

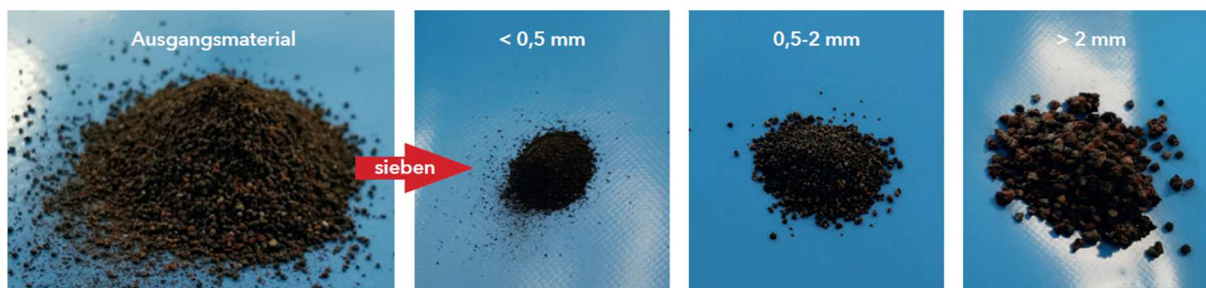
## SACHBERICHT TEIL II: EINGEHENDE DARSTELLUNG

|                      |   |
|----------------------|---|
| Bündnis:             | rECOMine  |
| Verbundprojekt:      | Waelue – Wertstoffgewinnung aus Walue-Schlacken   |
| Teilprojekt:         | Materialuntersuchung und –entwicklung zur Herstellung alkalisch aktivierter Bindemittel aus Waelue-Schlacke – AWAS  |
| Förderkennzeichen:   | 03WIR1914B  |
| Projektlaufzeit:     | 01.01.2023 bis 31.12.2025   |
| Berichtspflichtiger: | Steinbeis-Innovation gGmbH<br>Adornostraße 8, 70599 Stuttgart für<br>Steinbeis-Innovationszentrum FiberCrete<br>Otto-Schmerbach-Straße 19<br>09117 Chemnitz |
| Projektleitung:      | Henrik L. Funke<br>Tel.: 0371-531-38995<br>henrik.funke@stw.de  |

- die wichtigsten Inhalte

### AP 3: Verwertungskonzept der festen Rückstände

Innerhalb der 3. Arbeitspakts erfolgte die Anforderungsanalyse sowie die Charakterisierung der festen Rückstände.



**Abb. 1:** Wälzschlacke vor und nach Aufbereitung

Hierzu sind unter anderem die Rohdichte mittels Pyknometer sowie nach dem archimedischen Prinzip bestimmt worden (Abb. 2). Ferner erfolgten Eluatanalysen zur Bestimmung relevanter Materialwerte, wie z. B. pH-Wert, elektrische Leitfähigkeit und Schwermetallkonzentrationen (Abb. 2, rechtes Bild).

