ReMin – Verbundvorhaben 033R262

Stahlwerksschlacke als Bindemittel für geotechnische Baustoffe

Teil I - Kurzbericht

Verbundpartner:

STUVA e. V.
Mathias-Brüggen-Str. 41
50827 Köln

FEhS – Institut für Baustoffforschung e. V.
Bliersheimer Str. 62
47229 Duisburg

MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG
Am Kruppwald 1-8
46238 Bottrop

PORR GmbH & Co. KGaA
Franz-Rennefeld-Weg 4
40472 Düsseldorf

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Vorhabenlaufzeit: 01.02.2021 – 31.07.2024

I.1 Aufgabenstellung und Stand der Technik bei Vorhabensbeginn

Die Bauwirtschaft hat eine hohe Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen. Gleichzeitig entstehen in anderen Industriezweigen mineralische Nebenprodukte wie Schlacken oder Aschen. Im Sinne einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist anzustreben, diese als Sekundärrohstoff in Baustoffen einzusetzen. Schlacken entstehen als Nebenprodukt bei der Herstellung von Metallen, wie die Hochofenschlacke bei der Erzeugung von Roheisen oder die Elektroofenschlacke bei der schrottbasierten Stahlherstellung. In den letzten Jahren sind mit dem Ziel die mit hohen CO_2 Emissionen behafteten Portlandzementklinker teilweise oder vollständig zu substituieren, alkali-aktivierte Bindemittel in den Fokus gerückt. Bei diesen wird durch Zugabe eines hochalkalischen Aktivators zu einem Precursor (Schlacke, Asche, natürliches Gestein) ebenfalls eine Festigkeits-entwicklung initiiert.

Vor diesem Hintergrund verfolgte das Projekt SABINE das Ziel, alkaliaktivierte Bindemittel auf Basis von Stahlwerksschlacken zu entwickeln, die für Einsatzbereiche in der Geotechnik mit geringeren Festigkeitsanforderungen geeignet sind. Mögliche Anwendungsfälle sind Ringspaltmörtel für den maschinellen Tunnelvortrieb, Dichtwände und Flüssigböden, da hier geringere Festigkeiten als bei Konstruktionsbeton gefordert werden.

I.2 Überblick zur Planung und zum Ablauf des Vorhabens

Zu Beginn des Projekts wurde als Basis für alle nachfolgenden Arbeiten ein umfassendes „Anforderungsprofil“ erstellt. Im Zuge der „Schlackenaufbereitung“ wurde die Frage behandelt, wie aus Stahlwerksschlacken ein Bindemittel hergestellt werden kann, das über eine für die alkalische Aktivierung ausreichende Feinheit verfügt. Daran anschließend wurde der Themenkomplex „Bindemittelaktivierung“ bearbeitet, um zu klären mit welchen Stoffen eine zielgerichtete und wirtschaftliche Aktivierung der gemahlenen Stahlwerksschlacken möglich ist. Darauf aufbauend wurden Einsatzbereiche für innovative „Geotechnischen Baustoffe“ aufgezeigt und baustoff-technologische Mischungsentwürfe erarbeitet.

I.3 Wesentliche wissenschaftlich-technische Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens SABINE wurde die alkalische Aktivierbarkeit von Elektroofenschlacken (EOS) in einem typischen geotechnischen Mörtelsystem untersucht. Im Mittelpunkt standen dabei prozesstypische kristalline Schlacken. Versuchsweise wurden auch eine mit Hilfe einer Laborgranulationsanlage im Stahlwerk erzeugte, überwiegend glasig vorliegende EOS sowie eine betrieblich granulierte CUS in das Versuchsprogramm einbezogen.

In umfangreichen Tastversuchen und anschließenden systematischen Versuchsreihen wurden die relevanten Eigenschaften sowohl der Ausgangsstoffe als auch der resultierenden Baustoffe detailliert untersucht. Ein besonderer Fokus lag auf der Festigkeitsentwicklung der erzielten Materialien. Dabei wurden die folgenden Einflussparameter systematisch variiert:

- Ausgangsstoff: Untersuchung unterschiedlicher Schlackentypen (z. B. EOS, CUS).
- Schlackeaufbereitung: Analyse der Effekte verschiedener Mahlverfahren und der erzielten Mahlfeinheit.
- Einfluss unterschiedliche Behandlungsverfahren zur Optimierung (Sandbehandlung).

- Alkalische Aktivatoren: Einsatz und Variation verschiedener Aktivatoren, wie Natriummetasilikat, Kaliumsilikat und weiterer Verbindungen.
- Rezepturvariationen: Anpassung der Mischungsverhältnisse bezüglich Schlackegehalt, Aktivatorgehalt, Wassergehalt sowie dem Einsatz von Betonzusatzmitteln (z. B. Flugascheanteil) und Betonzusatzstoffen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass erwartungsgemäß die untersuchten Mörtel mit amorpher Elektroofenschlacke mit im Einzelfall bis zu 50 MN/m² im Referenzalter von 28 Tagen eine deutlich höhere Festigkeit entwickelten als beim Einsatz kristalliner Schlacke, hier waren es im Einzelfall bis zu ca. 20 MN/m². Damit zeichnet sich in der Gesamtbewertung ab, dass Elektroofenschlacke für die im Rahmen des Projekts SABINE fokussierten geotechnischen Baustoffe potenziell geeignet ist. Es zeigte sich jedoch auch, dass die konkrete mineralogische Zusammensetzung einen maßgeblichen Einfluss auf die Aktivierbarkeit und damit die Festigkeit hat. Kristalline Schlacken zeigen diesbezüglich größere Schwankungen als amorphe. Bei kristallinen Schlacken ist nicht nur in Einzelfällen keine Festigkeitsentwicklung zu verzeichnen. Dagegen weisen wassergranulierte EOS und Kupferschlacke (CUS) eine ausreichende bis gute Aktivierbarkeit und damit Festigkeit auf.

Für eine großtechnische Nutzung kommt daher auf Grundlage der Erkenntnisse aus SABINE nur amorphe Elektroofenschlacke infrage. Diese ist jedoch nach dem derzeitigen Stand der Technik noch nicht industriell verfügbar. Eine erste hierfür erforderliche Wassergranulationspilotanlage befindet sich mit Stand Ende 2024 noch in der Projektierung. Dagegen ist Kupferschlacke (CUS) in granulierter Form, d.h. amorph bereits großmaßstäblich verfügbar.

Das Forschungsprojekt SABINE hat das im Projektantrag formulierte Ziel, mit nicht wassergranulierter Schlacke für ausgewählte geotechnische Anwendungen ausreichende Festigkeiten zu erreichen verfolgt. Aufgrund der genannten Erkenntnisse und Randbedingungen wurde das Betrachtungsspektrum im Projektverlauf um zusätzlich um amorphe EOS (Labormaßstab) und CUS erweitert.

Eine detaillierte Darstellung der durchgeführten Arbeiten und erzielten Ergebnisse ist im Schlussbericht Teil II veröffentlicht.

I.4 Zusammenarbeit mit anderen Forschungseinrichtungen/Stellen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde eine enge Zusammenarbeit zwischen den Projektpartnern aus der Forschung FEhS Stahl, STUVA (Bauwesen) mit den Industriepartnern MC-Bauchemie und PORR (Bauunternehmen) erreicht. Ergänzt wurde diese durch die intensive Unterstützung des assoziierten Partners GMH (Stahlwerk), der die benötigten Schlacken zur Verfügung stellte, sowie der KHD, die die industrielle Aufbereitung durchführte.

ReMin – Verbundvorhaben 033R262

Stahlwerksschlacke als Bindemittel für geotechnische Baustoffe

Abschlussbericht

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren

Verbundpartner:

STUVA e. V.
Mathias-Brüggen-Str. 41
50827 Köln

FEhS – Institut für Baustoff-Forschung e. V.
Bliersheimer Str. 62
47229 Duisburg

MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG
Am Kruppwald 1-8
46238 Bottrop

PORR GmbH & Co. KGaA
Franz-Rennefeld-Weg 4
40472 Düsseldorf

Vorhabenlaufzeit: **01.02.2021 – 31.07.2024**

GEFÖRDERT VOM

Bundesministerium für Bildung und Forschung

1. Überblick Forschungsprojekt „SABINE“

1.1 Ausgangssituation und Motivation

Die Bauwirtschaft hat eine hohe Nachfrage nach mineralischen Rohstoffen. Gleichzeitig entstehen in anderen Industriezweigen mineralische Nebenprodukte wie Schlacken oder Aschen. Im Sinne einer ressourceneffizienten Kreislaufwirtschaft ist es Ziel, diese als Sekundärrohstoff in Baustoffen einzusetzen.

Schlacken entstehen als Nebenprodukt bei der Herstellung von Metallen, wie die Hochofenschlacke bei der Erzeugung von Roheisen oder die Elektroofenschlacke bei der schrottbasierten Stahlherstellung. Die Schlacken unterscheiden sich sowohl chemisch als auch mineralogisch deutlich.

Vor dem Hintergrund der großen Mengen an CO_2, die bei der Herstellung insbesondere von Portlandzementen freigesetzt werden (rd. 8 % der weltweiten anthropogenen Emissionen[1,2]), gewinnen Bindemittel, in denen Portlandzementklinker teilweise oder vollständig substituiert wird, zunehmend an Bedeutung. Heute werden verbreitet – je nach Verfügbarkeit – industrielle Nebenprodukte, wie Steinkohlenflugasche aus Kraftwerken und Hüttensand aus der Roheisenerzeugung, erfolgreich als Klinkersubstitut eingesetzt[3]. Mit ihnen können hochwertige Bindemittel, Mörtel, Betone und andere Baustoffe hergestellt werden, welche die Dauerhaftigkeit (v. a. Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Angriffen durch Säuren und Sulfate) von reinen portlandzementbasierten Systemen teilweise sogar übertreffen[4]. Dies ist gerade für geotechnische Baustoffe von Interesse, da diese ggf. permanent im Kontakt mit geogen bedingten schädigenden Einwirkungen stehen, beispielsweise durch Sulfate im Grundwasser.

In den letzten Jahren sind alkaliaktivierte Bindemittel in den Fokus gerückt. Bei diesen wird durch Zugabe eines hochalkalischen Aktivators zu einem Precursor (Schlacke, Asche, natürliches Gestein) ebenfalls eine Festigkeitsentwicklung initiiert. Diese Systeme sind als sehr komplex zu bewerten. Daher wurde das Ziel, alkaliaktivierte Bindemittel auf Basis von Stahlwerksschlacken zu entwickeln, die in ihren Festigkeits- und Verarbeitungseigenschaften mit herkömmlichen Zementen vergleichbar und robust sind, bei Vorhabensbeginn im Jahre 2021 nicht erreicht.

Neben der Anwendung als Konstruktionsbaustoff gibt es jedoch eine Vielzahl von Einsatzbereichen, in denen weniger hohe Anforderungen gestellt werden und die daher potentielle Anwendungsgebiete für alkaliaktivierte Stahlwerksschlacken sind. Hierzu zählen insbesondere geotechnische Einsatzbereiche, in denen lediglich eine geringe Festigkeit erforderlich ist. Hierzu zählen beispielsweise (siehe Bild 1):

---

[1] VDZ, Hrsg. Zementindustrie im Überblick 2022/2023. Düsseldorf, 2022. Verfügbar unter: https://vdz.info/ziue22
[2] Zero Carbon Industry Plan: Rethinking Cement should be attributed to Beyond Zero Emissions, ISBN 978-0-9923580-2-0
[3] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Monitoring-Abschlussbericht 1990-2012. Verminderung der CO_2-Emissionen. Düsseldorf, 2013
[4] Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau. Düsseldorf, 2008

- Ringspaltmassen, die im Zuge maschineller Tunnelvortriebe eingesetzt werden,
- Flüssigböden zum Verfüllen von Leitungsgräben,
- Dichtwandmassen für unterirdische Abdichtungs- oder Baugrubenwände.

Bild 1: Exemplarische Einsatzbereiche geotechnischer Baustoffe, links: Ringspaltmasse ; Mitte: Flüssigboden [FiFB]; rechts: Dichtwandmasse [Dyckerhoff]

1.2 Bezug des Vorhabens zu förderpolitischen Zielen

In der Förderbekanntmachung des BMBF vom 06. Dezember 2018 zum Thema „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)“ im Rahmenprogramm „Forschung für Nachhaltige Entwicklung – FONA³“, Bundesanzeiger vom 31.12.2018 ist unter Punkt 2.2 “Verwertung von mineralischen Stoffströmen: Baurestmassen, bergbauliche Rückstände, Aschen, Stäube, -Schlacken“ explizit als Gegenstand der Forschung genannt. Das Projekt SABINE nimmt dabei besonderen Bezug auf Stahlwerksschlacken für geotechnische Baustoffe, die ein vielversprechendes und im Kontext mit alkalischer Aktivierung bis dahin wenig erforschtes Einsatzgebiet darstellen.

1.3 Wissenschaftliche und / oder technische Arbeitsziele des Vorhabens

Im Rahmen des Projekts SABINE wurde untersucht, inwieweit gemahlene Stahlwerksschlacke in einer Weise aktiviert werden kann, um in geotechnischen Baustoffen verwendet werden zu können. Vorteil wäre, dass Portlandzement in großem Umfang vollständig ersetzt und gleichzeitig ein neues Anwendungsgebiet für Stahlwerksschlacken erschlossen würde. Deren jährliche Erzeugung beträgt in Deutschland (Stand 2023) rd. 4,4 Mio. Tonnen (in Europa rd. 18 Mio. Tonnen). Ihre bisherige Nutzung erfolgt primär als Gesteinskörnung im Verkehrswegebau und ist durch die Einführung der „Ersatzbaustoffverordnung“ im Jahr 2023 stark in Frage gestellt. Bereits im ersten Jahr seit Inkrafttreten der „Ersatzbaustoffverordnung“ ging die Verwendungsquote von Ersatzbaustoffen, wie z.B. Stahlwerksschlacken, im Verkehrswegebau trotz umfangreicher Baumaßnahmen zurück. Daraus erwächst zwangsläufig die Gefahr einer verstärkten Deponierung.

Im Rahmen des Projektes wurden alle wesentlichen Prozessschritte in der Verarbeitungskette bearbeitet:

- Stahl- und damit Schlackenerzeugung,
- Schlackenaufbereitung/Bindemittelherstellung,
- Bindemittelaktivierung,
- Verwendung als geotechnischer Baustoff.

1.4 Zusammenfassung wesentlicher erzielte Ergebnisse

Im Rahmen des Vorhabens SABINE wurde die alkalische Aktivierbarkeit von Elektroofenschlacken (EOS) in einem typischen geotechnischen Mörtelsystem untersucht. Im Mittelpunkt standen dabei prozesstypische kristalline Schlacken. Versuchsweise wurden auch eine mit Hilfe einer Laborgranulationsanlage im Stahlwerk erzeugte, überwiegend glasig vorliegende EOS sowie eine betrieblich granulierte CUS in das Versuchsprogramm einbezogen.

In umfangreichen Tastversuchen und anschließenden systematischen Versuchsreihen wurden die relevanten Eigenschaften sowohl der Ausgangsstoffe als auch der resultierenden Baustoffe detailliert untersucht. Ein besonderer Fokus lag auf der Festigkeitsentwicklung der erzielten Materialien. Dabei wurden die folgenden Einflussparameter systematisch variiert:

- Variation der Schlacke: Untersuchung unterschiedlicher Schlackentypen (z. B. EOS, CUS).
- Schlackeaufbereitung: Analyse der Effekte verschiedener Mahlverfahren und der erzielten Mahlfeinheit.
- Optimierung durch unterschiedliche Behandlungsverfahren (Sandbehandlung).
- Alkalische Aktivatoren: Einsatz und Variation verschiedener Aktivatoren, wie Natriummetasilikat, Kaliumsilikat und weiterer Verbindungen.
- Rezepturvariationen: Anpassung der Mischungsverhältnisse bezüglich Schlackegehalt, Aktivatorgehalt, Wassergehalt sowie dem Einsatz von Betonzusatzmitteln (z. B. Flugascheanteil) und Betonzusatzstoffen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass erwartungsgemäß die untersuchten Mörtel mit amorpher Elektroofenschlacke mit bis zu 50 MN/m² im Referenzalter von 28 Tagen eine deutlich höhere Festigkeit entwickelten als beim Einsatz kristalliner Schlacke, hier waren es im Einzelfall bis zu ca. 20 MN/m². Damit zeichnet sich in der Gesamtbewertung ab, dass Elektroofenschlacke für die im Rahmen des Projekts SABINE fokussierten geotechnischen Baustoffe potenziell geeignet ist. Es zeigte sich jedoch auch, dass die konkrete mineralogische Zusammensetzung einen maßgeblichen Einfluss auf die Aktivierbarkeit und damit die Festigkeit hat. Kristalline Schlacken zeigen diesbezüglich größere Schwankungen als amorphe. Bei kristallinen Schlacken ist nicht nur in Einzelfällen keine Festigkeitsentwicklung zu verzeichnen. Dagegen weisen wassergranulierte EOS und Kupferschlacke (CUS) eine ausreichende bis gute Aktivierbarkeit und damit Festigkeit auf.

Für eine großtechnische Nutzung kommt daher auf Grundlage der Erkenntnisse aus SABINE nur amorphe Elektroofenschlacke infrage. Diese ist jedoch nach dem derzeitigen Stand der Technik noch nicht industriell verfügbar. Eine erste hierfür erforderliche Wassergranulationspilotanlage befindet sich mit Stand Ende 2024 noch in der Projektierung. Dagegen ist Kupferschlacke (CUS) in granulierter Form, d.h. amorph bereits großmaßstäblich verfügbar.

Das Forschungsprojekt SABINE hat das im Projektantrag formulierte Ziel, mit nicht wassergranulierter Schlacke für ausgewählte geotechnische Anwendungen ausreichende Festigkeiten zu erreichen verfolgt. Aufgrund der genannten Erkenntnisse und Randbedingungen wurde das Betrachtungsspektrum im Projektverlauf um zusätzlich um amorphe EOS (Labormaßstab) und CUS erweitert.

Zentrale Erkenntnisse und Schlussfolgerungen

- Aktivierung und Eignung für Ringspaltmörtel:
  - Die alkalische Aktivierung von EOS und CUS konnte grundsätzlich nachgewiesen werden.
  - Es wurden ausreichende Festigkeiten für den Einsatz als Ringspaltmörtel im maschinellen Tunnelbau erzielt.
  - Veränderungen in der chemischen und mineralogischen Schlackenzusammensetzung sowie im Abkühlvorgang der flüssigen Schlacke haben einen maßgeblichen Einfluss auf die Aktivierbarkeit.
- Kristalline Elektroofenschlacke:
  - Während für die erste zur Verfügung gestellte Elektroofenschlacke (EOS 1) zumindest bei zementtypischer Feinheit von rd. 4600 cm²/g (Blaine) eine zufriedenstellende alkalische Aktivierung möglich war, war dies für alle weiteren untersuchten kristallinen EOS, unabhängig von ihrer Feinheit, nicht möglich.
  - Es konnte gezeigt werden, dass die zwischenzeitlich im Stahlwerk 1 betrieblich eingeführte Sandbehandlung der flüssigen Schlacke zwecks Optimierung ihres Auslaugverhaltens hinsichtlich der Anwendung im Verkehrswegebau zu einer signifikanten Veränderung der chemischen (niedrigere Basizität) und mineralogischen (deutlich niedrigerer Larnit-Gehalt) Zusammensetzung geführt hatte, so dass keine Vergleichbarkeit zur ersten Probe gegeben war. Jedoch ergaben auch weitere Versuche, bei denen im Stahlwerk auf die Sandbehandlung verzichtet und als primärer Einsatzstoff ein Schrottmix verwendet wurde, wie er bei der ersten Probe vorlag, keine vergleichbare Aktivierbarkeit.
  - Offensichtlich hängt die alkalische Aktivierbarkeit kristalliner EOS sehr sensibel von ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung ab. Da diese in der batchweisen Stahlproduktion sehr schwanken kann, je nach angestrebter Stahlqualität und damit verbundenem Schrottmix, und darüber hinaus die Abkühlbedingungen im Schlackenbeet variieren können, z.B. in Abhängigkeit von der Jahreszeit, ist kristalline EOS als Basis für alkaliaktivierte geotechnische Baustoffe nur unter Idealbedingungen nutzbar. In der industriellen Praxis hingegen ist kristalline EOS derzeit nicht zuverlässig aktivierbar und somit für die angestrebte praktische Anwendung nicht geeignet.
- (Teil-) Glasige Elektroofenschlacke:
  - Die alkalische Aktivierung von granulierter, d.h. mit Wasser abgeschreckter und zumindest in Teilen glasig vorliegender EOS, wurde in orientierenden Versuchen nachgewiesen.
  - Bisher existiert jedoch weltweit keine betriebliche Anlage, um flüssige Elektroofenschlacke durch Granulation in den Glaszustand zu überführen.
  - Sollten solche Anlagen künftig eingeführt werden, so wäre die Herstellung geotechnischer Baustoffe auf Basis weitgehend glasiger EOS denkbar.

