet werden. Es kam zu inhaltlichen Erweiterungen, jedoch zu keinen negativen Abweichungen:

- Erweiterung des Versuchsspektrums auf sehr hohe Fasergehalte (bis 160 kg/m<sup>3</sup>),
- Aufnahme von Kunststoff-Makrofasern als zusätzliche Variante,
- systematische Verknüpfung materialtechnischer Kennwerte mit ökologischen Kennzahlen (z. B. GWP pro J Energieaufnahme bzw. pro MPa Druckfestigkeit).

Diese Erweiterungen erhöhen die Aussagekraft des Arbeitspakets und ändern die grundlegende Planung nicht. Teilanalysen – insbesondere detaillierte Auswertungen der Bruchbilder (Biegung vs. Durchstanzen), die umfassende Auswertung der  $\mu$ CT-Ergebnisse und die Übertragung der Erkenntnisse in Bemessungskonzepte für dauerhafte Spritzbetonschalen – werden im nächsten Projektjahr vertieft.

Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets „Spritztechnologie, Auftrag, Verarbeitbarkeit“ wird mit 100 % eingeschätzt.

### 2.7. Prüfverfahren und Festbetoneigenschaften

**Fertigstellungsgrad: 100%**

Wie vorgesehen bestand die zentrale Aufgabe dieses Arbeitspakets in der Bereitstellung der Prüfungsmethodik für die übrigen Arbeitspakete, insbesondere AP5 und AP6. Zur besseren Übersichtlichkeit sind die erzielten Ergebnisse (Festigkeit, Dauerhaftigkeit etc.) in den jeweils dazugehörigen Kapiteln (siehe oben) dargestellt. Der Fertigstellungsgrad des Arbeitspakets liegt bei 100 %, die geplanten Tätigkeiten konnten ohne wesentliche Abweichungen umgesetzt werden. Im 4. Forschungsjahr werden die bereits begonnenen laufenden Prüfungen fortgeführt.

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

Es traten keine wesentlichen Änderungen des Kostenanfalls auf. Naturgemäß tragen die beteiligten Industriepartner unterschiedliche InKind-Leistungen je nach konkreten Aktivitäten im laufenden Projektjahr.

Wie auch im ersten Forschungsjahr, wurde beim Projektpartner TBA Zams kein Großspritzversuch durchgeführt. Insgesamt ergibt sich dadurch eine Kostenumschichtung von gesamt € 8.000,- von der TBA Zams auf folgende wissenschaftliche Partner, die aufgrund von anderen Versuchen Mehrkosten hatten:

- + TU Graz - Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung (€ 3.000,-)
- + Leopold Franzens-Universität Innsbruck - Fakultät für Technische Wissenschaften (€ 2.000,-)
- + TU Graz - Institut für Angewandte Geowissenschaften (€ 3.000,-)

### 4. Beitrag der Projektergebnisse zur Nachhaltigkeit

Die konsequente Umsetzung der Forschungsergebnisse ermöglicht eine deutliche Reduktion der spezifischen Treibhausgasemissionen von Spritzbeton. Diese Verbesserungen werden durch Lebenszyklusbewertungen bzw. Lebenszykluskostenanalysen der entwickelten Spritzbetonrezepturen quantifizierbar und in einem eigenen Arbeitspaket behandelt (siehe Kapitel 2.3).

Die Projektergebnisse tragen messbar zu ökologischer, sozialer und wirtschaftlicher Nachhaltigkeit bei:

- **Ökologie:** Die CO<sub>2</sub>-Intensität des Spritzbetons konnte gegenüber einer typischen Referenzrezeptur deutlich gesenkt werden; insgesamt wird eine Reduktion von beispielsweise rund 480 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> auf rund 280 kg CO<sub>2</sub>e/m<sup>3</sup> erzielt. Ermöglicht wird dies durch geringere Bindemittelgehalte, CO<sub>2</sub>-effiziente Bindemittel mit kalzinierten Tonen und Siderit sowie praxisnah demonstrierten Klinkerersatz bis CEM II/C. Zusätzlich ermöglichen die erzielten Leistungszugewinne eine materialsparendere Ausführung.
- In weiterer Folge ergeben sich soziale und ökonomische Vorteile: Die längere Nutzungsdauer und der geringere Erhaltungsaufwand reduzieren gefährliche Arbeiten und erhöht die Verfügbarkeit kritischer Infrastruktur für die Bevölkerung. Außerdem wird die heimische (Spritzbeton-)Baubranche gestärkt, indem die Forschungserkenntnisse internationale Wettbewerbsvorteile schaffen können.

Die genannten Ergebnisse leisten konkrete Beiträge zur Abschwächung sowie Anpassung an die Auswirkungen des Klimawandels: verbesserte Rezepturen erlauben deutlich CO<sub>2</sub>-ärmere Spritzbeton-Bauwerke, während die Widerstandsfähigkeit und Verfügbarkeit der Bauwerke (z.B. Tunnels) die Resilienz der Infrastruktur erhöht und sie gegenüber klimarelevanten Beanspruchungen (z.B. erhöhte Karbonatisierung und Auslaugung durch Klimaveränderungen) stärkt.

In 5 Jahren nach Projektabschluss sind bei Umsetzung der erarbeiteten Rezepturen, Methoden und Leitfäden folgende Nachhaltigkeitseffekte zu erwarten:

**Ökologie und Ökonomie:** Zusammen ermöglichen die demonstrierten Verbesserungen (Klinkerersatz, geringere Bindemittelgehalte, erhöhte Leistungsfähigkeit) eine CO<sub>2</sub>-Reduktion von etwa 50% gegenüber herkömmlichen Spritzbetonanwendungen, wobei ein Einsatz der entwickelten Rezepturen aufgrund der bereits erfolgten Großversuche im praktischen Maßstab innerhalb von fünf Jahren realistisch ist. Die Erkenntnisse bezüglich Lebenszyklusbewertung können im selben Zeitraum Eingang in Ausschreibungen finden und als Entscheidungsunterstützung für Ausschreiber, Planer und Baufirmen dienen.

Skalierung und Verstetigung: Ergebnisse und Berichte werden branchenseitig verbreitet und tragen zur Standardisierung bei. Die Übernahme der Projektergebnisse in Richtlinien (z.B. einer Überarbeitung der ÖBV Richtlinie „Spritzbeton“ bzw. ergänzende Merkblätter) und eine breite wissenschaftliche Dissemination sichern die Implementierung in der Branche innerhalb von fünf Jahren und damit die Verstetigung der genannten Effekte.