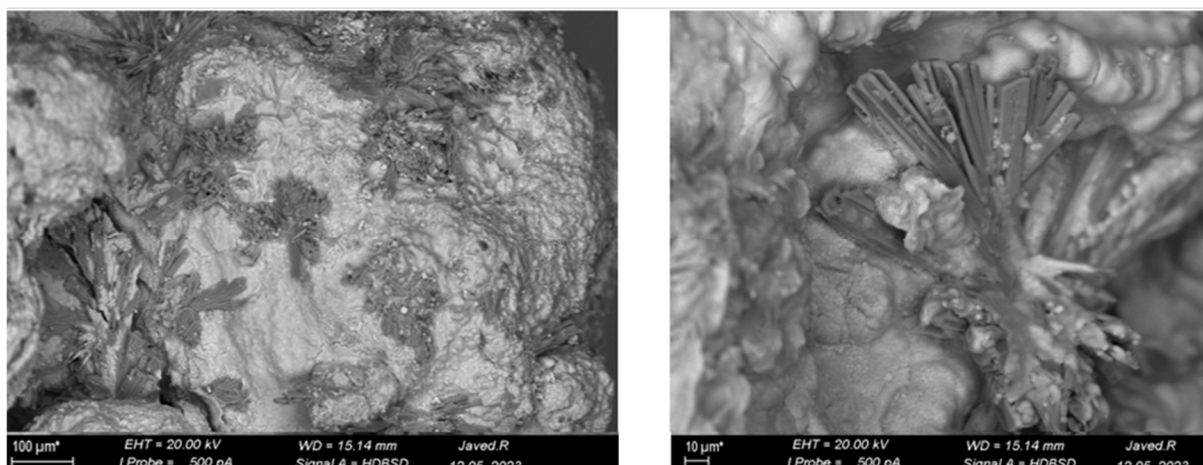


**Abb. 2:** Bestimmung der Rohdichte (linkes und mittleres Bild) sowie Eluatanalyse (rechtes Bild)  
Basierend auf den ermittelten Materialwerten (Tab. 1) kann Wälzschlacken in die Kategorie  
Stahlwerksschlacke der Klasse 2 (SWS-2) der Ersatzbaustoffverordnung eingeordnet werden.

**Tab. 1:** Rasterelektronenmikroskopie Wälzschlacke mit klar erkennbaren eisenhaltigen Phasen

| Parameter                               | Einheit           | Fraktion 1         | Fraktion 2 | Fraktion 3 | Gesamt | Materialwert |       |
|---|-------------------|--------------------|------------|------------|--------|--------------|-------|
|   |                   |                    |            |            |        | SWS-1        | SWS-2 |
| Eluatherstellung, Perkolationsverfahren | WF-Verhältnis 2/1 | DIN 19528; 2009-01 |            |            |        |              |       |
| pH-Wert                                 |                   | 11,5               | 11,4       | 11,4       |        | 9 - 13       |       |
| Elektrische Leitfähigkeit               | µS/cm             | 5130               | 2040       | 1256       |        | 10.000       |       |
| Chlorid                                 | mg/l              | 196                | 40,1       | 16,5       | 51,86  |              |       |
| Sulfat                                  | mg/l              | 1991               | 653        | 322        | 684    |              |       |
| Fluorid                                 | mg/l              | 0,97               | 1,15       | 1,56       | 1,34   | 1,1          | 4,7   |
| DOC                                     | mg/l              | 1,85               | 1,08       | 0,638      | 0,96   |              |       |
| Antimon                                 | µg/l              | < 5                | 7          | 6          | 5,36   |              |       |
| Arsen                                   | µg/l              | 3                  | < 2        | 2          | < 2    |              |       |
| Blei                                    | µg/l              | < 5                | < 5        | < 5        | < 5    |              |       |
| Cadmium                                 | µg/l              | < 1                | < 1        | < 1        | < 1    |              |       |
| Chrom, ges.                             | µg/l              | < 3                | < 3        | < 3        | < 3    | 110          | 190   |
| Kupfer                                  | µg/l              | < 5                | < 5        | < 5        | < 5    |              |       |
| Molybdän                                | µg/l              | 1500               | 557        | 309        | 571    | 55           | 400   |
| Nickel                                  | µg/l              | < 5                | < 5        | < 5        | < 5    |              |       |
| Vanadium                                | µg/l              | 48                 | 35         | 42         | 41     | 180          | 450   |
| Zink                                    | µg/l              | < 10               | < 10       | < 10       | < 10   |              |       |

Auf Basis dieser Ergebnisse erfolgte die Definition von Anforderungen an die aufbereitete Value-Schlacke, damit diese für die alkalische Anregung zur Herstellung von Schachtunterteilen Verwendung finden konnte. Dazu wurden anhand von Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskop Phasenbestandteile analysiert und für die geplante Anwendung bewertet (Abb. 3). Anhand von rasterelektronenmikroskopischen Untersuchungen konnte eine Abschirmung der reaktiven Belit-Kristalle durch eisenreiche Phasenbestandteile – insbesondere Wüstit – detektiert werden.