- (Teil-) Glasige Kupferschlacke:
  - Betrieblich granulierte CUS konnte alkalisch aktiviert werden, so dass sie grundsätzlich für geotechnische Baustoffe geeignet erscheint.
  - Der größere Teil der in Deutschland erzeugten CUS wird nicht granuliert, sondern erstarrt in Stahlpfannen zu kristallinem Eisensilikatgestein[5].
  - Für die bereits heute granulierte CUS erscheint es sinnvoll, großtechnische Versuche zur Herstellung geotechnischer Baustoffe vorzunehmen.
- Weitere Aspekte:
  - Im Rahmen des Projekts konnte der exakte Zusammenhang zwischen den Produktionskenngrößen der kristallinen EOS und ihrer alkalischen (Nicht-) Aktivierbarkeit nicht abschließend aufgeklärt werden. Hier besteht weiterer Forschungsbedarf.
  - Gelänge es, diesen Zusammenhang aufzuzeigen und z.B. eine akzeptable Spannweite für die chemisch-mineralogische Schlackenzusammensetzung festzulegen, so könnte auch kristalline EOS als Ausgangsstoff geotechnischer Baustoffe von Interesse sein.
  - Voraussetzung hierfür wäre, dass die Spannweite nicht zu eng definiert werden muss (da dies betrieblich nicht einzuhalten sein dürfte) und dass die Anforderungen an Art und Menge des Aktivators aus ökonomischer (Kosten) und technischer (pH-Wert, Korrosionsgefahr, Arbeitsschutz) Sicht erfüllbar sind.
  - Ein in diesen Fällen möglicher Verzicht auf die Sandbehandlung der flüssigen Schlacke würde Aufwand und Kosten im Stahlwerk deutlich senken.

1.5 Ausblick

Aufbauend auf dem erfolgten Nachweis der grundsätzlichen Machbarkeit ist das untersuchte Mörtelsystem mit alkalisch aktivierter kristalliner EOS als Bindemittel unter Berücksichtigung der Aspekte baustofftechnologische Performance (insbesondere hinsichtlich Festigkeit und Verarbeitbarkeit), Wirtschaftlichkeit und CO_2-Fußabdruck zu einer großmaßstäblichen und praxistauglichen Lösung weiterzuentwickeln. Zwingende Voraussetzung hierfür ist es, die Ursachen dafür aufzuzeigen, dass trotz einzelner Positivbeispiele der größte Teil der untersuchten kristallinen EOS im Rahmen der gewählten Versuchsbedingungen nicht aktivierbar war.

Da die orientierenden Untersuchungen gezeigt haben, dass weitgehend glasige EOS und CUS ein hohes Potential zur Herstellung alkalisch aktivierter Bindemittel für geotechnische Baustoffe aufweisen, erscheint es sinnvoll, dieses Potential weiter zu untersuchen. Dies gilt in erster Linie für bereits heute betrieblich granulierte CUS, sowie perspektivisch auch für ggf. künftig granulierte EOS.

[5] Aurubis AG: Factsheet Eisensilikat: Ein vielseitiges und nachhaltiges Substitut für primäre Rohstoffe. Hamburg, 2020

2. Verwendung der Zuwendung und durchgeführte Arbeiten

Das Projekt gliederte sich in insgesamt sechs Arbeitspakete (AP) mit jeweils mehreren Unteraufgaben (Bild 2).

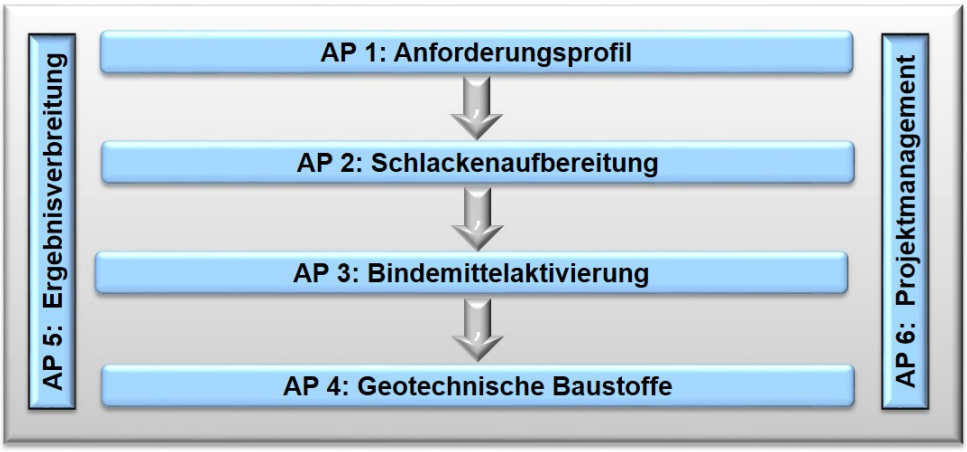


Bild 2: Ablauf und Gliederung der Arbeiten im Projekt SABINE

Zu Beginn des Projekts wurde ein umfassendes „Anforderungsprofil“ erstellt, auf das alle nachfolgenden Arbeiten aufbauen. Im Zuge der „Schlackenaufbereitung“ wurde die Frage behandelt, wie aus Stahlwerksschlacken ein Bindemittel hergestellt werden kann, das über eine für die alkalische Aktivierung ausreichende Feinheit verfügt. Daran anschließend wurde der Themenkomplex „Bindemittelaktivierung“ untersucht, um zu klären mit welchen Stoffen eine zielgerichtete und wirtschaftliche Aktivierung der gemahlenen Stahlwerksschlacken möglich ist. Darauf aufbauend wurden Einsatzbereiche für innovative „Geotechnische Baustoffe“ aufgezeigt und baustoff-technologische Mischungsentwürfe erarbeitet. Begleitende allgemeine Arbeiten behandelten die „Ergebnisverbreitung“ und das „Projektmanagement“.

2.1 Anforderungsprofil

Im Rahmen der Anforderungsanalyse waren konkrete Zielgrößen als Basis für die alle nachfolgenden Arbeiten (d. h. Schlackenaufbereitung, Bindemittelaktivierung und geotechnische Baustoffe) zu definieren.

2.1.1 Chemische und mineralogische Analysen von Elektroofenschlacken in Deutschland

Das FEhS-Institut erstellte einen Überblick über aktuell in Deutschland erzeugte Elektroofenschlacken (EOS). Es wurden EOS aus 11 deutschen Stahlwerken sowohl hinsichtlich ihrer chemischen Zusammensetzung (Haupt- und Nebenbestandteile, Spurenelemente) als auch ihres Auslaugverhaltens (24-stündiger Schütteltest gemäß DIN EN 12457-4) analysiert. Die Ergebnisse wurden in einem Bericht zusammengefasst und im August 2021 den Projektpartnern zur Verfügung gestellt.

Die Hauptbestandteile der EOS sind CaO (20,0-28,5 M.-%, Mittel 24,2 M.-%) und Eisenoxide (Fe-Gehalt 18,0-31,9 M.-%, Mittel 24,3 M.-%), gefolgt von SiO_2, MgO und Al_2O_3. Der insbesondere im

Hinblick auf die Mahlung bedeutsame metallische Fe-Anteil ist i.d.R. sehr gering. Der überdurchschnittlich hohe SiO_2-Gehalt der EOS 2a (22,0 M.-% im Vergleich zur sonstigen Spannweite von 8,0-16,1 M.-%) resultiert aus der Behandlung der flüssigen Schlacke mit Sand. Diese Behandlung führt zur Ausbildung von Mineralphasen wie Kirschsteinit, die ein sehr geringes Elutionsverhalten für Schwermetalle aufweisen. Die Freikalkgehalte liegen deutlich unter 1 M.-% und spielen daher für die Raumbeständigkeit keine Rolle. Die Schwermetallgehalte resultieren aus dem als Rohstoff eingesetzten Schrott. Hierbei dominiert der Chromgehalt, dessen Gehalt zwischen 1,0 M.-% und 2,1 M.-% und im Mittel bei 1,6 M.-% liegt. Im Hinblick auf die bindemitteltechnische Verwendung ist von Bedeutung, dass alles Chrom als Cr-III und nicht als toxisches Cr-VI vorliegt. Organische Bestandteile können aufgrund des Hochtemperaturprozesses, dem die Schlacken entstammen, in diesen eigentlich gar nicht vorkommen. Sehr geringe Gehalte an TOC sind dennoch messbar, hinsichtlich einer praktischen Nutzung der Schlacken (vgl. Kapitel 2.1.2) jedoch unkritisch.

Aufgrund der langsamen Abkühlung der flüssigen Schlacke in Beeten liegen alle Schlacken vollständig kristallin vor. Dies ist, neben der anderen chemischen Zusammensetzung, ein wesentlicher Unterschied zu der seit mehr als 140 Jahren als Zementbestandteil verwendeten granulierten Hochofenschlacke, dem Hüttensand. Dieser liegt in den allermeisten Fällen nahezu vollständig glasig vor, was zu seinem latent hydraulischen Verhalten führt. Die wesentlichen Mineralphasen der kristallinen EOS sind Larnit (β-C_2S), Brownmillerit (C_4AF), Bredigit ($Ca_7Mg(SiO_4)_4$) und Fe-Oxide (Wüstit FeO und Hämatit Fe_2O_3 sowie Magnetit Fe_3O_4 als Mischform $FeO{\cdot}Fe_2O_3$).

2.1.2 Definition grundsätzlich denkbarer Ausschlusskriterien

Ausschlusskriterien für Stahlwerksschlacken (SWS) können hinsichtlich der beabsichtigten Verwendung als geotechnisches Bindemittel auf technischen oder umweltbezogenen Aspekten beruhen.

In einem anderen Projekt des FEhS-Instituts hatte sich gezeigt, dass die in Deutschland erzeugten LD-Schlacken (LDS) mit einer einzigen Ausnahme signifikante Freikalkgehalte aufweisen[6]. Aufgrund der damit verbundenen technischen Unsicherheit bzgl. der Raumbeständigkeit in erhärteten geotechnischen Baustoffen wurde daher entschieden, in SABINE keine LDS zu verwenden und sich auf die EOS zu fokussieren. Diese weisen keine nennenswerten Freikalkgehalte auf, wie die chemische und mineralogische Analysen von Elektroofenschlacken (Kapitel 2.1.1) zeigten.

Der wesentliche umweltbezogene Aspekt stellt das Auslaugverhalten dar. Auch wenn für die Praxis nur das Auslaugverhalten des erhärteten geotechnischen Baustoffs von Belang ist, so kann doch mit dem Ziel einer schnelleren Bewertung das Auslaugverhalten der puren EOS herangezogen werden. Daher wurden die Ergebnisse der chemischen und mineralogischen Analysen den Anforderungen gegenübergestellt, die in den "Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG)"[7] für industrielle Gesteinskörnungen in wasserberührten Betonen

---

[6] FEhS-Institut: Eignung metallurgischer Schlacken für die Verwendung als Gesteinskörnung in Beton. IGF-Forschungsvorhaben 21567, 01.12.2020-31.05.2023

[7] Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt): Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen, Ausgabe 2024/1, Anhang 10, Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG), 2023

definiert sind. Zwar gelten diese Anforderungen nicht für die in SABINE adressierten geotechnischen Baustoffe, jedoch können sie zur Orientierung herangezogen werden. Der Vergleich der Werte zeigt, dass alle Anforderungen an die Eluatwerte für alle 11 EOS erfüllt werden! Die ABuG enthält jedoch auch die Anforderungen an den Feststoffgehalt von Schwermetallen. Diese werden von den 11 EOS mit Ausnahme des Parameters Chrom eingehalten. Der diesbezügliche Grenzwert von 600 mg/kg wird weit überschritten, was auf den Schrotteinsatz bei der Stahlerzeugung im Elektroofen zurückzuführen ist. Für eine signifikante Absenkung des Chromgehalts müsste eine aufwendige metallurgische Reduktion der flüssigen Schlacke erfolgen, die jedoch aus heutiger Sicht mit zahlreichen technischen und ökonomischen Problemen verbunden wäre und daher als unrealistisch einzuschätzen ist. Wenn man aber davon ausgeht, dass für die Bewertung der Umweltverträglichkeit der mit EOS hergestellten geotechnischen Baustoffe nicht deren Feststoffgehalte, sondern das Auslaugverhalten der EOS oder des damit hergestellten Baustoffs maßgeblich sein wird, so ergibt sich aus den Ergebnissen kein unmittelbares Ausschlusskriterium.

2.1.3 Verfügbarkeit und bisherige Nutzung von Elektroofenschlacken in Deutschland

Das FEhS-Institut führte eine Recherche zur Verfügbarkeit und bisherigen Nutzung von Elektroofenschlacken in Deutschland durch und erstellte einen Bericht, der im August 2021 den Projektpartnern vorgelegt wurde. Dazu wurden in allen deutschen Elektrostahlwerken die Erzeugungsmengen an Rohstahl und Schlacke abgefragt. Da es in 2020 einen primär pandemiebedingten Einbruch bei der Stahlproduktion gab (35,7 Mio. t statt 39,7 Mio. t in 2019), wurde als Bezugsjahr 2019 gewählt. Bild 3 zeigt die Standorte der deutschen Elektrostahlwerke. In 10 von 16 Bundesländern sind Werke vertreten. In ihnen wurde 2019 mit 11,7 Mio. t rd. 30 % der deutschen Rohstahlproduktion erzeugt. Dieser Anteil ist seit einigen Jahren sehr stabil, da die als Rohstoff benötigte Schrottverfügbarkeit begrenzt ist. Mit der Rohstahlerzeugung verbunden war die Erzeugung von 1,474 Mio. t Elektroofenschlacke. Davon stammten 0,133 Mio. t aus der Edelstahlerzeugung und 1,340 Mio. t aus der Qualitätsstahlerzeugung. Die spezifische Schlackenmenge lag bei 132 kg je t Rohstahl, unterlag aber einer gewissen Variationsbreite.

Da es dem FEhS-Institut aus kartellrechtlichen Gründen nicht gestattet ist standortspezifische Daten zu publizieren wurden 3 Regionen West/Süd/Ost definiert, für die die jeweiligen Schlackenmengen zusammengefasst wurden (Bild 4). Man erkennt, dass weitgehend flächendeckend und gleichmäßig verteilt eine ausreichende Menge an Elektroofenschlacke für bindemitteltechnische Anwendungen zur Verfügung stehen könnte. Dies ist ein großer Unterschied zum Hüttensand, der granulierten Hochofenschlacke, der lediglich in 6 Hochofenwerken an 5 Standorten erzeugt wird, davon rd. 60 % in 2 Werken in Duisburg.

Die Nutzung der Elektroofenschlacken aus der Qualitätsstahlerzeugung erfolgt ganz überwiegend als Mineralstoff im Verkehrswegebau. Eine Deponierung ist bisher kaum notwendig. Schlacken aus der Edelstahlerzeugung finden aber lediglich im Deponiebau Verwendung.

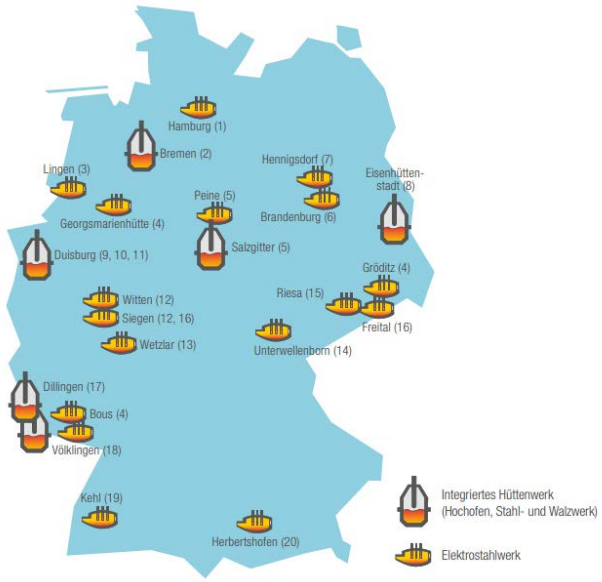


Bild 3: Stahlwerksstandorte in Deutschland

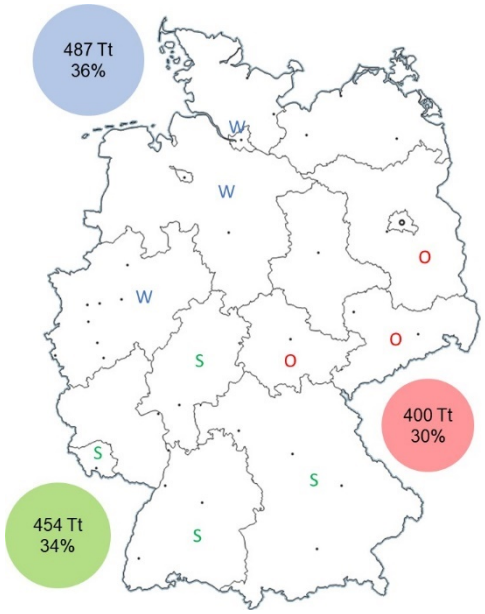


Bild 4: Regionales Aufkommen an EOS aus der Qualitätsstahlerzeugung in Deutschland, Stand 2019

2.1.4 Bautechnische Anforderungsprofile

Aufgrund der Ergebnisse der Aktivierungsversuche und der dabei erzielten Systemfestigkeiten wurde frühzeitig ersichtlich, dass die mit alkalisch aktivierten Stahlwerksschlacken erzielbaren Festigkeiten den hohen Anforderungen an herkömmlichen Konstruktionsbeton nicht genügen. Dennoch konnten potenzielle Anwendungsfelder identifiziert werden, bei denen zementäre Bindemittel mit geringeren Festigkeitsanforderungen in relevanten Absatzmengen genutzt werden können. Insbesondere sind folgende Anwendungsbereiche für die Entwicklung von alternativen Bindemitteln unter Verwendung von Stahlwerksschlacke geeignet:

- Ringspaltmassen, die im Zuge maschineller Tunnelvortriebe eingesetzt werden,
- Flüssigböden zum Verfüllen von Leitungsgräben,
- Dichtwandmassen für unterirdische Abdichtungs- oder Baugrubenwände.

Bei diesen Materialien sind das Verhalten und die Eigenschaften, die der Baustoff sowohl im unvermischten Zustand, im angemischten Zustand während der Verwendung, des Transports und der Verarbeitung und schließlich im erhärteten Zustand aufweist, wichtige Eigenschaften, um die Anwendbarkeit zu gewährleisten.

Bei maschinell aufgefahrenen Tunneln mit Tübbingausbau wird der verfahrensbedingt entstehende Spalt zwischen dem ausgebrochenen Holraumrand und Tübbingausbau als Ringspalt bezeichnet. Dieser ist mit einem geeigneten Ringspaltverfüllmaterial während des Vortriebs zu verfüllen. Für Ringspaltverfüllmaterial sind keine Anforderungsprofile in Normen festgeschrieben. Seit Juli 2022 sind in der Richtlinie 853.4006 der Deutschen Bahn[8] Vorgaben für Eisenbahntunnel zusammengestellt.

Im Folgenden sind für die beiden ausgewählten Anwendungsgebiete Ringspaltmassen im maschinellen Tunnelvortrieb und/oder Dichtwandmassen im Tiefbau Eigenschaften zusammengestellt und einzelne Eigenschaften mit Bandbreiten für die Eigenschaftskennwerte belegt. Soweit es sinnvoll erscheint, sind Mindestwerte, Grenzwerte und Toleranzbereiche bei den einzelnen Kennwerten definiert.

Zusammensetzung von praxisüblichen 2K-Ringspaltverfüllmaterial (RSVM)

Ringspaltverfüllmaterial wird nach dem Herstellungsverfahren grundsätzlich unterschieden in Einkomponenten-Ringspaltverfüllmaterial (1K), das im angemischten Zustand zur Einbaustelle transportiert wird, und Zweikomponenten-Ringspaltverfüllmaterial, das erst unmittelbar vor dem Einbau an der Lisene aktiviert wird.

Grundsätzlich bestehen 2K-RSVM aus einem zementbasierten (in einzelnen Anwendungen auch auf Hüttensand basiertem) System in einer Komponente A, welches durch einen Aktivator (accelerator) in einer Komponente B nach dessen Zugabe angeregt wird und das gemischte System dadurch sehr schnell von einer fließfähigen Konsistenz durch eine schnelle Gelbildung in ein hochviskoses „Stützmedium“ verändert wird. Der festigkeitsbildende Prozess erfolgt anschließend durch die Hydratisierung des zementgebundenen Bindemittels analog den bekannten chemischen Reaktionen in anorganischen mineralischen Mörtelsystemen. Allerdings enthalten 2K-RSVM in der Regel keine mineralischen Stoffe in Form von Sanden oder feinen Gesteinskörnungen, da diese die gewollte hohe Fließfähigkeit einschränken würden.

In der Komponente A werden als Bindemittel Zemente/Zementkombinationen und/oder Zement-Flugasche-Kombinationen verwendet, die zur besseren Verarbeitbarkeit auch Steinmehle und Bentonit-Beimischungen enthalten. Darüber hinaus sind Zusatzmittel enthalten, die die Fließfähigkeit und /oder das Erhärten steuern.

Die Komponente B enthält in einer wässrigen Trägersubstanz gelöste, aus erstarrten glasartigen (amorphen) wasserlöslichen Natrium-, Kalium- und Lithiumsilicaten, die gemahlen werden und dann als Lösungen weiterverwendet werden. Diese klaren, kolloiden alkalischen Lösungen werden in der RSM als alkalische Anreger verwendet. Solche alkalischen Salzlösungen führen zu silikatischen Verbindungen und werden in der praktischen Anwendung unter der Bezeichnung „Wasserglas“ zusammengefasst.

[8] Deutsche Bahn (2022), Richtlinie 853.4006, Eisenbahntunnel planen, bauen und instand halten; Ringspaltverfüllung bei Eisenbahntunneln

In Tabelle 1 sind ausgewählte Beispiele für in der Praxis verwendete Grundmischungen (Rezepturen) dokumentiert.

Tabelle 1: Beispiele für Grundmischungen von 2K-Ringspaltverfüllmaterial (RSVM)

	Komponente A					Komponente B	
Jahr	**Zement**	**Flugasche Steinmehl Hüttensand**	**Bentonit**	**Wasser**	**Zusatzmittel Stabilisierer, VZ**	**Aktivator**	**Aktivatortyp**
2013	260 kg/m³	-	35 kg/m³	820 kg/m³	5 kg/m³	80 kg/m³	Accelerator
2018	290 kg/m³	-	50 kg/m³	810 kg/m³	4,5 kg/m³	65 kg/m³	Accelerator
2018	240 kg/m³	-	35 kg/m³	820 kg/m³	5 kg/m³	112 kg/m³	Accelerator

Im Rahmen der praktischen Anwendung werden solche Grundmischungen in Praxisversuchen zum Teil modifiziert, um den tatsächlichen Anforderungen (z. B. Klimabedingungen) und den maschinentechnischen Anforderungen (z. B. Länge der Förderstrecken/Förderpumpen) zu genügen.

Eigenschaften/Kennwerte von 2K-RSVM im Laborversuch

Die technologischen Eigenschaften der 2K-RSVM werden durch verschiedene Kennwerte beschrieben, die in Labortests bestimmt werden. Zu diesen Kennwerten zählen:

- Absetzverhalten (Standzylinder: 1 h, 3 h und 24 h) (Komponente A)
- Ausfließzeit (Marschtrichter) (Komponente A),
- Gelzeit (2-cup-test) (Komponenten A+B),
- Druckfestigkeit, (Zylinder 3h, 10 h, 24 h, 28 d) (Komponenten A+B),
- Scherfestigkeit (Rheometer mit Flügeln/Paddeln) (Komponenten A+B),
- Sulfatwiderstand (Wittekind-Verfahren) (Komponenten A+B),
- Umweltverträglichkeit (Beurteilung Hygiene Institut) (Komponenten A, B, A+B),

Das Absetzverhalten und die Ausfließzeit der Komponente A sind Eigenschaften, aus denen auch das Verhalten und die Folgen für eine Förderung der Komponente A durch lange Rohrleitungen mit Hilfe von Förderpumpen und bei Stillstandzeiten abgeleitet werden kann. Bezüglich der Gelzeit muss festgestellt werden, dass Zeiten unter 10 sec vermieden werden sollten, da diese kurze Zeit in der Regel nicht ausreicht, damit die fließfähige RSVM über die Lisenen und über die Tübbingaussenseite ablaufen kann und den Ringspalt vollständig füllen kann. Die erforderliche Gelzeit hängt von den Abständen zwischen den eingebauten Lisenen (üblich: 3 bis 5 Meter). Gelzeiten liegen üblicherweise zwischen 10 sec und 20 sec. Es ist zu beachten, dass innerhalb der Gelzeit die RSM schon an Fließfähigkeit verliert; am Ende der Gelzeit ist die Fließfähigkeit nicht mehr gegeben.

Die genannten Eigenschaften stellen das Anforderungsprofil für die Beurteilung von alkalisch aktivierten Baustoffen aus Stahlwerkschlacken dar (Kapitel 2.4), da für den Einsatz solcher Baustoffe als Ringspaltmassen die gleiche Verfahrens- und Maschinentechnik wie heute vorgesehen ist.

Standardanforderungen, die nach Stand der Technik grundsätzlich einzuhalten sind: Angaben zur Zusammensetzung bei 2-K-Mörtel und der zulässigen Wasserabsonderung. Hinsichtlich zu

erreichender Druckfestigkeit besteht die Forderung nach 24 h mindestens 1,0 N/mm² zu erreichen. Die Scherfestigkeit muss bereits nach 120 min mindestens 80 kN/mm² betragen. Die geforderte Frischmörtelrohdichte beträgt 1.100 – 1.300 kg/m³. Darüber hinaus ist eine ausreichende Pumpfähigkeit und begrenzte Absetzneigung sicher zu stellen. Eine zentrale Anforderung an den Ringspaltmörtel ist eine im Ödometerversuch nachzuweisende Steifigkeit von mindestens 120 MN/m², sowie ausreichende Volumen- und Sulfatbeständigkeit.

Als Zielgrößen für Ringspaltmörtel wurden auf Basis der vorgenannten Anforderungen folgende Parameter ermittelt:

- Maximaler Gehalt an EOS (Elektroofenschlacke)
- Mindestgehalt FA (Flugasche) von 10 M.-% (Gewährleistung der Verarbeitung)
- Minimaler Gehalt an Aktivator (Wirtschaftlichkeitsbetrachtung)
- Scherfestigkeit nach 30 min ≥ 2 N/mm²
- Druckfestigkeit nach 1 d ≥ 0,5 N/mm²
- Druckfestigkeit nach 28 d ≥ 1,5 N/mm² (soll = 5 N/mm², max < 15 N/mm²)

Dichtwandmassen

Dichtwandmassen (DWM) werden in der Praxis zum Beispiel bei Baugruben im Tiefbau, bei Dämmen und Deichen zum Schutz vor Hochwässern oder bei Deponien zum Schutz des umgebenden Erdreiches und Grundwassers eingesetzt. Klassische Dichtwände übernehmen dabei ausschließlich die Funktion des Ausschlusses von Wasserwegigkeiten, also eine Abdichtungsfunktion. Im Falle von Deponieabdichtungen mit Dichtwänden wird eine Barriere errichtet, die kontaminierte Deponieinhalte wirkungsvoll vom Grundwasser und Erdreich fernhält. Dichtwandmassen übernehmen in Abgrenzung zu Schlitzwänden in der Regel keine statische Funktion.

Bei der Herstellung von Dichtwandmassen unterscheidet man zwischen dem Einphasenverfahren und dem Zweiphasenverfahren. Beim Einphasenverfahren wird während mittels Schlitzwandgreifern oder -fräsen zunächst ein Schlitz im Boden oder im Dammkörper ausgehoben, durch die Stützwirkung der parallel eingefüllten Dichtwandmasse (Suspension) der Schlitz im Boden gestützt. Die Dichtwandmasse ist eine selbsterhärtende Suspension, die dann langsam erhärtet und so später eine Wand mit dichtem Gefüge ausbildet. Beim Zweiphasenverfahren wird bei der Herstellung der Dichtwandlamellen die Stützfunktion zunächst durch eine Stützflüssigkeit (Betonitsuspension) übernommen. Erst im zweiten Schritt wird die Dichtwandmasse im Kontraktorverfahren eingebaut, die dann die Stützflüssigkeit ersetzt und die Funktion der Dichtwand übernimmt. Die Wahl des Verfahrens hängt dabei von den örtlichen Gegebenheiten und der Zusammensetzung des Bodens ab. Insbesondere differieren die Herstellerkosten zugunsten des Einphasenverfahrens.

Die genauen Zusammensetzungen (Mischrezepturen) der angebotenen Dichtwandmassen werden von den Herstellern nicht veröffentlicht. Im Wesentlichen bestehen Dichtwandmassen aus folgenden Komponenten:

- Betonit, einem hochquellfähigen Ton. Er besteht zwischen 60 % und 80 % aus dem bekannten Tonmineral „Montmorillonit“ und ist ein Dreischichtmineral. Dem Betonit kommen im

Wesentlichen folgende Aufgaben zu: Ausbildung einer Membranfläche am Erdreich zur Übertragung des Stützdruckes, Verminderung der Wasserdurchlässigkeit durch Quellen und Schutz des Bindemittels vor aggressiven Stoffen im Boden.

- Bindemittel: Als Bindemittel kommen sulfatbeständige Hochofen-Zemente nach DIN 1164 als hydraulische Bindemittel oder speziell konzipierte Bindemittel zur Anwendung. Die Spezialbindemittel weisen dabei höhere Hüttensandanteile auf und begünstigen einen gewollten verzögerten Erhärtungsprozess (Hydratationsprozess) für längere Aushubzeiten und verringern die Durchlässigkeit.
- Mineralische Füllstoffe: Für Dichtwandmassen werden zur Erhöhung der Feststoffanteile mineralische Füllstoffe eingesetzt. Solche Füllstoffe können Tonmehle (geringe Quellfähigkeit), Gesteinsmehle (aus Kalkstein oder Quarz) und / oder Flugaschen zugegeben werden. Wesentlich für die Wahl der Füllstoffe sind die Anwendungsbedingungen. Bei erforderlichem hohem chemischen Widerstand werden bevorzugt „reaktionsträge“ inerte Füllstoffe verwendet.
- Zusatzstoffe: Chemische Zusatzstoffe werden verwendet, um den Hydratationsfortschritt zu verlangsamen und die Fließeigenschaften zu verbessern. Dabei werden sowohl aus der Betontechnologie bekannte Zusatzmittel, wie Verflüssiger, Fließmittel und Verzögerer eingesetzt, als auch speziell entwickelte Additive (Organo-Silan-Basis). Die Wirkung und Dosierung sind jeweils in Eignungsprüfungen für den speziellen Anwendungsfall zu testen, um die bestmögliche Verarbeitung und die gewünschte hohe Dichtigkeit zu erreichen.
- Wasser: In der Praxis werden üblicherweise Leitungswasser (Trinkwasser) oder aus Brunnen gefördertes (chemisch unbedenklich) Wasser verwendet.

Eigenschaften und Kennwerte

Da für Dichtwandmassen in der Praxis überwiegend Fertigmischungen (Siloware) angeboten werden, für die eine empfohlene Wassermenge angegeben ist, sind Informationen über die genaue Zusammensetzung der Fertigmischung einer Dichtwandmasse kaum zu erhalten. Alternativ können Dichtwandmassen auch als Werkfrischbaustoffe, also fertig gemischte Produkte aus meinem Mischwerk mit einer Anlieferung im Fahrmischer eingesetzt werden. Von daher sind Dichtwandmassen auf Basis oder unter Mitwirkung bzw. Zugabe von Elektroofen-Schlacken oder Metallschlacken einschließlich eines geeigneten Anregers Mischungen jeweils im Einzelfall zu entwickeln, die die Eigenschaften und Kennwerte aufweisen, die für das spezifische Anwendungsgebiet erforderlich sind.

Die Eigenschaften der Dichtwandmasse sind zwischen frischem Zustand und erhärteten Zustand zu unterscheiden (Tabelle 2, Tabelle 3).

Tabelle 2: Kennwerte der Dichtwandmasse im „frischen Zustand“

Kennwert	Einheit	Bereich
Suspensionsdichte – rechnerische Suspensionsdichte ohne Luftporen	[kg / dm³]	1,12 bis 1,18
Auslaufzeit im Marschtrichter	[s / l]	33 bis 48
Fließgrenze	[N / m²]	12 bis 48
Kugelharfe (DIN 4126)	[Kugel]	3 bis 8

Filtratwasser (DIN 4127)	[cm³]	60 bis 75
Absetzmaß nach 2 h (250 ml)	[Vol %]	1,5 bis 3,0

Tabelle 3: Kennwerte der erhärteten Dichtwandmasse

Kennwert	**Einheit**	**Bereich**
Zylinderdruckfestigkeit (nach 28 d und 56 d)	[N / mm²]	0,5 bis 1,5
Wasserdurchlässigkeitswert k_{10} (nach 56 d)	[m / s]	1×10^{-10} bis 1×10^{-12}

Die aufgeführten Kennwerte und Kennwertebereiche sind Literatur- und Herstellerangaben[9, 10, 11, 12, 13, 14] entnommen worden.

Anforderungen an Dichtwandmassen

Orientierungswerte für Anforderungen an Dichtwandmassen im Suspensionszustand bietet die DIN 4127[15], welche Anforderungen an Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten, vorzugsweise für Betonit-Suspensionen enthält. Danach sollten Dichtwandmassen im flüssigen Zustand folgende praxisbegründete Anforderungen erfüllen:

- die Ausbildung eines Filterkuchens ermöglichen, damit an den Schlitzwandflächen eine Art „Membrane“ ausgebildet wird, über die die Stützung der Grabenwände durch den hydrostatischen Druck der Dichtwandmasse erfolgt,
- rheologischen Eigenschaften (Sedimentationsstabilität und Fließfähigkeit) behalten, bis der Aushub abgeschlossen ist,
- Erstarrungsbeginn durch das Bindemittel möglichst bis zum Ende der Aushubarbeiten verzögern, damit dann eine ungestörte Hydratation zur Schaffung eines dichten Gefüges erreicht werden kann.

An die erhärtete Dichtwandmasse sind zusätzlich folgende Anforderungen zu stellen:

- eine dem Baukörper angepasste Durchlässigkeit behalten,
- ein möglichst dauerhaft plastisches Verhalten aufweisen, um Rissbildungen aus Baugrundbewegungen vorzubeugen,

[9] Technische Datenblätter von Dyckerhoff SOLIDUR, Sorten 274 RV, 274 S (200 kg/m³ und 280 kg/m³), Dyckerhoff Spezialtiefbau
[10] Technisches Datenblatt DIWA-MIX 230 von der Heidelberger Cement AG, www.heidelbergercement.de
[11] Dichtwandbau / Schlitzwandbau / Schmalwandbau, aus: https://www.heidelbergercement.de
[12] Dichtwände zur Deponieumschließung aus https://www.dyckerhoff.com
[13] Eignungsprüfung mineralischer Dichtwandmassen aus: https://gdaempfehlungen.de
[14] Integrität von Einphasen-Dichtwänden, Untersuchungen zum rheologischen und mechanisch-hydraulischen Verhalten faserbewehrter Einphasen-Dichtwandmassen, Ch. Scholz, genehmigte Dissertation, TU Braunschweig, 2004
[15] DIN 4127:2014-02, Erd- und Grundbau - Prüfverfahren für Stützflüssigkeiten im Schlitzwandbau und für deren Ausgangsstoffe

- ähnliche bodenmechanische Kennwerte wie der Baugrund haben (Druckfestigkeit und gegebenenfalls Verformungsmodul E_V).

Für den Anwendungsfall Flüssigböden wurde ein Anforderungsprofil auf Basis der Richtlinie HZFSV – „Hinweise für die Herstellung und die Anwendung zeitweise fließfähiger, selbstverdichtender Verfüllbaustoffe (ZFSV) im Erdbau mit Bindemitteln in technischen Bauwerken im Straßenbau“ erstellt.

2.2 Schlackenaufbereitung

Wesentliche Voraussetzung zur Realisierung geotechnischer Baustoffe auf der Basis von Stahlwerksschlacke ist die industrielle Herstellbarkeit des Bindemittels. In diesem Zusammenhang spielen sowohl die wirtschaftliche Aufbereitbarkeit als auch die alkalische Aktivierbarkeit eine zentrale Rolle.

2.2.1 Beschaffung unterschiedlicher Stahlwerksschlacken

In Kooperation mit zwei deutschen Elektrostahlwerken und einem Kupfererzeuger beschaffte das FEhS-Institut insgesamt 14 EOS und 2 CUS (Tabelle 4). Die EOS unterschieden sich hinsichtlich der verwendeten Schrottmixe und dahingehend, ob eine Sandbehandlung der flüssigen Schlacke vorgenommen wurde. Die EOS 11/12 und EOS 13/14 stammten jeweils aus dem gleichen Elektroofen des Stahlwerks 2. In beiden Öfen werden jedoch sehr verschiedene Stahlqualitäten erzeugt, woraus sich einerseits die große Ähnlichkeit der chemischen Zusammensetzungen jeweils der EOS 11/12 bzw. 13/14 erklärt und andererseits der große Unterschied zwischen den EOS 11/12 und EOS 13/14. Auf die Beschaffung von LDS wurde aus den unter 2.1.2 diskutierten Gründen verzichtet.

Tabelle 4: Überblick über die in SABINE untersuchten Schlackenproben

Schlacke	Stahlwerk	Abkühlung	Behandlung	Struktur
EOS 1	1	Beet (langsam)	-	kristallin
EOS 2	2	Wassergranulation (Labor)	Sand	teilglasig
EOS 3	2	Wassergranulation (Labor)	Sand	glasig
EOS 4	1	Beet (beschleunigt)	Sand	kristallin
EOS 5	1	Wassergranulation (Labor)	Sand	teilglasig
EOS 6	1	Beet (langsam)	Sand	kristallin
EOS 7	1	Beet (langsam)	Sand	kristallin
EOS 8	1	Beet (langsam)	-	kristallin
EOS 9	1	Beet (langsam)	-	kristallin
EOS 10	1	Beet (langsam)	-	kristallin
EOS 11	2	Beet (langsam)	Sand	kristallin
EOS 12	2	Beet (langsam)	Sand	kristallin
EOS 13	2	Beet (langsam)	Sand	kristallin
EOS 14	2	Beet (langsam)	Sand	kristallin

CUS 1	-	Wassergranulation (betrieblich)	-	teilglasig
CUS 2	-	Wassergranulation (betrieblich)	-	teilglasig

Nachdem sich in den Versuchsreihen abzeichnete, dass sich kristalline EOS nur bedingt alkalisch aktivieren lassen, wurde zur Orientierung in beiden Stahlwerken mit Hilfe der mobilen Laborgranulationsanlage des FEhS-Instituts betriebsseitig bereitgestellte EOS zu weitgehend glasigem Material granuliert (EOS 2, 3, 5), Bild 5. Die hierfür verwendeten Schlacken waren mit Sand behandelt, da hierdurch die Basizität abgesenkt und Glasbildung überhaupt erst ermöglicht wird.