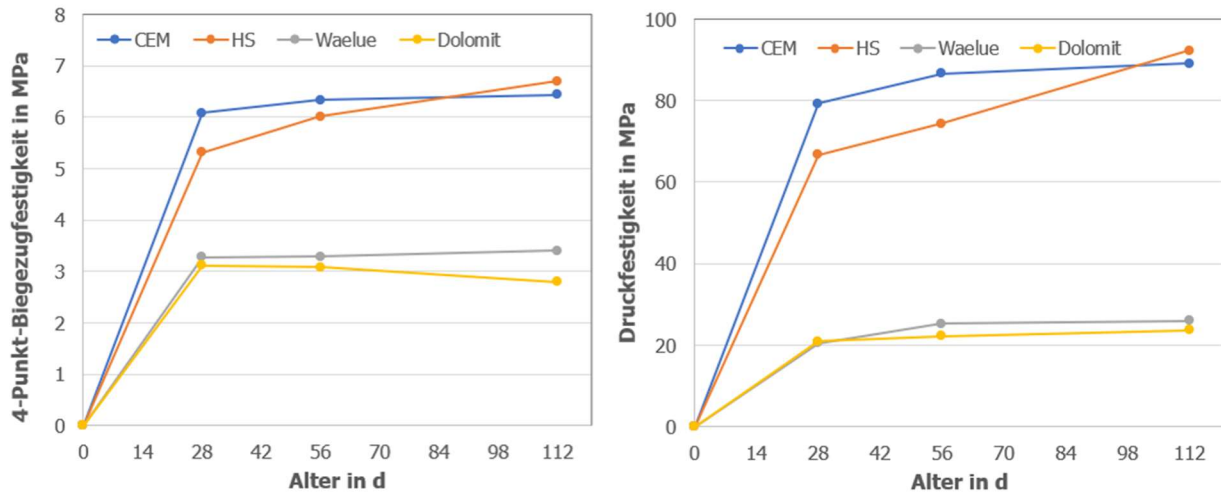
**Abb. 3:** Rasterelektronenmikroskopie Wälzschlacke mit klar erkennbaren eisenhaltigen Phasen  
Darüber hinaus erfolgte die material- und anwendungsgerechte Erforschung einer zementfreien alkalisch aktivierten Walue- Schlacke. Hierzu sind zunächst Versuche mittels Feinmahlung und Sinterung durchgeführt worden, sodass eine Reaktivierung der festigkeitsbildenden Phasenbestandteile hervorgerufen werden sollte. Diese aufbereitete Wälzschlacke wurde mit der Mischung aus Tab. 2 untersucht und mit latent-hydraulischem Hüttensandmehl und inertem Kalksteinmehl verglichen (Tab. 2).

**Tab. 2:** Qualitative und quantitative Zusammensetzung der Betonmischungen im 1. Projektjahr

|                      | CEM  | Hüttensand | Wälzschlacke | Dolomit |
|----------------------|------|------------|--------------|---------|
| Zement               | 450  | 225        | 225          | 225     |
| Wasser               | 225  | 225        | 225          | 225     |
| Quarzsand 0,1-2,0 mm | 1350 | 1350       | 1350         | 1350    |
| Hüttensandmehl       | -    | 225        | -            | -       |
| Wälzschlacke         | -    | -          | 225          | -       |
| Marmormehl           | -    | -          | -            | 225     |
| w/b                  | 0,50 | 0,50*      | 0,50         | 1,00**  |

Im Ergebnis stand im ersten Projektjahr eine geringe Reaktivität der aufbereiteten Schlacke, sodass diese lediglich begrenzt alkalisch für ein zementfreies System angeregt werden konnte (Abb. 4). Im Vergleich zu Hüttensandmehl konnten die angestrebten Reaktivitäten nicht erreicht werden. Dabei lagen liegen die Druck- und Biegezugfestigkeiten nur geringfügig über den von inertem Dolomitmarmormehl. Als Schlussfolgerung wurde die Wälz-Schlacke deutlich feiner zerkleinert, wobei hier bis zu 11.000 cm<sup>2</sup>/g (Blaine-Feinheit) angestrebt worden sind. Mit diesen Feinheiten wurde untersucht, inwiefern eine Trennung der reaktiven

Phasenbestandteile von den metallhaltigen Phasen nach der Feinstmahlung erfolgte und damit eine Reaktivierung möglich ist.

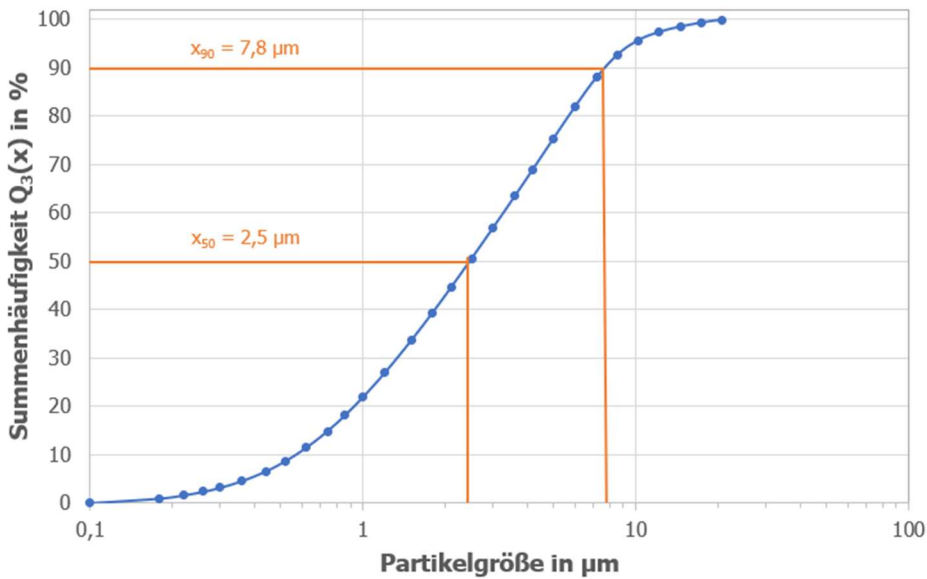


**Abb. 4:** Zeitliche Entwicklung der 4-Punkt-Biegezug- (linkes Bild) und Druckfestigkeit mit verschiedenen Bindemittelsystemen (CEM: Portlandzement, HS: Hüttensandmehl, Waelue: Wälzschlacke, Dolomit: Dolomitmarmormehl) bei einem Wasserbindemittelwert von 0,50

Im Anschluss daran erfolgte die Feinstmahlung bis 11.000 cm<sup>2</sup>/g feingemahlen (siehe Abb. 5 und Abb. 6).



**Abb. 5:** Zerkleinerung der Wälzschlacke im Backenbrecher (anschließende Feinstmahlung erfolgte einer Planetenkugelmühle)



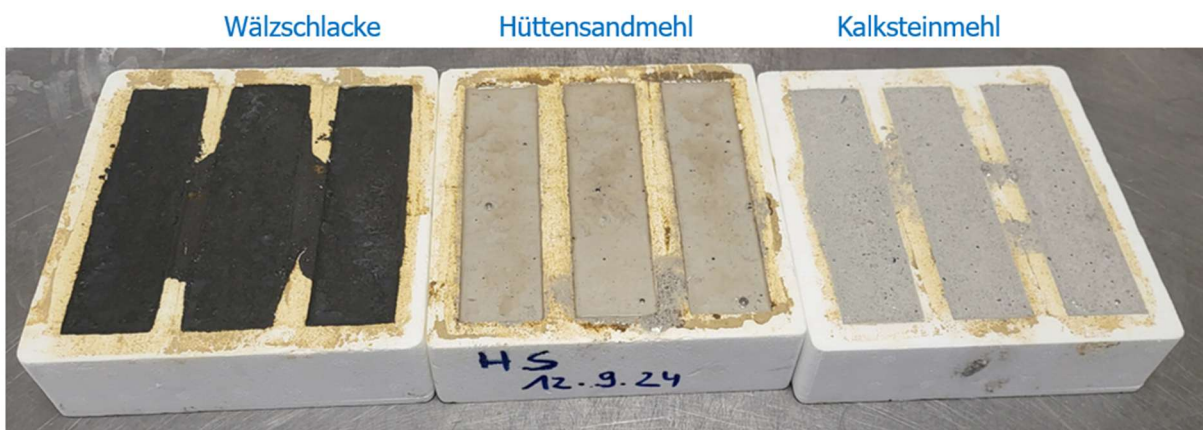
**Abb. 6:** Partikelgrößenverteilungssumme der feingemahlene Wälzschlacke (Blaine: 5.560 cm<sup>2</sup>/g)

Mit den unterschiedlich feingemahlene Wälzschlacken wurden mit den in Tab. 3 enthaltenen Komponenten Probekörper zur Bestimmung der alkalischen Reaktivität hergestellt.

**Tab. 3:** Qualitative Zusammensetzung der alkalisch aktivierten Wälzschlacke

| Komponente       | Erläuterung       |
|------------------|-------------------|
| Kaliumsilikat    | Aktivatorlösung   |
| Kaliumhydroxid   |                   |
| Quarzsand 0/2 mm | Gesteinskörnungen |
| Quarzkies 2/5 mm |                   |
| Wälzschlacke     | Bindemittel       |

Dabei sind die Ergebnisse mit inerten sowie reaktiven Materialien verglichen worden (Abb.7).