Bild 5: Granulation flüssiger EOS im Stahlwerk 1 mittels mobiler Laborgranulationsanlage (EOS 5)

2.2.2 Charakterisierung der Eigenschaften der Schlacken

Die meisten Schlacken wurden im FEhS-Institut umfassend hinsichtlich der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung charakterisiert. Beides ist im Hinblick auf die alkalische Aktivierung der Schlacken von wesentlicher Bedeutung. Für die EOS 9 wurde keine chemische Analyse durchgeführt. Bei dieser Probe sollte zunächst überprüft werden, ob sie mineralogisch mit der EOS 1 übereinstimmt. Da dies aufgrund der Sandbehandlung nicht der Fall war, erübrigte sich eine chemische Analyse.

In Tabelle 5 sind die wesentlichen chemischen Kennwerte der Schlacken zusammengestellt. Die meisten Parameter wurden mittels RFA analysiert. Zur Bestimmung der verschiedenen Bindungsmodifikationen des Fe wurde in einigen Fällen eine aufwendige Fe-Trennung gemäß des "Handbuchs für das Eisenhüttenlaboratorium" vorgenommen. Deutlich erhöhte SiO_2-Gehalte und entsprechend niedrigere Basizitäten CaO/SiO_2 sind für die EOS 2-7 und EOS 11-14 zu verzeichnen, die mit Sand behandelt wurden.

Die Analysen zeigen, dass sich ausgewählten EOS gut in die Spannweite einordnen, die im Abschnitt 2.1.1 diskutiert wurde. Hinsichtlich der Mahlung ist von Bedeutung, dass der metallische Fe-Gehalt im Regelfall nur sehr gering (< 1 M.-%) ist. Ausnahmen hierbei sind die EOS 6 und 14 mit Gehalten über 1 M.-%. Allerdings muss beachtet werden, dass in die chemische Analyse nur der Materialanteil eingeht, der in der Scheibenschwingmühle < 90 µm aufzubereiten ist. Der Materialanteil, der > 90 µm verbleibt (NAA), wird im Wesentlichen metallisch sein. Die Schwermetallgehalte der Schlacken

wurden mittels ICP bestimmt. Die Chromgehalte der EOS sind aufgrund des Schrotteinsatzes bei der Stahlerzeugung gegenüber z.B. einem Hüttensand signifikant erhöht und liegen zwischen 12.900 und 28.300 mg/kg. Allerdings liegt das Chrom in der unkritischen Cr-III-Form und nicht als Cr-VI vor. Bzgl. des Glühverlusts im Sinne der Summe aus chemisch gebundenem CO_2 und H_2O fällt auf, dass mit Ausnahme der bei KHD gemahlenen EOS 10 die Werte stets sehr niedrig liegen. Mit 3,76 M.-% sticht die gemahlene EOS 10 aus allen Proben hervor. Allerdings trifft das nicht auf das ungemahlene Originalmaterial zu und auch die RBA liefert keine Erklärung für den hohen Glühverlust der gemahlenen Probe. EOS und CUS unterscheiden sich chemisch signifikant voneinander. Insbesondere ist die Basizität der CUS extrem gering.

Die mineralogische Zusammensetzung wurde im Regelfall mittels quantitativer RBA inkl. Rietveldverfeinerung unter Verwendung eines Rutil-Standards ermittelt (Tabelle 6).

Im Regelfall wird flüssige EOS zur Erstarrung in Schlackenbeete gegossen, wo sie langsam zu einem kristallinen Gestein erstarrt. Dies gilt auch für die meisten EOS, die in SABINE untersucht wurden. Die mineralogische Zusammensetzung der verschiedenen EOS variiert bei beiden Stahlwerken deutlich, auch wenn der Aspekt der Sandbehandlung (vgl. SiO_2-Gehalte in Tabelle 5) berücksichtigt wird. So zeigt z.B. der Vergleich der nicht sandbehandelten EOS aus dem Stahlwerk 1 (EOS 1, 8, 9, 10) eine erhebliche Bandbreite bei den Gehalten an Larnit (23,5-35,7 M.-%), Srebrodolskit/Brownmillerit (5,5-28,3 M.-%) oder Wüstit (9,8-43,0 M.-%).

Bei den sandbehandelten und kristallin erstarrten EOS 6, 7, 11-14 ist insbesondere bei den EOS aus dem Stahlwerk 2 (EOS 11-14) eine erhebliche Ausbildung von Kirschsteinit zu beobachten, die zwecks Verminderung der Auslaugung von Schwermetallen angestrebt wird.

Beispielhaft zeigen Bild 6 und Bild 7 die RBA der bei KHD auf 4630 cm²/g gemahlenen kristallinen EOS 1 und der im Stahlwerk 1 wassergranulierten EOS 5. Man erkennt bei der EOS 1 ausschließlich die Reflexe der kristallinen Phasen, wohingegen bei der EOS 5 ein deutlicher "Glasbuckel" auftritt.

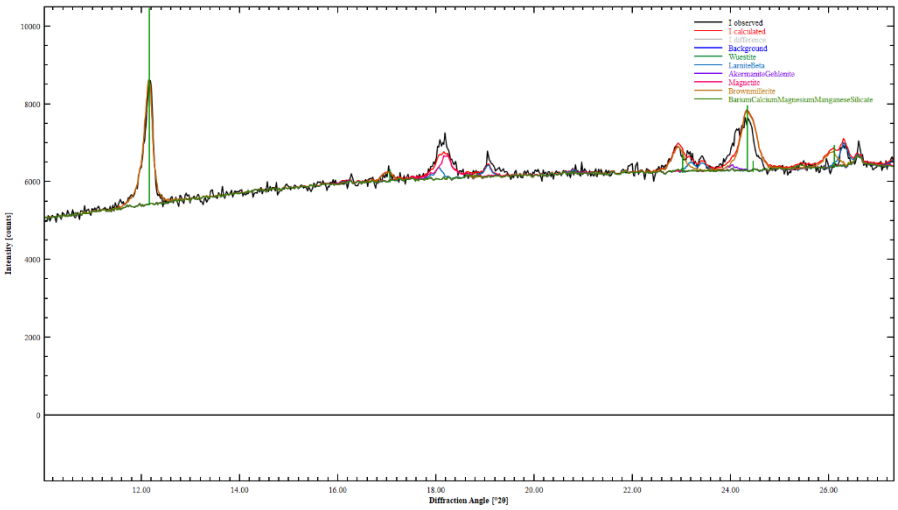


Bild 6: RBA der bei KHD auf 4630 cm²/g gemahlenen kristallinen EOS 1

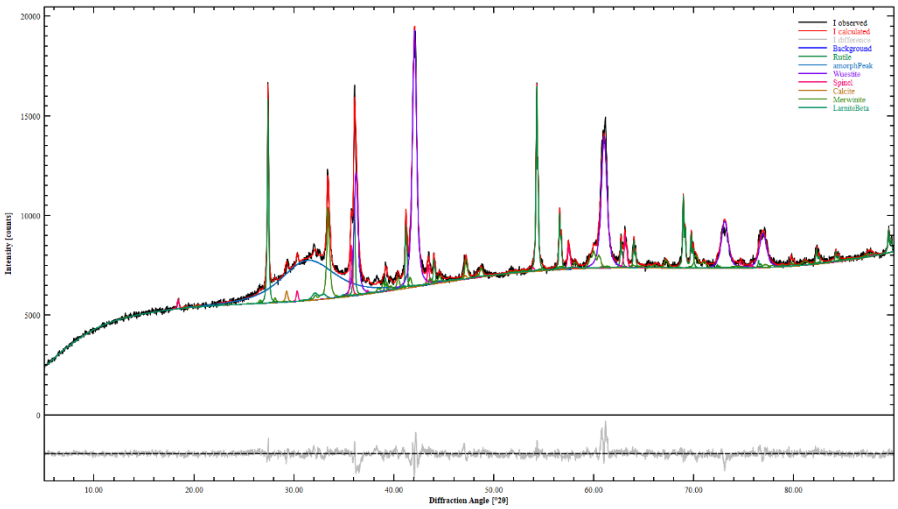


Bild 7: RBA der im Stahlwerk 1 wassergranulierten EOS 5

Im Zuge der Diskussionen über die Nicht-Aktivierbarkeit der meisten kristallinen EOS wurde die Frage diskutiert, ob evtl. der bei KHD stattfindende kombinierte Mahl- und Sichtprozess im Vergleich zur Mahlung in der geschlossenen Kugelmühle des FEhS-Instituts zu einer stofflichen Separation führt, die sich dann auf die Aktivierbarkeit des Feinguts auswirken könnte. Beim Vergleich der chemischen und mineralogischen Analysen der bei KHD gemahlenen EOS 10 und der ungemahlenen EOS 10 wurden aber nur sehr begrenzte Unterschiede aufgezeigt, insbesondere bei den Anteilen der Fe-Oxide.

Aus den bereits diskutierten Gründen wurden auch 3 durch das FEhS-Institut im Stahlwerk mittels Laborequipment wassergranulierte EOS in das Versuchsprogramm aufgenommen. Die Glasgehalte dieser 3 wassergranulierten EOS waren sehr verschieden (EOS 2: 33 M.-%, EOS 3: 92 M.-%, EOS 5: 68 M.-%). Im Hinblick auf eine Verwendung als Bindemittelbestandteil sind grundsätzlich hohe Werte > 90 M.-% anzustreben. Dass dies bei EOS 2 und EOS 5 nicht gelungen war, ist auf die im Vergleich zu einer Hochofenschlacke immer noch hohe Basizität sowie den geringen Al_2O_3-Gehalt zurückzuführen, wohingegen bei EOS 3 mit einer geringen Basizität CaO/SiO_2 von 0,81 ein hoher Glasgehalt erreicht wurde.

Die Bandbreite der chemischen wie mineralogischen Zusammensetzung der EOS, selbst wenn sie im selben Stahlwerk erzeugt wird, stellt ein erhebliches Problem für eine gleichmäßige Herstellung eines geotechnischen Baustoffs dar. Da die Schwankungen die weitgehend unvermeidliche Folge der sehr unterschiedlichen Stahlqualitäten bzw. des damit verbundenen Rohstoffeinsatzes sind, erfordert die EOS-Nutzung als Bindemittelbestandteil eine Homogenisierung der verschiedenen Chargen. Über welchen Zeitraum bzw. über welche Mengen eine solche Homogenisierung vorzunehmen wäre, bleibt noch zu klären.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung der in SABINE untersuchten Schlackenproben in M.-%

	EOS																CUS	
	1		2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12	13	14	1	2
	2400	4630					4650				4250	Original						
CaO	27,2	33,1	29,4	20,4	29,6	29,1	25,9	24,3	25,8		24,6	27,3	24,8	23,8	23,7	27,8	4,10	3,95
Fe_{RFA}	28,8	24,3	19,2	23,9	16,3	19,0	23,7	19,2	30,8		27,0	29,1	17,6	18,9	25,9	18,8	34,7	34,8
$Fe_{ges.}$	-	-	18,2	22,2	-	18,1	22,7	17,4	-		29,6	30,3	15,4	16,6	25,0	17,5	30,2	-
$Fe_{met.}$	-	-	0,50	0,06	-	0,17	1,10	0,78	-		0,51	0,56	0,44	0,66	0,33	1,55	0,45	-
FeO	-	-	19,7	26,3	-	19,9	21,8	17,6	-		22,1	27,2	15,7	16,5	25,7	17,6	36,1	-
Fe_2O_3	-	-	3,42	2,45	-	3,58	6,57	4,28	-		17,0	12,3	3,96	4,41	6,66	3,18	2,47	-
SiO_2	8,29	9,95	21,6	25,3	19,6	19,2	17,6	23,4	8,36		7,68	8,29	23,5	21,4	21,6	23,4	19,7	21,9
MgO	7,45	5,55	5,90	4,24	11,0	8,31	7,34	8,34	7,64		8,22	7,75	4,16	4,02	3,73	5,41	1,24	1,29
Al_2O_3	4,38	5,35	4,62	7,08	5,97	5,20	5,74	6,57	4,05		4,17	4,65	11,9	11,8	4,69	5,88	11,4	11,6
TiO_2	0,32	0,39	0,29	0,38	0,35	0,29	0,31	0,39	0,29		0,28	0,41	0,74	0,68	0,35	0,30	0,54	0,42
P_2O_5	0,39	0,47	0,29	0,37	0,30	0,34	0,29	0,26	0,32		0,26	0,33	0,26	0,30	0,34	0,37	0,59	0,37
$Mn_{ges.}$	4,94	3,86	5,51	3,23	5,08	5,20	3,96	4,23	4,30		4,22	4,11	3,92	4,31	3,90	4,56	0,70	0,62
Cr_2O_3	2,37	2,20	2,12	2,97	1,89	2,26	2,27	2,30	2,13		2,30	2,12	3,14	4,13	2,37	2,85	1,99	2,37
Na_2O	0,01	0,04	< 0,01	0,07	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,02	0,01		0,03	< 0,01	0,05	0,04	0,07	< 0,01	0,27	0,79
K_2O	0,02	0,05	0,03	0,02	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01		0,04	< 0,01	0,02	0,02	0,05	0,06	0,18	0,19
CO_2	0,25	0,50	0,09	0,04	0,04	0,09	0,22	0,14	0,08		2,64	0,24	0,07	0,08	0,07	0,12	0,36	0,08
H_2O	0,54	1,23	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,01	0,18	0,21	0,01		1,12	0,70	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	0,05
C/S	3,28	3,33	1,36	0,81	1,51	1,51	1,47	1,04	3,09		3,20	3,29	1,06	1,11	1,10	1,19	0,21	0,18
NAA	-	-	-	-	-	1,2	-	-	-		-	-	0,4	1,9	1,8	3,1	-	-

Tabelle 6: Mineralogische Zusammensetzung der in SABINE untersuchten Schlackenproben in M.-% (gerundet: nur semiquantitative Analyse)

		EOS																CUS	
		1		2	3	4	5	6	7	8	9	10		11	12	13	14	1	2
		2400	4630					4650				4250	Original						
Larnit	β-Ca_2SiO_5	28,8	35,1	18	-	-	3,2	8,5	4,1	35,7	33,1	23,5	30,4	6,0	4,8	5,6	9,6	-	-
Calcio-Olivin	g-Ca_2SiO_5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Bredigit	$Ca_7Mg(SiO_4)_4$	3,9	6,1	21	-	15	-	18,8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Merwinit	$Ca_3Mg(SiO_4)_2$	-	-	-	-	40	9,2	14,4	1,7	1,7	1,3	-	-	-	-	-	-	-	-
Åkermanit	$Ca_2AlSi_2O_7$	2,1	2,1	-	-	10	-	-	-	-	-	-	-	30,0	34,2	10,0	14,3	-	-
Gehlenit	$Ca_2Al(AlSi)O_7$	-	-	-	-	-	-	10,7	5,2	-	-	-	-					-	-
Monticellit	$CaMgSiO_4$	-	-	-	-	20	-	-	27,1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Mayenit	$Ca_{12}Al_{14}O_{33}$	1,5	-	-	-	-	-	-	-	-	5,5	-	-	-	-	-	-	-	-
Srebrodolskit/ Brownmillerit	$Ca_2Fe_2O_5$ / $Ca_2(Fe,Al)_2O_5$	21,8	28,3	6	-	-	-	-	-	11,9	5,6	13,1	17,0	-	-	-	-	-	-
Kirschsteinit	$CaFeSiO_4$	-	-	-	-	-	-	4,7	41,4	-	-	-	-	36,0	29,6	60,0	55,8	-	-
Quarz	SiO_2	0,2	-	1	1	5	-	2,4	-	-	-	1,2	-	1,0	0,5	1,0	0,4	-	0,8
Wüstit	FeO	15,4	9,8	15	1	5	16,7	29,5	8,5	43,0	43,0	45,5	38,7	6,0	9,6	14,9	12,8	0,4	-
Magnetit/Spinell	Fe_3O_4 / $MgAl_2O_4$	26,3	18,7	1	6	5	2,5	8,4	3,1	2,8	-	12,4	6,7	6,5	6,2	1,8	1,7	-	-
Hercynit	$FeAl_2O_4$	-	-	-	-	-	-	-	6,6	-	-	-	-	10,5	8,2	-	-	12,9	-
Chromit	FeO·Cr2O3	-	-	5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,0	-
Calcit	$CaCO_3$	-	-	-	-	-	0,9	2,7	-	-	-	4,4	2,2	0,7	1,0	-	-	-	-
Periklas	MgO	-	-	-	-	-	-	-	2,3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,3
Hercynit	FeO·Al_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	14,5
Fayalit	2 FeO·SiO_2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	6,4
Magnesioferrit	$MgFe_2O_4$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10,5	-	-	3,2	5,8	6,7	5,3	-	-
Tonerde	γ-Al_2O_3	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,1	-	-	-	-	-	-	-	-
Glas	-	-	-	33	92	-	67,6	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	84,7	76,0

Im Hinblick auf die großtechnische Mahlung der Schlacken auf Zementfeinheit und den damit verbundenen Energiebedarf wurde die Mahlbarkeit mit Hilfe des Zeiseltests [16] ermittelt. Bild 8 zeigt für verschiedene EOS und CUS den spezifischen Mahlenergiebedarf in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche nach Blaine. Es ist erkennbar, dass der Energiebedarf höher liegt als für andere Stoffe, wie z.B. Hüttensand oder Portlandzementklinker. Die absoluten Energiebedarfswerte korrelieren nicht mit den Werten industrieller Mahlanlagen, was u.a. auf unterschiedliche Zerkleinerungswirkungen verschiedener Mahlsysteme sowie die nachgelagerte Verwendung von Sichtern zurückzuführen ist. Für den relativen Vergleich verschiedener Stoffe ist der Zeiseltest hingegen gut geeignet.

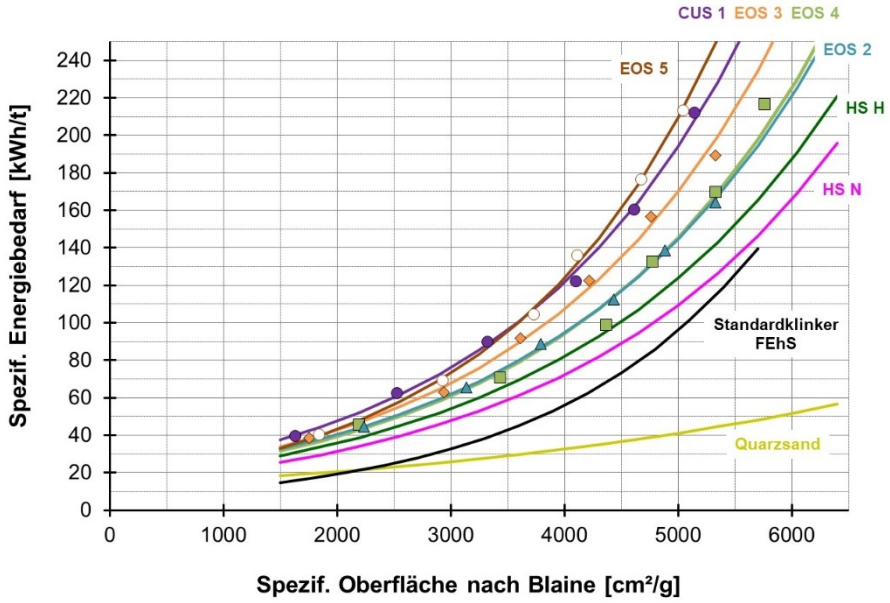


Bild 8:Mahlenergiebedarf nach Zeisel

2.2.3 Aufbereitung kleinerer Mengen in der Laborkugelmühle

Die Schlacken wurden, sofern bindemitteltechnische Arbeiten damit erfolgten, entweder beim FEhS-Institut in einer geschlossenen Kugelmühle oder, wenn größere Mengen aufbereitet werden sollten, im Unterauftrag bei KHD in Köln in einer Technikums-Gutbettwalzenmühle aufbereitet. Die STUVA ließ im Unterauftrag die EOS 5 und die CUS 2 beim der UVR-FIA GmbH in Freiberg mahlen. Tabelle 7 zeigt die Feinheitsparameter der gemahlenen Schlacken sowie deren Reindichte. Z.T. wurden unterschiedlich hohe Feinheiten eingestellt, um den physikalischen Effekt auf die Aktivierbarkeit überprüfen zu können. Bei der Mahlung der EOS 5 fiel z.B. auf, dass ab einer spezifischen Oberfläche von etwa 5600 cm²/g in der Kugelmühle kein Mahlfortschritt zu erkennen war. Dies korreliert mit dem stark exponentiellen Mahlenergiezuwachs, der in Bild 8 erkennbar ist.