**Abb. 7:** Alkalische Anregung der Wälzschlacke sowie vergleichende reaktive und inerte Materialien

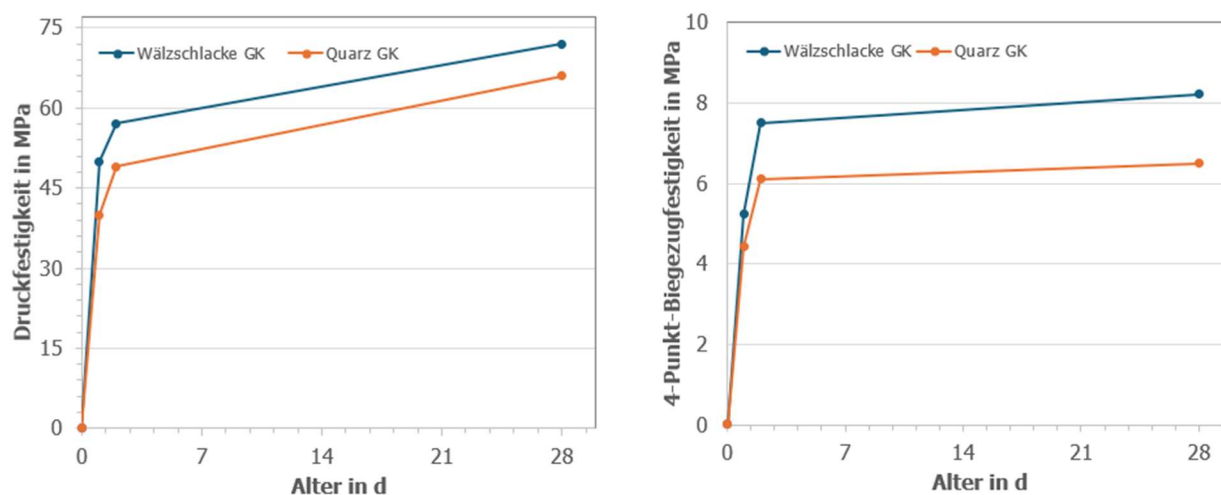
Trotz der unterschiedlichen Aufmahlung und Variation der Aktivatorlösung bzgl. der Konzentration konnte keine messbare Steigerung der Reaktivität der Wälzschlacke festgestellt werden. Die Wälzschlacke wurde im Folgenden als feine und grobe Gesteinskörnung für Beton

verwendet. Dazu wurden die Mischungen in Tab. 2. eingesetzt. Dabei ist die Wälzschlacke mit quarzitischen Gesteinskörnungen verglichen worden (siehe Tab. 4).

**Tab. 4:** Qualitative und quantitative Zusammensetzung der untersuchten Betonmischungen

| Komponente       | Wälzschlacke GK | Quarz GK |
|------------------|-----------------|----------|
| CEM I 52,5 N     |                 | 500      |
| Kalksteinmehl    |                 | 150      |
| Wälzschlacke     | 1780            | -        |
| Quarzsand 0/2 mm | -               | 840      |
| Quarzkies 2/5 mm | -               | 600      |
| Fließmittel      |                 | 5,0      |
| Wasser           |                 | 230      |
| w/z              |                 | 0,46     |

Die Ergebnisse der zeitabhängigen Druck- und 4-Punkt-Biegezugfestigkeiten sind in Abb. 8 dargestellt. Im Ergebnis zeigt die Wälzschlacke sowohl bei der Druck- als auch bei der 4-Punkt-Biegezugversuch stets höhere Festigkeiten als die Probe mit den quarzitischen Gesteinskörnungen (vgl. Abb. 8).



**Abb. 8:** Entwicklung der Druck- (linkes Bild) und Biegezugfestigkeit (rechtes Bild) von Wälzschlacke und Quarz als Gesteinskörnungen

Im letzten Projektjahr sind weitere Chargen der Wälzschlacke fortlaufend untersucht worden. Dabei haben sich die Chargen zum Teil signifikant bzgl. ihrer Struktur und Morphologie voneinander unterschieden (vgl. Abb. 9). Hierzu zeigten die Chargen aus dem letzten Projektjahr eine glasig-amorphe Struktur, wohingegen bei den älteren Chargen eine kristalline Struktur sichtbar war.



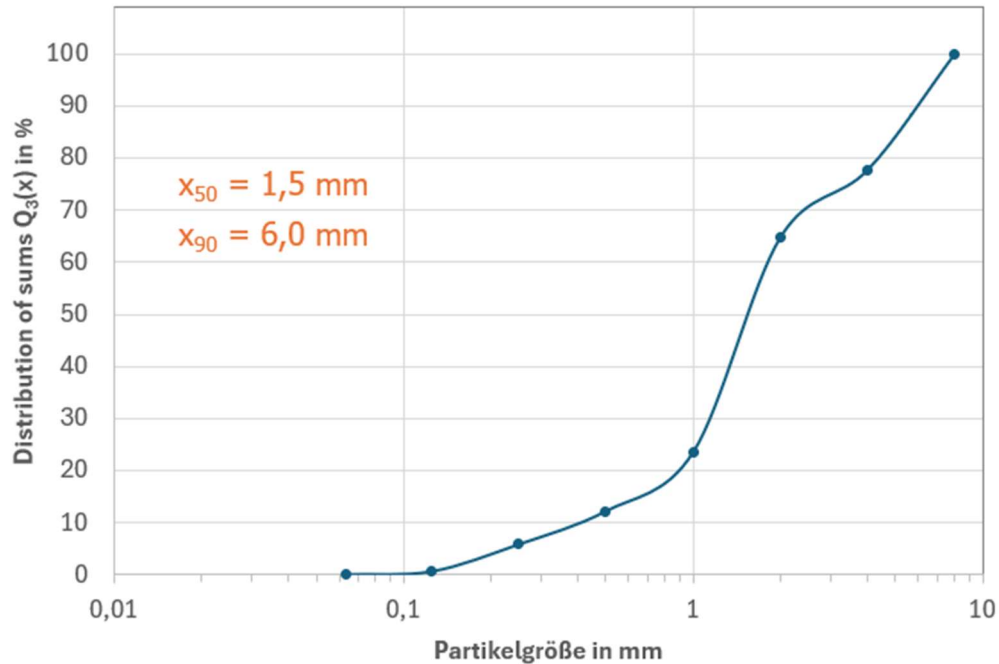
**Abb. 9:** Wälzschlacke aus dem letzten Projektjahr (linkes Bild) und Wälzschlacke aus dem zweitem Projektjahr (rechtes Bild)

Für die Herstellung von hochchemisch belasteten Schachtringen im Labormaßstab wurde die Wälzschlacke nach der Wertmetallgewinnung auf eine Korngröße von 0 bis 2 mm mittels Backenbrecher zerkleinert (Abb. 10).



**Abb. 10:** Aufgabegut (linkes Bild), zerkleinerte Probe (mittiges Bild) und zerkleinerte Probe im Vergleich zum Aufgabegut (rechtes Bild)

Die Partikelgrößenanalyse – Lasergranulometrie (Laserbeugung) und die Dynamische Bildanalyse (DIA) – nach der Zerkleinerung ist in Abb. 11 dargestellt. Die mittlerer Korngröße ( $x_{50}$ ) und der  $x_{90}$ -Wert lagen bei 1,5 mm bzw. 6,0 mm (Abb. 11) und damit höher als die angestrebte maximale Korngröße von 2 mm, was auf die Zerkleinerungstechnik des Backenbrechers zurückzuführen ist.



**Abb. 11:** Partikelgrößenanalyse mittels Lasergranulometrie (Laserbeugung) und die Dynamische Bildanalyse (DIA)

#### AP 4: Ökonomische und ökologische Betrachtung

Auf Basis der zerkleinerten Wälzschlacke und den abgeschlossenen Untersuchungen aus dem dritten Arbeitspaket erfolgte die Herstellung von hochchemisch belasteten Schachtringen im Labormaßstab sowie die Gesamtbewertung. Hierzu wurde eine additive Wälzschlackenmischung entwickelt und getestet (Abb. 12).



**Abb. 12:** Materialentwicklung Wälzschlackenmischung zur Anwendung der additiven Fertigung von Schachtringen

Mit dieser Wälzschlackenmischung erfolgte die additive Fertigung von zwei Schachtringen (50 Breite und 80 cm Höhe), wobei diese nach der Herstellung im erstarrten Zustand für eine Nut-Feder-Verbindung gefräst wurden (Abb. 13).