[16] Zeisel, H. G.: Entwicklung eines Verfahrens zur Bestimmung der Mahlbarkeit. Schriftenreihe der Zementindustrie Nr. 14 (1953)

Trotz der unterschiedlich hohen spezifischen Oberflächen nach Blaine waren die Korngrößenverteilungen der verschiedenen Proben, die in der Kugelmühle gemahlen wurden, vergleichbar, so dass konstante Voraussetzungen zur Beurteilung der Aktivierbarkeit gegeben waren.

Die Reindichten der Schlacken liegen aufgrund der hohen Fe-Oxid-Gehalte deutlich über der von Hüttensand. Dies dürfte sich entsprechend auf die Rohdichten der damit hergestellten geotechnischen Baustoffe auswirken.

Tabelle 7: Reindichten und Feinheitskennwerte der Schlacken

	Mahlung	Reindichte	Blaine	$d_{50\%}$	d'_{RRSB}	n_{RRSB}
		g/cm³	cm²/g	µm	µm	-
EOS 1	KHD	3,951	2400	16	21	1,38
	KHD	3,759	4630	8	10	1,54
	FEhS	3,951	4360	11	16	1,00
	FEhS	3,759	6040	5	7	0,92
EOS 2	FEhS	3,575	3580	10	14	0,99
	FEhS	3,575	3840	10	14	0,92
EOS 3	FEhS	3,501	3440	11	15	1,09
	FEhS	3,501	3610	10	14	1,05
EOS 4	FEhS	3,691	3950	10	15	0,91
EOS 5	FEhS	3,541	3430	10	15	1,02
	FEhS	3,541	5330	6	9	0,91
	UVR-FIA	3,541	-	10	15	0,82
EOS 6	KHD	3,878	4650	8	10	1,45
	KHD	3,986	780	35	45	1,46
EOS 7	FEhS	3,574	4700	7	11	0,87
EOS 8	FEhS	4,125	3730	10	14	0,95
EOS 9	-	4,145	-	-	-	-
EOS 10	KHD	3,940	4250	10	15	0,96
EOS 11	FEhS	3,547	3520	10	16	0,81
EOS 12	-	3,606	-	-	-	-
EOS 13	FEhS	3,728	3470	10	15	0,80
EOS 14	-	3,606	-	-	-	-
CUS 1	FEhS	3,871	3550	11	15	1,04
	FEhS	3,871	5570	5	8	0,94
CUS 2	FEhS	3,840	3600	10	14	0,99
	UVR-FIA	3,840	-	10		

2.2.4 AP 2.d Aufbereitung größerer Mengen ausgewählter Schlacken

Bei KHD in Köln wurden im Unterauftrag des FEhS-Instituts insgesamt 3 Mahlungen verschiedener EOS in einer Technikums-Gutbettwalzenmühle vorgenommen. Die zugehörigen Feinheitskennwerte sind in Tabelle 7 aufgeführt. Die Korngrößenverteilungen der bei KHD gemahlenen Proben waren deutlich steiler als die der in der Kugelmühle gemahlenen Schlacken, was bei einer

bindemitteltechnischen Anwendung ggf. zu einer Erhöhung des aus rheologischen Gründen benötigten Wasserbedarfs führt. Allerdings würde bei einer industriellen Mahlung die Korngrößenverteilung über entsprechende Sichtereinstellungen korrigiert werden können.

Für die Mahlung im Technikum musste die EOS, die z.T. Korngrößen bis 64 mm aufwies, auf < 16 mm vorgebrochen werden. Insbesondere bei der EOS 10 fanden sich signifikant hohe Metallanteile, die sich während der Probenvorbereitung sowie bei der Hauptvermahlung anreicherten (Bild 9).

Bild 9: Metallanreicherung am Backenbrecher bei der Vorbereitung der EOS 10 für die Technikumsmahlung (links) und in den Sichtergrießen (rechts)

Die Mahlanlage des Typs Comflex® ist gekennzeichnet durch die Anordnung der Gutbettwalzenmühle (Rollenpresse) über dem statischen V-Sichter. In dieser Anordnung wird gemahlenes Produkt der Gutbettzerkleinerung direkt entstaubt und kann bei Bedarf auch durch einen Heißgaserzeuger getrocknet werden, was diese Mahlanlage äußerst flexibel macht. Insbesondere wird dadurch auch die Mahlung von heißen, feuchten und zementären Komponentenmischungen, wie es bei der Hüttensandmahlung oder der Mahlung von Klinker mit hohen Anteilen feuchter Additive der Fall ist, ermöglicht, ohne dass sich Umlaufförderwege zusetzen.

In der Technikumsanlage (Bild 10, Bild 11) wird das Aufgabegut zunächst im Vorbunker und im Vibrofeeder aufgegeben. Der Vibrofeeder dosiert im Betrieb neues Frischgut entsprechend der gemessenen Produktmenge in den Kreislauf nach. Das in der Rollenpresse nach dem Prinzip der Gutbettzerkleinerung an Stud-Walzen erzeugte Produkt wird in einem Klumpenbrecher vordeagglomeriert und dann direkt der ersten statischen Sichtung im V-Sichter zugeführt. Mittelfeines Gut wird im V-Sichter nach oben zum dynamischen Stabkorbsichter Typ SKS-LC für die finale Sichtung (v.a. entsprechend der eingestellten Stabkorbdrehzahl) transportiert. Das Fertiggut wird in einem Hocheffizienzzyklon abgeschieden. Die Umluft kann ggf. über einen Heißgaserzeuger aufgeheizt werden. Obwohl die Pilotmahlanlage als kontinuierlicher Prozess über lange Zeiträume betrieben werden kann und sich normalerweise nach ein paar Minuten ein stationärer Zustand einstellt, war bei der EOS-Mahlung zu beobachten, dass sich keine stationären Zustände ergaben bzw. lange Anlaufphasen beobachtet wurden.

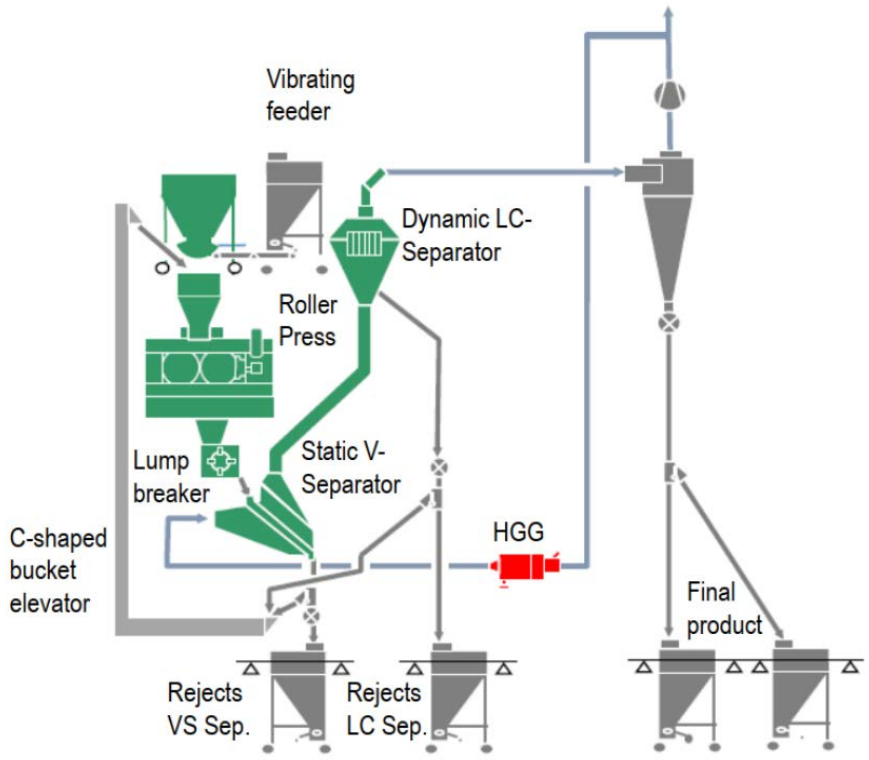


Bild 10: Fließbild zur Pilotmahlanlage Typ Comflex® im KHD-Technikum

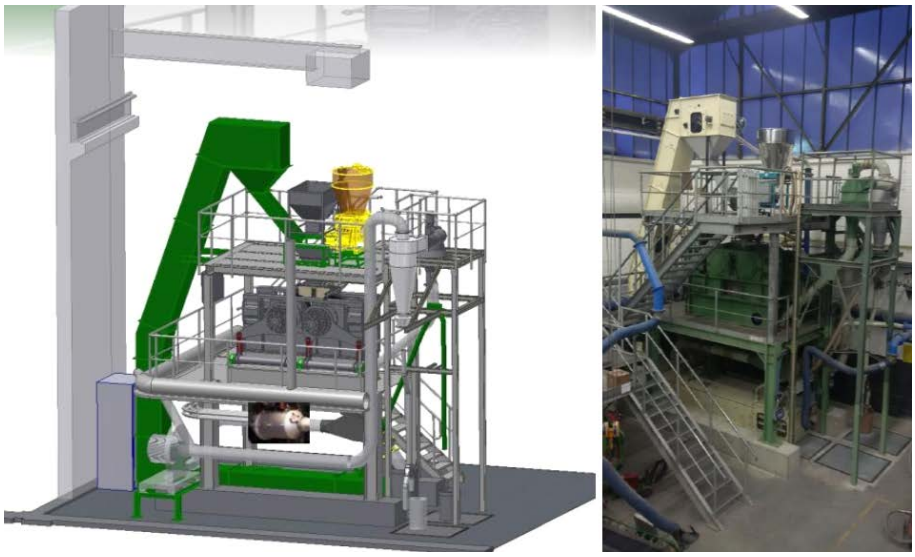


Bild 11: Pilotmahlanlage Typ Comflex® im KHD-Technikum

2.2.5 Ermittlung der verfahrenstechnisch maßgeblichen Kenngrößen

Die bei KHD durchgeführten Technikumsmahlungen im April 2021, Mai 2023 und Januar 2024 dienten nicht nur der Erzeugung größerer Mengen gemahlener EOS, sondern auch der Bestimmung von mahltechnischen Kenngrößen.

Bei den Technikumsmahlungen wurden diverse Produktionsparameter kontinuierlich erfasst (Bild 12). Für die Ermittlung von Mahlbarkeitskenngrößen wird das Einstellen eines stationären Zustands benötigt. Dies wurde für die EOS 1 nach etwa 10 min (600 s) angenommen. Aus den aufgezeichneten Prozessgrößen und den gemessenen Produktfeinheiten konnte eine Mahlbarkeitskurve abgeleitet werden (Bild 13). Der Energiebedarf 31 kWh/t bei 4000 cm²/g stellt die Ausgangsbasis für die Konzeption einer industriellen Mahlanlage dar. Dieser Wert liegt deutlich höher im Vergleich zur Hüttensandmahlung unter gleichen Bedingungen (15-20 kWh/t bei 4000 cm²/g)!

Vergleicht man den spezifischen Mahlenergiebedarf, der sich aus der Technikumsmahlung ergibt, mit dem im Zeiseltest ermittelten (Bild 8), so erkennt man, dass der Zeiseltest erwartungsgemäß zu signifikant höheren Werten führt. Für die Abschätzung der industriellen Mahlung ist jedoch von die Technikumsmahlung ausschlaggebend.

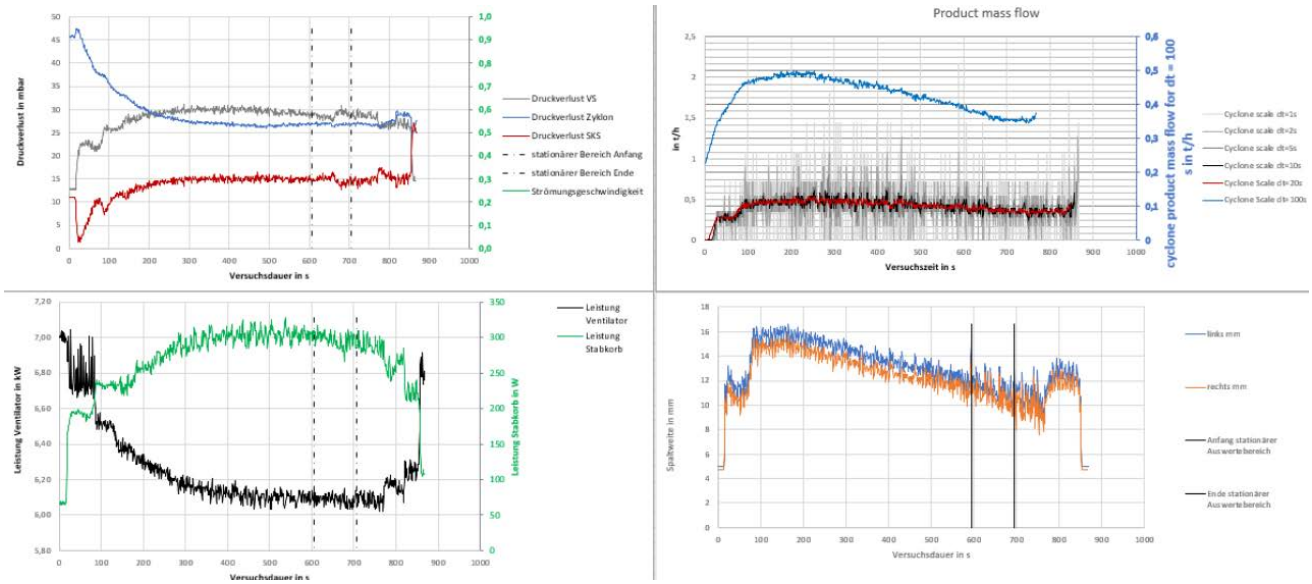


Bild 12: Aufzeichnung verschiedener Produktionsparameter bei der Mahlung der EOS 1 im KHD-Technikum

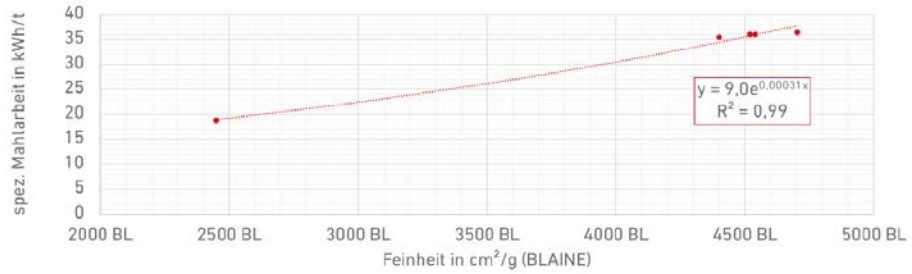


Bild 13: Aus der Technikumsmahlung abgeleiteter Mahlenergiebedarf für die EOS 1

Neben dem Mahlenergiebedarf ist auch der Verschleiß eine wichtige Kenngröße. Der Verschleiß an den Schlagleisten wird für die EOS 1 mit 80 g/t und für die EOS 6 mit 137 g/t angegeben, was zur Einstufung "extrem schleißend" führt. Hüttensand hingegen wird bei 20-50 g/t "nur" als "stark schleißend" eingestuft.

Über die Technikumsmahlungen hinaus führte KHD für die kristallinen EOS 1 und EOS 6 auch eigene Mahlbarkeitstests nach Zeisel [16] durch. Aus den gemessenen Einzelwerten lässt sich der spezifische Mahlenergiebedarf für definierte Feinheiten interpolieren und mit den im FEhS-Institut ermittelten Werten für die ebenfalls kristalline EOS 4 vergleichen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Mahlenergiebedarf nach Zeisel in kWh/t

	EOS 1	**EOS 6**	**EOS 4**
	KHD	KHD	FEhS
2000 cm²/g	25	25	48
4000 cm²/g	202	75	122
6000 cm²/g	1610	225	310

Es ergaben sich signifikante Unterschiede einerseits zwischen den KHD-Werten für die beiden EOS und andererseits zwischen KHD- und FEhS-Werten. Die Unterschiede zwischen den beiden EOS könnten z.B. auf unterschiedlich hohe Anteile an Fe-Oxiden und/oder metallischem Fe in der kleinen zu testenden Probenmenge von 30 g zurückgeführt werden. Hinsichtlich der Unterschiede zwischen KHD und FEhS-Institut lassen sich ohne konkrete Vergleichsversuche an denselben Stoffen keine belastbaren Aussagen treffen. Bereits 2019 waren eine kristalline Stahlwerksschlacke und ein Hüttensand bei beiden Prüfstellen untersucht worden (Tabelle 9). Es hatte sich gezeigt, dass bei den Messwerten für die Stahlwerksschlacke erhebliche Unterschiede auftraten, wohingegen die Messungen am Hüttensand vergleichsweise gut übereinstimmten. Dies ist zumindest ein Indiz dafür, dass ein zufällig in der getesteten Probe vorhandene Anteil sehr schwer mahlbarer Phasen einen entscheidenden Einfluss auf das Messergebnis hat. Bei Stahlwerksschlacke können solche Phasen auftreten, wohingegen Hüttensand ein sehr homogenes Glas ist. Vor vielen Jahren durchgeführte Vergleichsversuche mit unterschiedlichen Stoffen zwischen verschiedenen Prüfstellen hatten eine hohe Spannweite der Messergebnisse in der Höhe des Faktors 2 ergeben [17].

Tabelle 9: Mahlenergiebedarf nach Zeisel in kWh/t für vergleichende Untersuchungen

	SWS		**HS**	
	KHD	FEhS	KHD	FEhS
2000 cm²/g	25	35	29	32
4000 cm²/g	98	64	67	75
6000 cm²/g	377	117	154	168

[17] Institut für Nichtmetallische Werkstoffe der TU Clausthal: Vergleichende Untersuchungen an verschiedenen Mahlbarkeitsprüfern. Abschlussbericht vom 20.01.1997, ergänzt am 24.09.1997

2.2.6 Konzeptionierung einer industriellen Aufbereitungsanlage mit Berücksichtigung neuralgischer Komponenten

Basierend auf den Ergebnissen des AP 2.e erstellte KHD im Auftrag des FEhS-Instituts im April 2024 einen Bericht mit dem Titel "Konzeption einer Fertigmahlanlage für Elektroofenschlacke (EOS)". Ein zentraler Bestandteil des Berichts ist ein Fließbild zur EOS-Fertigmahlung (Bild 14).

Das vorgeschlagene Konzept entspricht weitestgehend der typischen Konzeptionierung der Fertigmahlung mit Rollenpressen für die Trocknungsmahlung zementärer Produkte mit feuchten Additiven (z.B. Hüttensandmahlung). Hierbei befindet sich die Rollenpresse direkt über dem V-Sichter, wodurch das erzeugte Feingut direkt ausgesichtet und das Umlaufmaterial getrocknet wird. Eine derartige Anordnung wird bei KHD als COMFLEX®-System bezeichnet. Zusätzlich dazu wird eine Möglichkeit zur magnetischen Sortierung des Umlaufmaterials vorgesehen, wobei davon ausgegangen werden muss, dass aufgrund der kleinen Primärkorngrößen der magnetischen Anteile, im Gegensatz zur Hüttensandmahlung, kein sortenreines Ausbringen vor allem der Fe-Oxid-Anteile erwartet werden kann. Ein großer Nachteil bei der Mahlung von EOS ist die Anreicherung des schwer mahlbaren magnetischen Guts im Umlaufmaterial. Das Becherwerk ist daher mit großen Margen auszulegen. Außerdem wird eine Möglichkeit zur Entleerung des Umlaufmaterials vorgesehen, falls der Analagenbetrieb quasikontinuierlich erfolgen und das angereicherte Umlaufmaterial regelmäßig entfernt werden soll. Das Aufgabefrischgut wird je nach Materiallevel im Vorbunker über der Rollenpresse zudosiert, abgesiebt und von groben, metallischen Anteilen befreit. Das vom 1. Metalldetektor erfasste Frischgut wird über einen 2. Metalldetektor nachsortiert. Das in der Rollenpresse zerkleinerte Material wird direkt in den V-Sichter geleitet und dort deagglomeriert, vorgesichtet und ggf. durch eingeleitete Heißgase getrocknet. Das Feingut wird an einem SKS-Sichter nachgesichtet. Das Produkt wird schließlich direkt an einem Schlauchfilter abgeschieden. Während der Mahlung ist eine Aussortierung der magnetischen Bestandteile aufgrund der angenommenen Fe-Oxid-Primärkorngröße < 10 µm wahrscheinlich nicht effizient umsetzbar. Es wird daher, wie bereits erwähnt, davon ausgegangen, dass sich im Grobgut magnetische Komponenten mit hoher Dichte anreichern (vgl. auch Tabelle 7). Um den Kreislauf von Zeit zu Zeit säubern zu können, wird vorgeschlagen eine magnetische Sortierung oder direkte Ausschleusung des Kreislaufmaterials vorzusehen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass im Vergleich zu typischen Hüttensanden bei der EOS-Mahlung mit einem erhöhten spezifischen Mahlenergiebedarf, erhöhtem Verschleiß und einer Anreicherung schwerer mahlbarer Komponenten im Umlauf zu rechnen.

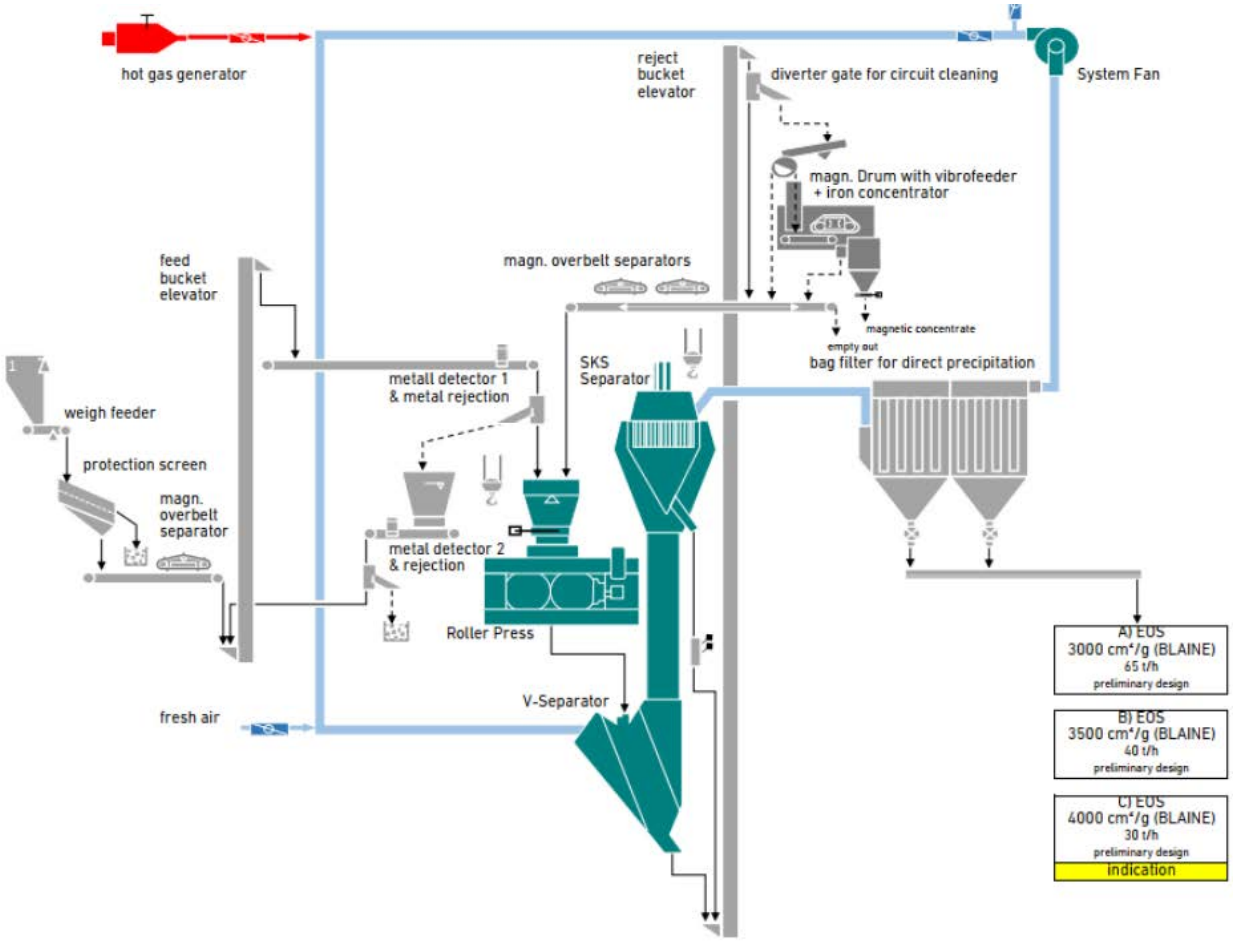


Bild 14: Fließbild zur industriellen Fertigmahlung von EOS

Die vorläufigen Spezifikationen der Hauptaggregate für einen EOS-Durchsatz im stationären Betrieb (30 t/h bei 4000 cm²/g) wurden wie folgt definiert:

Rollenpresse:
- 16 MN installierte Presskraft
- maximal 1,4 m/s Umfangsgeschwindigkeit
- 2 x 1,1 MW installierte Leistung
- erwartete Durchsätze 600-1000 t/h, je nach Produktfeinheit
- Becherwerksmarge rd. 50 %
- Rasterpanzerung mit Studs für minimalen Verschleiß der Walzen

Sichtsystem:
- Ventilator mit 165.000 Nm³/h (Betrieb bei 90 °C Umluft) und 0,7 MW installierter Leistung
- statischer V-Sichter mit 5 m² Sichtfläche
- dynamischer Sichter mit 16 m² Stabkorbfläche bei H/D von 1,5 und mit maximal 40 m/s Umfangsgeschwindigkeit sowie 100 kW installierter Leistung
- Filterdirektabscheidung mit maximal 15 mbar Druckverlust

2.3 Bindemittelaktivierung

Das Ziel des Arbeitspakets "Bindemittelaktivierung" bestand im Nachweis, dass kristalline Stahlwerksschlacken mit geeigneten Aktivatoren aktiviert werden können. Darüber hinaus sollte auch der Einfluss der Mahlfeinheit auf die Aktivierungseigenschaften geklärt werden. Das Arbeitspaket gliederte sich in zwei Hauptbereiche:

- Identifikation geeigneter Aktivatoren zur Aktivierung kristalliner Stahlwerksschlacken.
- Optimierung der Bindemittelzusammensetzung der in Arbeitspaket 1 identifizierten Produkte.

Im Kontext der Aktivierung von Hüttensanden und Flugaschen sind vor allem alkalische Aktivatoren wie Pottasche, Soda sowie Natrium- und Kalium-Wassergläser bekannt. Diese Aktivatoren bewirken im Allgemeinen die Freisetzung von Ionen aus den Schlacken, wodurch diese für weitere Reaktionsschritte zugänglich werden. Im Rahmen des Arbeitspakets wurde untersucht, inwieweit diese Substanzen auch für die Aktivierung von Stahlwerkschlacken geeignet sind, oder ob alternative, wirtschaftlichere Stoffe in Betracht gezogen werden können.

Eine zentrale Fragestellung dieses Projekts bestand darin, die Reaktivität von Stahlwerkschlacken zu bewerten und geeignete Kriterien für deren Definition zu entwickeln. Zu diesem Zweck wurde eine Referenzmörtelrezeptur erstellt, die eine systematische Prüfung verschiedener Schlackearten ermöglicht. Diese Referenzrezeptur bildete die Grundlage für eine vergleichende Analyse sowie die Optimierung der Aktivierungseigenschaften kristalliner Stahlwerkschlacken (Bild 15):

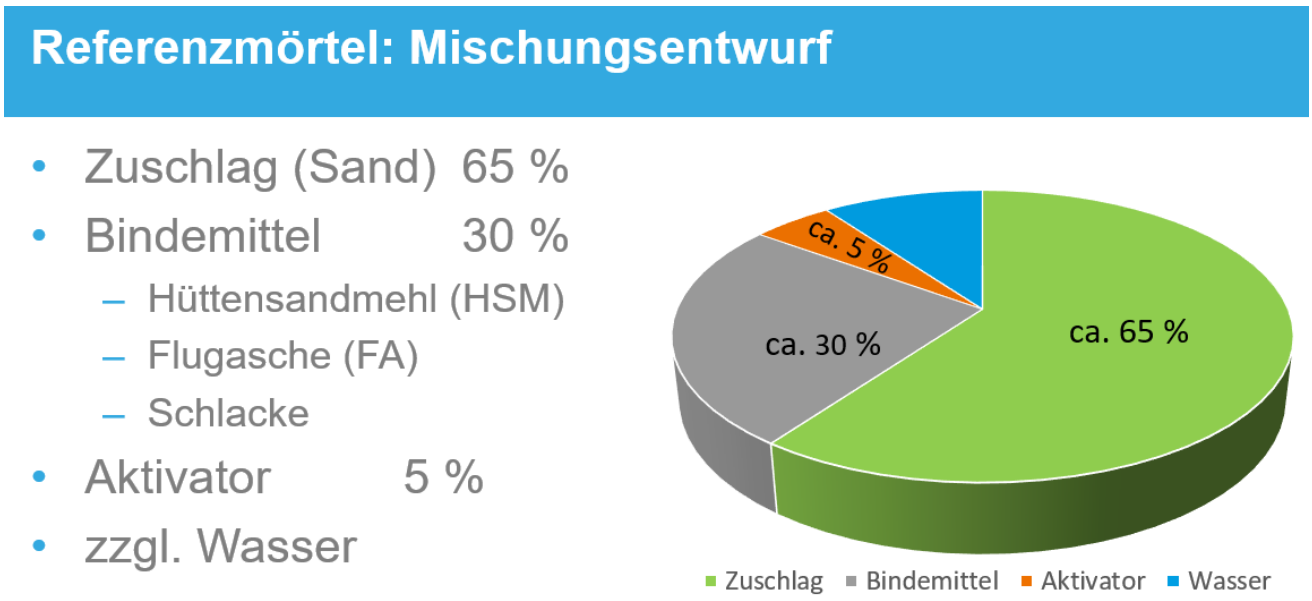


Bild 15: Zusammensetzung der Referenzmischung

Die untersuchte Rezeptur basierte auf einer Standardsieblinie, die durch den verwendeten Zuschlag (65 %) definiert wird. Diese wird mit einem Gesamtanteil von 30 % Bindemittel vermischt und mit einem zusätzlichen Aktivator angereichert. Während aller Versuchsdurchgänge bleiben die Rezepturparameter konstant, um vergleichbare Ergebnisse zu gewährleisten.

Zur Bewertung der Reaktivität der Stahlwerksschlacken wurden zwei Szenarien definiert:

- Worst-Case-Szenario: Darstellung eines Szenarios mit minimaler Reaktivität der Schlacke.
- Best-Case-Szenario: Untersuchung der maximal erreichbaren Reaktivität der Schlacke.

Die Reaktivität der Stahlwerksschlacken wird anhand der gemessenen Druckfestigkeit der Proben bewertet. Diese Methodik erlaubt eine systematische Gegenüberstellung der Leistungsfähigkeit der Schlacken unter variierenden Bedingungen.

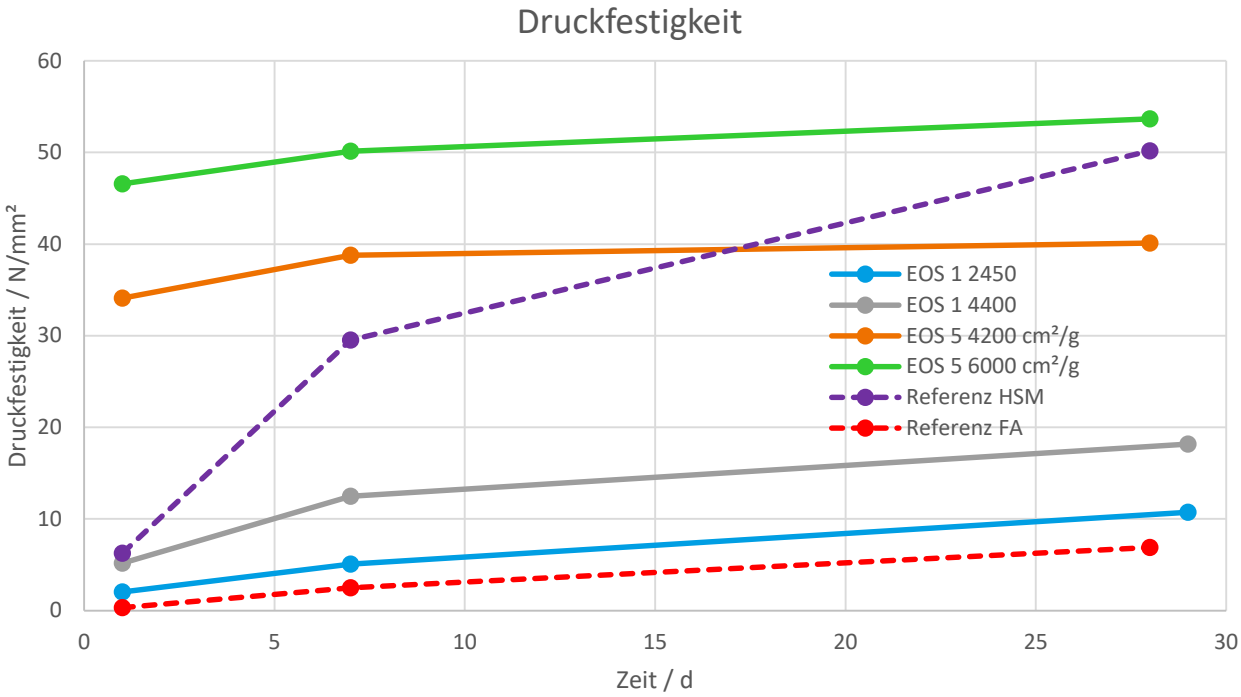


Bild 16: Festigkeitsentwicklung kristalliner (EOS 1) und wassergranulierter (EOS 5) Schlacken

In Bild 16 wurde die Festigkeitsentwicklung über 28 Tage aufgenommen. Als untere Grenze (roter Verlauf) diente eine Rezeptur mit Flugasche, die als „worst case“ definiert wurde. Sobald die Festigkeitsentwicklung einer Schlacke diesen Punkt übersteigt, kann von einer gewissen Aktivität des Bindemittels ausgegangen werden. Als obere Grenze dient eine Mischung mit Hüttensandmehl, die eine gute Reaktivität aufweist. Idealerweise befinden sich die Stahlwersschlacken oberhalb vom „worst case“. Die ungranulierten Proben sind in der Bild 16 mit EOS 1 2450 cm²/g (blauer Verlauf) und EOS 1 4400 cm²/g (grauer Verlauf) beschriftet und liegen oberhalb des „worst case“, sodass von einer gewissen Reaktivität der ungranulierten Schlacken gesprochen werden kann. Zum Vergleich wurde die teilglasige EOS 5 getestet. Diese zeichnet sich durch eine sehr hohe Frühfestigkeit aus, sodass bereits nach einem Tag die Festigkeit bei etwa 34 MPa liegt und bereits 85 % der Festigkeitsentwicklung realisiert wurde. Nach 7 Tagen ist fast die komplette Druckfestigkeits-entwicklung abgeschlossen. Im Vergleich zu der EOS 5 reagiert ein Mörtel auf Basis von Hüttensandmehl deutlich moderater. Egal ob es sich um amorphe oder um teilkristalline

Stahlwerksschlacken handelt, der Blaine-Wert als Maß für die Mahlfeinheit, hat einen Einfluss auf die Festigkeitsentwicklung. Mit kleineren Partikelgrößen erhöht sich das Oberfläche zu Gewicht-Verhältnis, wodurch der Aktivator eine größere Angriffsfläche aufweist, um die Ionen von der Oberfläche in Lösung zu bringen. Eine größere Anzahl an verfügbaren Ionen bedeutet, dass die Reaktion zur Festigkeitsbildung schneller ablaufen kann.

Zusammenfassend kann aus den Ergebnissen gefolgert werden, dass die kristallinen Stahlwerksschlacken eine gewisse Reaktivität aufweisen, die jedoch unter der eines amorphen Rohstoffs liegt. Insbesondere für die Verwendungen in Ringspaltverfüllmaterialien ist dieses Festigkeitsniveau gut geeignet, um die Festigkeit des umgebenen Gesteins abzubilden. Zur Ermittlung der optimalen Rezeptur wurde ein systematisches Versuchsprogramm aufgestellt. In diesem Versuchsprogramm werden Zielgrößen, wie der minimale EOS-Gehalt oder der Konzentrationsbereich der Aktivatoren definiert. Diese Parameter fließen in eine Software, die daraus diverse EOS-Rezepturen generiert. Alle Rezepturen, auch wenn sie auf den ersten Blick nicht zielführend sind, werden systematisch hergestellt. Die aufgenommenen Messwerte werden in das Programm eingetragen und mit Hilfe der Software aufgearbeitet, sodass logische Verknüpfungen gesucht werden können. Diese werden grafisch in Form von x,y-Diagrammen dargestellt. Zur besseren Übersicht werden ähnliche Wertebereiche durch Farben kenntlich gemacht, sodass man auf den ersten Blick ähnliche Werte wiederfindet. Der große Vorteil ist, dass das Programm nicht nur die Messwerte an den ermittelten Punkten, sondern auch beliebige Konstellationen inter- und extrapolieren kann. Auf diese Weise kann das Programm nach der Definition der soll Eigenschaften eines Ringspaltmörtels, wie Druckfestigkeit oder Scherfestigkeit, die optimale Zusammensetzung berechnen, um das vorab gesteckte Ziel bestmöglich zu erreichen.