**Abb. 13:** Additiv gefertigte Schachtringe mit Wälzschlackenmischung im erstarrten und gefrästen Zustand

Mit der Nut-Federverbindung können die Schachtunterteile norm- und praxisgerecht gestapelt werden (Abb. 14). Diese Passform gewährleistet, dass die Ringe beim Stapeln exakt übereinander liegen und nicht verrutschen können, was die Stabilität des gesamten Schachtbauwerks erhöht.



**Abb. 14:** Additiv gefertigte Schachtringe im ausgehärteten Zustand

Im Ergebnis kann die Wälzschlacke als Baustoff für die Herstellung von hochchemisch belasteten Schachtteilen verwendet werden.

- die wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises  
Pos. 0812 (Wiss. MA): 218.800,00 EUR / Plan: 218.800,00 EUR  
Pos. 0835 (LD): 35.700,00 EUR / Plan: 35.700,00 EUR  
Pos. 0843 (Material): 43.536,60 EUR / Plan: 43.536,60 EUR

- die Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Projektarbeiten

Betonfertigteile auf Zementbasis sind seit Jahrzehnten im Bauwesen etabliert. Bedingt durch die Rohstoffverknappung von latent-hydraulischen Zusatzstoffen und der zunehmenden Forderung nach Ressourceneinsparungen eröffnen sich im Hinblick auf die Verwendung von alkalisch aktivierten Bindemitteln auf Basis von Wälder-Schlacken neue Möglichkeiten innerhalb der Betonfertigteile- und Zementindustrie mit einhergehender Ressourcenschonung und Erweiterung der Bauteilfunktionalitäten. Die Konkurrenzfähigkeit gegenüber bestehenden Schachtunterteilen aufzubauen ist hierbei die treibende Kraft. Vergleichbare wirtschaftliche Lösungen der angestrebten Materialkombinationen auf Basis der Wälder-Schlacke existieren gegenwärtig nicht. Die fachliche und methodische Kompetenz des SIZ FiberCrete in der Realisierung solcher Projekte, sowie die vorhandene Labor- und Prüftechnik, hat eine außerordentliche Wichtigkeit für die Umsetzung der Forschungsaufgaben. FiberCrete führte innerhalb des Forschungsvorhabens ausschließlich nichtwirtschaftliche Tätigkeiten durch und war auf die Finanzierung der personellen und materialtechnischen Projektausgaben über Drittmittel angewiesen, um die Arbeiten zur Zielstellung voranzutreiben; parallel und unabhängig zum Tagesgeschäft. FiberCrete erhält keine Grundfinanzierung und benötigt für die Bearbeitung des Teilvorhabens Drittmittel.

Der Antragsteller hat alternative Fördermöglichkeiten zur Verringerung der beantragten Zuwendung an Bundesmitteln geprüft mit dem Ergebnis, dass keine alternativen Fördermöglichkeiten für das Vorhaben möglich waren.

Für das Vorhaben konnten weder ausschließlich oder ergänzend Fördermittel der EU in Anspruch genommen werden.

- der voraussichtliche Nutzen, insbesondere die Verwertbarkeit des Ergebnisses - auch konkrete Planungen für die nähere Zukunft - im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Wälder-Schlacke nach der Wertmetallgewinnung hat eine grundsätzliche Eignung als Gesteinskörnung für Beton. Dementsprechend ist eine Verwertung der Ergebnisse in Hinblick auf die Verwendung als Baustoff gegeben. Hierzu sind weitere regulatorische Schritte bzgl. der normgerechten Verwendung erforderlich.

- der während der Durchführung des Vorhabens dem

Zuwendungsempfänger bekannt

gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Es sind inzwischen von dritter Seite keine FE-Ergebnisse bekannt geworden, die für die Durchführung des Vorhabens relevant waren.

- die erfolgten oder geplanten Veröffentlichungen des Ergebnisses nach Nr. 5 der NKBF/NABF  
Eine Veröffentlichung der Ergebnisse wurde mehrere Konferenzen und Journals durchgeführt.  
Des Weiteren sind mehrere Ausstellungen und Messebesuche vorgesehen. Folgende Beiträge sind zum Abschluss des Projekts veröffentlicht worden:

- AAWS: innovativ und klimaschonend: <https://transfermagazin.steinbeis.de/?p=14849>
- Zementfreier Beton für Schachtunterteile: <https://www.cpi-worldwide.com/de/flips/2024/1>
- Construction Materials from Tailings: ReMining 2025