Mit der EOS 1 (Blaine: 4400 cm²/g) wurde unter Verwendung der Software Minitab® ein optimierter faktorieller Versuchsplan mit 27 Rezepturen durchgeführt, bei dem der EOS-Gehalt (10 %, 20 %, 30 %), der Wassergehalt (9 %, 10,5 %, 12 %) und der Aktivatorgehalt (3 %, 5,5 %, 8 %) variiert wurden. Auf Grundlage der 27 Mischungen wurden Rohdaten, wie Druckfestigkeit oder Scherfestigkeit, bestimmt und die Software hat daraus die folgenden Diagramme, hier am Beispiel der Druckfestigkeit, hergestellt:

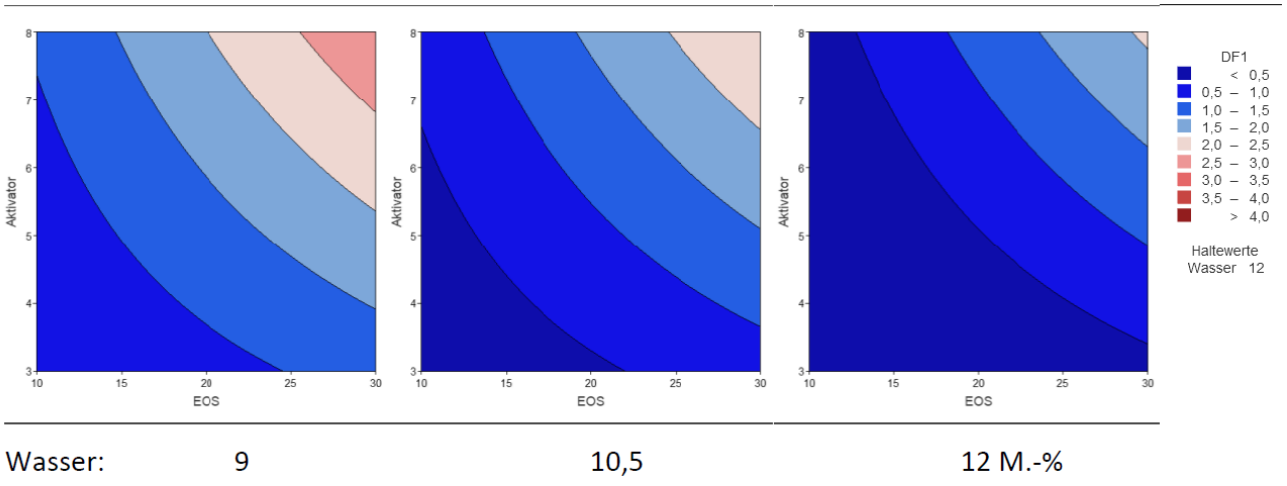


Bild 17: Auswirkung des Wassergehaltes gegenüber der Aktivatorkonzentration auf die Druckfestigkeit nach einem Tag

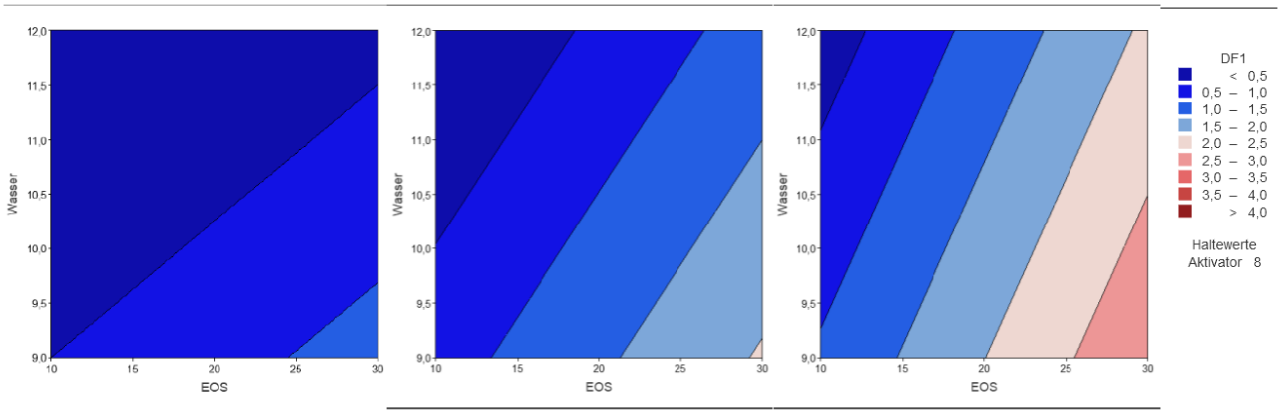


Bild 18: Auswirkung des EOS-Gehaltes gegenüber des Zugabewassers auf die Druckfestigkeit nach einem Tag

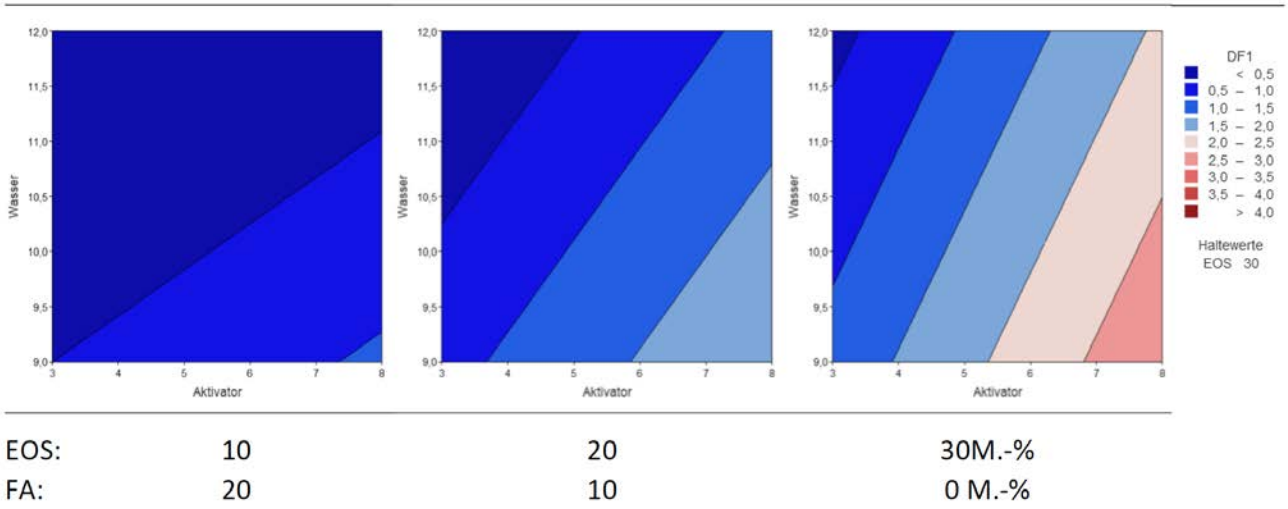


Bild 19: Auswirkung der Aktivatorkonzentration gegenüber der Zugabewasserkonzentration auf die Druckfestigkeit nach einem Tag

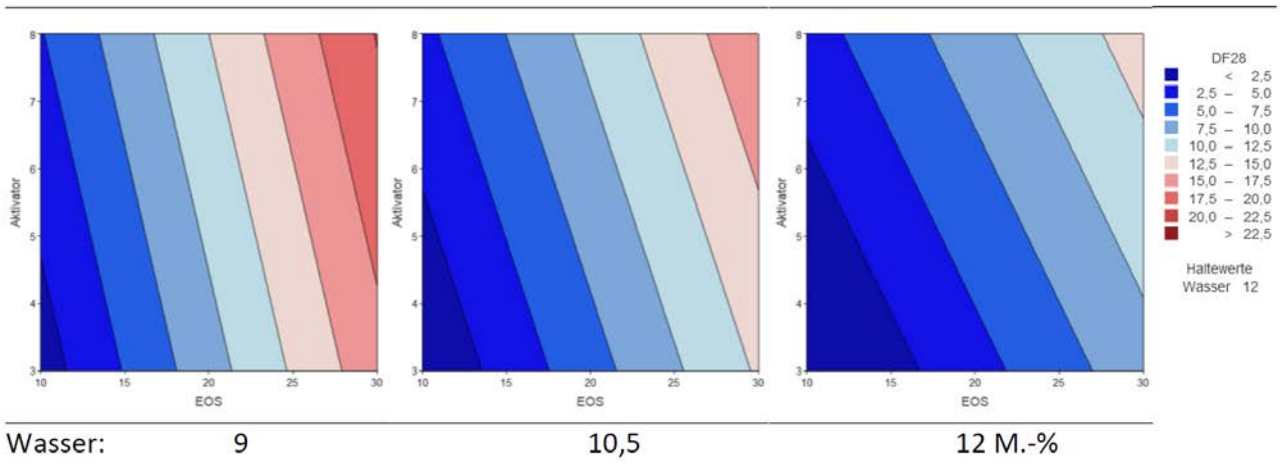


Bild 20: Auswirkung des Wassergehaltes gegenüber der Aktivatorkonzentration auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen

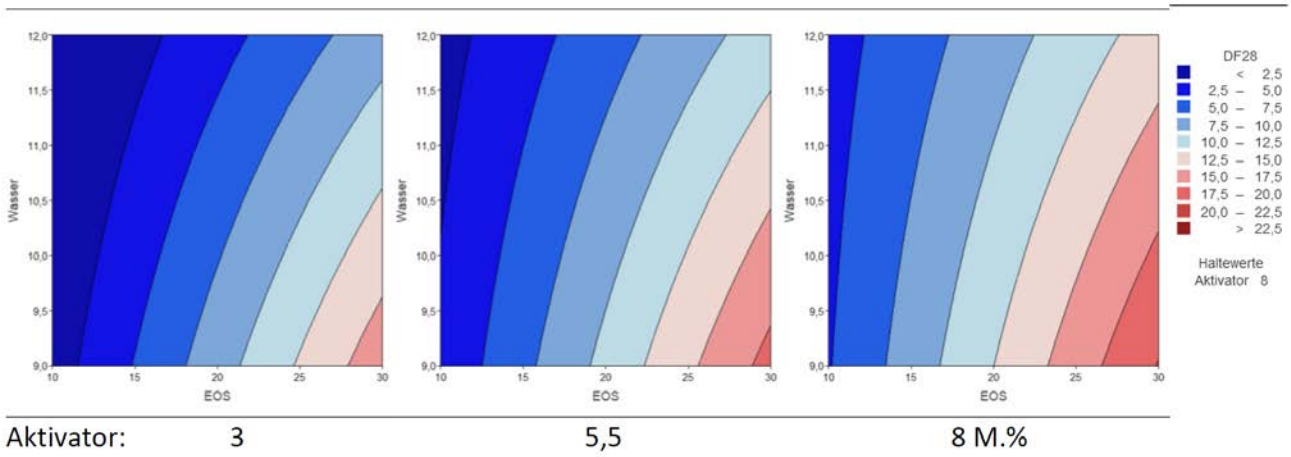


Bild 21: Auswirkung des EOS-Gehaltes gegenüber des Zugabewassers auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen

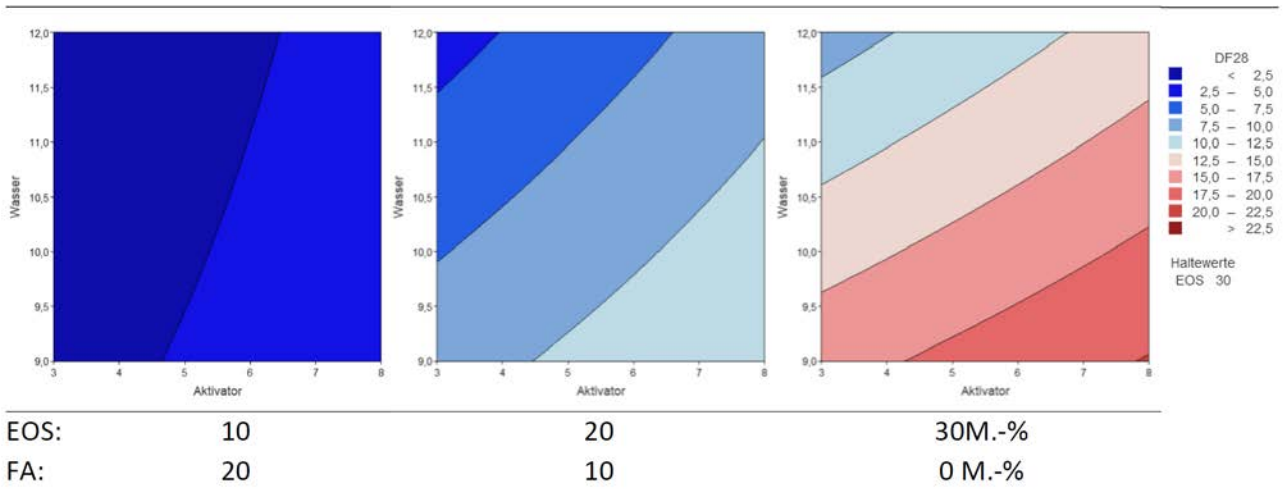


Bild 22: Auswirkung der Aktivatorkonzentration gegenüber der Zugabewasserkonzentration auf die Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Bild 17 (9 % Wasser) stellt den Massenanteil EOS gegen die Konzentration des Aktivators aufgetragen dar. Die Software Minitab® visualisiert Bereiche gleicher Druckfestigkeiten mit farblichen Schattierungen. Beispielsweise zeigt die dunkelblaue Einfärbung den Bereich mit einer Druckfestigkeit zwischen 0,5 – 1,0 MPa an. Bei einer Aktivatorkonzentration von 3 % kann der EOS-Massenanteil zwischen 10 und etwa 24 % variiert werden, ohne das mit signifikanten Druckfestigkeitssteigerungen gerechnet werden kann. Erst oberhalb von 24 % kristalliner Stahlwerksschlacke resultiert eine Steigerung der Festigkeit zur nächsten Festigkeitsklasse von 1,0 – 1,5 MPa. Gemäß dem Anforderungsprofil (AP 1) ist nach einem Tag mindestens eine Druckfestigkeit von 0,5 MPa zu erreichen. Bei einem Wassergehalt von 9 % ermittelt das Programm Minitab®, dass alle Rezepturen diesen Wert übersteigen und zwischen 0,5 und 3,0 MPa lägen. Bei einer Erhöhung des Wassergehalts auf 10,5 % unterschreitet die Festigkeit den Wert von 0,5 MPa (dunkelblauer Bereich). Bei einer Aktivatorkonzentration von 3 % erstreckt sich dieser Bereich bis zu einem EOS-Massenanteil von etwa 22 %. Geringere Massenanteile erfüllen das Kriterium des Anforderungsprofils aus AP 1 nicht und sind somit nicht für eine Ringspaltmörtelrezeptur geeignet. Eine weitere Erhöhung des Wasseranteils führt entsprechend zu einer Vergrößerung des dunkelblauen Farbbereichs, der nicht für einen Ringspaltmörtel geeignet ist. Nach diesem Schema können analog auch die Diagramme aus Bild 18 und Bild 19 ausgewertet werden. Es kristallisieren sich immer mehr Bereiche aus, die die Anforderungen nicht erfüllen, sodass immer weniger Rezepturen zur Verfügung stehen.

Es folgt die Auswertung der Druckfestigkeitswerte nach einer Aushärtungszeit von 28 Tagen. In Bild Bild 20 (9 % Wasser) ist der EOS-Massenanteil gegenüber der Aktivatorkonzentration aufgetragen. Alle Werte übersteigen die Druckfestigkeit von 1,5 MPa und erreichen in der Spitze Werte oberhalb von 22,5 MPa. Für einen Ringspaltmörtel ist dieser Wert grenzwertig und sollte nicht eingesetzt werden. Die dargestellte Erörterung der Ergebnisse basiert auf lediglich zwei Diagrammschemata und mit weiteren Diagrammen wird die Darstellbarkeit immer weiter erschwert. Mithilfe der Software Minitab® wird eine strukturierte Analyse ermöglicht, da spezifische Randbedingungen direkt in die Software integriert werden können. Auf Grundlage dieser Daten ist das Programm in der Lage, fundierte Empfehlungen für mögliche Rezepturen von Ringspaltmörtel zu generieren.

Folgende Zielgrößen (Vergleiche Kapitel 2.1) wurden in der Software Minitab® hinterlegt:

- Maximaler EOS Gehalt
- Mindest FA-Gehalt von 10 M.-% aus Verarbeitungsgründen
- Minimaler Aktivatorgehalt (Wirtschaftlichkeit)
- Scherfestigkeit nach 30 min ≥ 2 N/mm²
- Druckfestigkeit nach 1 d ≥ 0,5 N/mm²
- Druckfestigkeit nach 28 d ≥ 1,5 N/mm²

Aus der Gesamtmenge an Daten wurde mittels Software folgende Rezeptur als am besten geeignet ermittelt:

- 20 % EOS
- 3 % Aktivator
- 9 % Wasser

Zur Bestätigung dieser Ergebnisse wurden vier weitere Schlacken hergestellt, gemahlen und untersucht. Die Ergebnisse sind in Bild 23 dargestellt. Keine dieser Schlacken konnte jedoch die Reaktivität der ersten Schlacke auch nur annähernd erreichen. Nach 28 Tagen musste eine Druckfestigkeit aufgenommen werden, die mehr als 95 % niedriger war als die ursprüngliche EOS 1. Mit diesen Schlacken können, die in Arbeitspaket 1 definierten Grenzwerte nicht erfüllt werden. Die Zusammensetzung der Schlacke hängt signifikant von den Eingangsstoffen, dem sogenannten Schrottmix, zusammen. Durch die veränderten Rohstoffe bilden sich andere kristallinen Phasen aus, die unterschiedlich gut aktivierten werden können. Des Weiteren wird die Phasenausbildung durch die äußeren Bedingungen im Abkühlprozess beeinflusst. Unter den üblichen Bedingungen eines Stahlwerks ist es daher nicht möglich, eine für die Bauindustrie standardisierte Qualität kristalliner Stahlwerksschlacke herzustellen. Um eine konstant hohe Qualität zu erreichen, wäre der Einsatz amorpher Schlacken erforderlich.

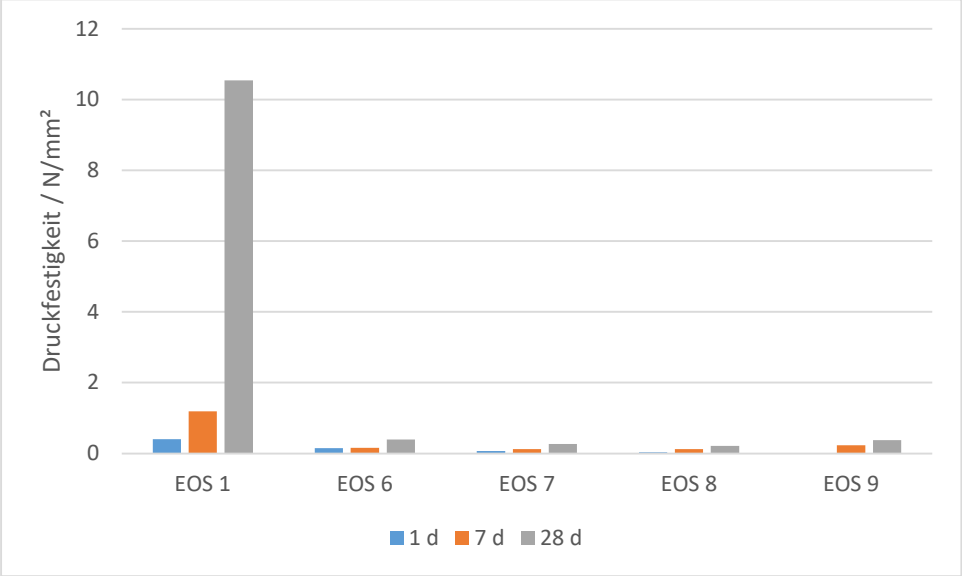


Bild 23: Druckfestigkeit von kristallinen Schlacken in Abhängigkeit der Zeit

2.3.1 Aktivierung mit Portlandzementklinker

Da in Ergänzung der ursprünglichen Planung, die nur kristalline EOS beinhaltete, auch (teil)glasige wassergranulierte Schlacken in das Versuchsprogramm aufgenommen wurden, erschien es sinnvoll orientierend zu prüfen, ob sich diese Schlacken auch mit Portlandzementklinker aktivieren lassen, um sie ggf. in herkömmlichen zementären Systemen nutzen zu können. Die gemahlenen Schlacken wurden zu 50 M.-% mit Portlandzement CEM I 42,5 R, der die Anforderungen an einen Testzement nach DIN EN 15167-1 bzw. DIN EN 450-1 erfüllte, kombiniert und hinsichtlich ihrer Festigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 196-1 geprüft (Bild 24). Zum Vergleich dienen Kombinationen mit inertem gemahlenen Quarzsand und mit verschiedenen Hüttensanden, die das FEhS-Institut im Rahmen seines Monitorings in den Jahren 2008-2020 ermittelte.

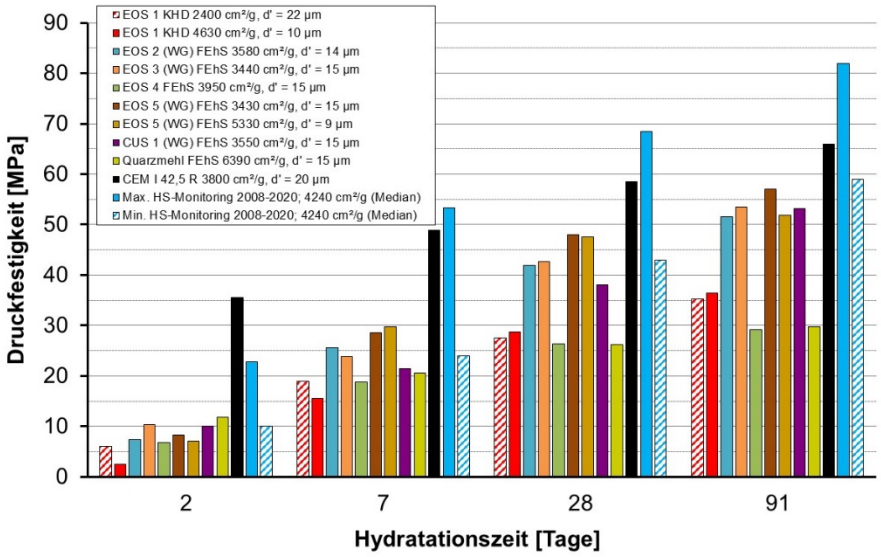


Bild 24: Festigkeitsentwicklung von Mischungen aus je 50 M.-% Schlacke und Portlandzement CEM I 42,5 R

Die Ergebnisse zeigen, dass die Zemente mit den wassergranulierten EOS 2, 3, 5 ab dem 7. Hydratationstag einen signifikanten Festigkeitsbeitrag leisten. Bei der CUS 1 ist dies erst nach 28 Tagen erkennbar. Erwartungsgemäß ist für die kristallinen EOS 1 und 4 kein nennenswerter Festigkeitsbeitrag erkennbar. Nach 2 Tagen ist sogar im Vergleich zur Kombination mit Quarzsandmehl eher von einem negativen Einfluss auszugehen. Überraschend ist, dass bei der EOS 5, die in 2 Feinheiten untersucht wurde, kein sonst üblicher positiver Effekt einer höheren Feinheit erkennbar ist. Auch ist hervorzuheben, dass noch nach 91 Tagen die Festigkeitsentwicklung der Zemente mit EOS 2, 3, 5 und CUS 1 unter dem Minimum hüttensandhaltiger Zemente liegt. Dies ist auf den z.T. deutlich geringeren Glasgehalt (EOS 2 und EOS 5), die sehr geringe Basizität (EOS 3) sowie die langsamere puzzolanische und nicht latent-hydraulische Reaktion der CUS 1 zurückzuführen. Ob es auch einen negativen Einfluss der erhöhten Schwermetallgehalte, z.B. auf die Klinkerreaktion oder die Glasstruktur, gibt oder ob sich die hohen Fe-Oxid-Gehalte im Allgemeinen oder bestimmte Mineralphasen im Besonderen (z.B. Brownmillerit) negativ auswirken, wurde in SABINE nicht weiter untersucht. Aus den aufgezeigten Festigkeitsentwicklungen lässt sich aber der Schluss ziehen, dass Portlandzementklinker zur Aktivierung der (teil)glasigen Schlacken geeignet ist. Die orientierenden Untersuchungen weisen demnach ein hohes Potential wassergranulierter EOS

und CUS aus, um sie als Zementbestandteil nutzen zu können. Dieses Potential sollte in künftigen Untersuchungen eingehend bewertet werden.

2.4 Geotechnische Baustoffe

Ziel des Arbeitspaketes „Geotechnische Baustoffe“ war der Nachweis der Anwendbarkeit der entwickelten innovativen geotechnischen Baustoffe unter baupraktischen Bedingungen und Berücksichtigung technischer Regelwerke und normativer Vorgaben.

Wie in Kapitel 2.3 dargestellt, wurde die optimal an die Anforderungen angepasste Rezeptur unter Verwendung von EOS 1 ermittelt. Für die Durchführung der Indexversuche wurden von den jeweiligen Schlacken im 1. Durchgang begrenzte Schlackenmengen im Labormaßstab (ca. 15 kg) gemahlen, um die erheblichen Kosten für die industrielle Mahlung großer Schlackenmengen (3 t) nur für die erfolgreichen Schlacken zu investieren. Daher war geplant, die erforderlichen größeren Mengen für das geotechnische Versuchsprogramm zur Entwicklung baustofftechnologischer Mischungsentwürfe mit nachträglich hergestellten, identischen Schlackechargen (analog EOS1) durchzuführen. Aufgrund der unerwartet angetroffenen fehlenden Reproduzierbarkeit der kristalinen Schlacken wurde für das geotechnische Versuchsprogramm anstelle von kristalinen Schlacken auf teilamorphe Schlacken (EOS 5) und Kupferschlacke (CUS 2) zurückgegriffen. Diese amorphen Schlacken ermöglichen die Herstellung geeigneter, den Anforderungen entsprechenden, geotechnischer Baustoffe. Dabei besteht jedoch, wie oben dargestellt, ein Problem für die praktische Umsetzung bei EOS in der großtechnischen Verfügbarkeit amorpher Schlacken.

Für die teilamorphen Schlacken (EOS 5 und CUS 2) wurde analog zur ursprünglich betrachteten kristallinen Schlacke EOS 1 ein systematisches Versuchsprogramm zur Optimierung der Rezeptur durchgeführt. Im Rahmen dieses Versuchsprogramms wurden für die Schlacken EOS 5 und CUS 2 die resultierenden einaxialen Druckfestigkeiten unter folgenden Variationen untersucht:

- Wassergehalt: 9 %, 10,5 %, 12 %
- Schlackegehalt: 10 %, 20 %, 30 % (bei einem konstanten Flugascheanteil von 30 % abzüglich des Schlackeanteils)
- Aktivatorgehalt: 3 %, 5,5 %, 8 %

Das Versuchsprogramm weist eine große Streuung auf. Die angetroffenen Konsistenzen reichten teilweise von flüssig bis fest, so dass die entsprechenden Messungen nicht durchgeführt werden konnten (n.b.), da die Flügelsonde nicht eingeführt werden konnte.

Tabelle 10 zeigt das Ergebnis der Indexversuche für EOS 5. Neben der einaxialen Druckfestigkeit nach 1d, 7d und 28 d wurde auf das Setzmaß vor Aktivatorzugabe und die einer Flügelsonde ermittelte Scherfestigkeit zu den Zeitpunkten 10. 20 und 30 Minuten nach Aktivatorzugabe ermittelt. Das Versuchsprogramm weist eine große Streuung auf. Die angetroffenen Konsistenzen reichten teilweise von flüssig bis fest, so dass die entsprechenden Messungen nicht durchgeführt werden konnten (n.b.), da die Flügelsonde nicht eingeführt werden konnte.

Tabelle 10: Ergebnis EOS5, Setzmaß, Flügelscherfestigkeiten nach 10, 20 und 30 Minuten, einaxiale Druckfestigkeiten nach 1, 7 und 28 Tagen

Versuchsnummer optimaler Plan	EOS Gehalt	Aktivatorgehalt	Zugabewasser	EOS5						
				Setzmaß	FSV 10'	FSV 20'	FSV 30'	DF 1	DF 7	DF 28
	M.-%	M.-%	M.-%	mm	kN/m²	kN/m²	kN/m²	N/mm²	N/mm²	N/mm²
1	20	8	9		6 kPa	51 kPa	n.b.	9,499	22,670	32,270
2	30	8	9	71	22 kPa	n.b.	n.b.	12,700	36,250	38,610
3	20	3	10,5	43	3 kPa	6 kPa	8 kPa	0,026	4,017	11,528
4	10	5,5	10,5	28	25 kPa	37 kPa	54 kPa	0,246	9,083	12,690
5	20	3	12	65	n.b.	n.b.	n.b.	0,000	0,000	0,009
6B	20	8	10,5	39	31 kPa	220 kPa	240 kPa	10,635	20,370	28,140
7	20	8	12	60	20 kPa	56 kPa	n.b.	5,207	13,560	19,390
8	20	5,5	9		54 kPa	n.b.	n.b.	4,857	18,340	24,470
9	10	3	9		11 kPa	15 kPa	22 kPa	0,000	0,052	0,002
10	30	3	10,5	75	3 kPa	41 kPa	52 kPa	10,043	12,663	35,540
11	10	8	12	49	2 kPa	59 kPa	n.b.	2,366	5,902	10,520
12	30	3	9	70	14 kPa	54 kPa	n.b.	10,757	35,850	38,700
13	10	3	10,5		3 kPa	7 kPa	15 kPa	0,059	0,075	0,178
14	30	5,5	10,5	74	21 kPa	n.b.	n.b.	12,700	29,680	1,570
15	10	5,5	12		0 kPa	41 kPa	43 kPa	2,332	11,938	23,860
16	30	5,5	9	69	0 kPa	152 kPa	n.b.	12,700	35,770	38,200
17	30	3	12	73	1 kPa	46 kPa	96 kPa	4,823	16,780	9,720
18	30	5,5	12	78	2 kPa	108 kPa	240 kPa	5,521	19,690	31,670
19	30	8	12	88	27 kPa	200 kPa	n.b.	11,524	21,930	26,170
20	10	8	10,5		n.b.	37 kPa	54 kPa	3,459	5,297	12,687
21	20	5,5	10,5	36	15 kPa	108 kPa	188 kPa	9,191	25,670	34,890
22	10	8	9		1 kPa	47 kPa	156 kPa	5,248	9,100	26,250
23	30	1	10,5	flüssige Konsistenz				0,000	-	-
24	30	1,5	9		2 kPa	7 kPa	17 kPa	0,081	-	-

Bei in roter Schriftfarbe dargestellten Festigkeiten wurde die Maximallast der Prüfeinrichtung überschritten, so dass der Versuch vor Eintreten eines Probekörperversagens abgebrochen werden musste. Die rot angegebenen Werte liegen daher unter den tatsächlichen Festigkeiten.

Für EOS 5 variieren die gemessenen Festigkeiten zwischen weicher Konsistenz (nicht messbare Festigkeitsentwicklung) bis über 38 N/mm². Für die CUS 2 wurden Festigkeiten zwischen weicher Konsistenz bis ca. 12 N/mm² ermittelt.

Mit Mischung Nr. 12 (in Das Versuchsprogramm weist eine große Streuung auf. Die angetroffenen Konsistenzen reichten teilweise von flüssig bis fest, so dass die entsprechenden Messungen nicht durchgeführt werden konnten (n.b.), da die Flügelsonde nicht eingeführt werden konnte.

Tabelle 10 gelb markierte Zeile) mit den Parametern 30% Schlacke, 3 % Aktivator und 9 % Wasserhalt wurden im geotechnischen Versuchsprogramm Oedometerversuche und Versuche zur Ermittlung der Durchlässigkeit durchgeführt.

Um die Abhängigkeit der resultierenden einaxialen Druckfestigkeit von den variierten Parametern (Aktivatorgehalt, Schlackegehalt und Wassergehalt) besser nachvollziehbar darzustellen, wurden die Festigkeiten in Bild 25 (EOS 5) und Bild 26 (CUS 2) mithilfe räumlich systematisch angeordneter Balkengrafiken visualisiert.

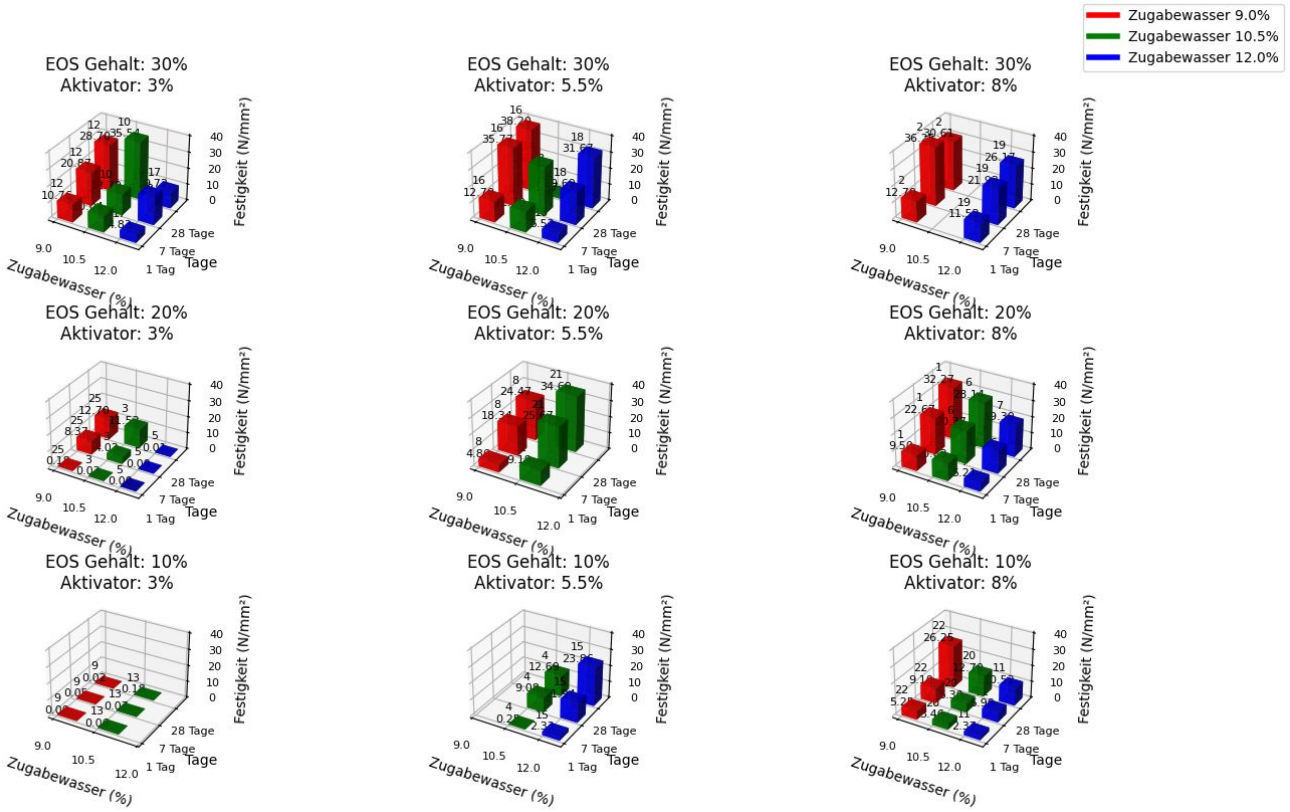


Bild 25: Einaxiale Druckfestigkeit von EOS_5 in Abhängigkeit von Schlacke, Wasser, und Aktivatorgehalt

Die Ergebnisse der EOS-Tests zeigen deutliche Unterschiede im Festigkeitsniveau zwischen den untersuchten Schlacke Sorten. Für CUS 2 wurde eine Festigkeit im Bereich von 0 bis 12 N/mm² gemessen, während EOS 5 mit einem Festigkeitsniveau von 0 bis 38 N/mm² deutlich höhere Werte aufweist. Es wurde eine anhaltende Festigkeitsentwicklung bei beiden Schlacken auch im Zeitraum zwischen 7 und 28 Tagen mit einer signifikanten Zunahme festgestellt. Der Gehalt an Aktivator spielt dabei eine zentrale Rolle, da er den Anteil an reagierender Schlacke maßgeblich beeinflusst. Höhere Aktivatorgehalte fördern die Reaktivität der Schlacke und tragen somit zur Festigkeitssteigerung bei. Gleichzeitig konnte festgestellt werden, dass ein zunehmender Wassergehalt zu einer Reduzierung der resultierenden Festigkeit führt.

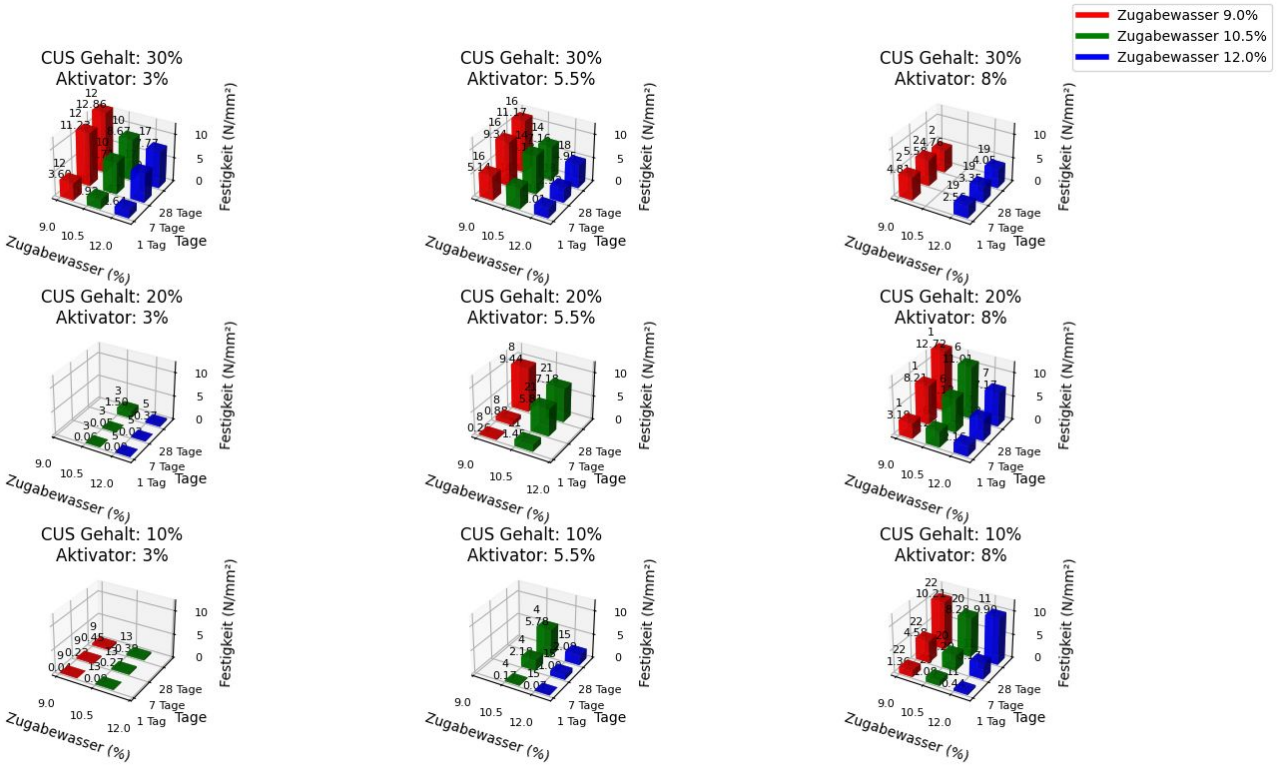


Bild 26: Einaxiale Druckfestigkeit von CUS_2 in Abhängigkeit von Schlacke, Wasser, und Aktivatorgehalt

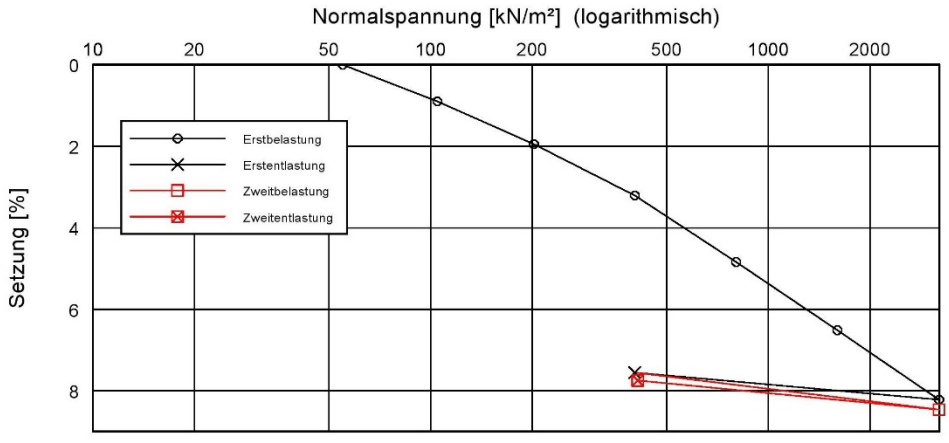
Ergebnisse Durchlässigkeitsversuche

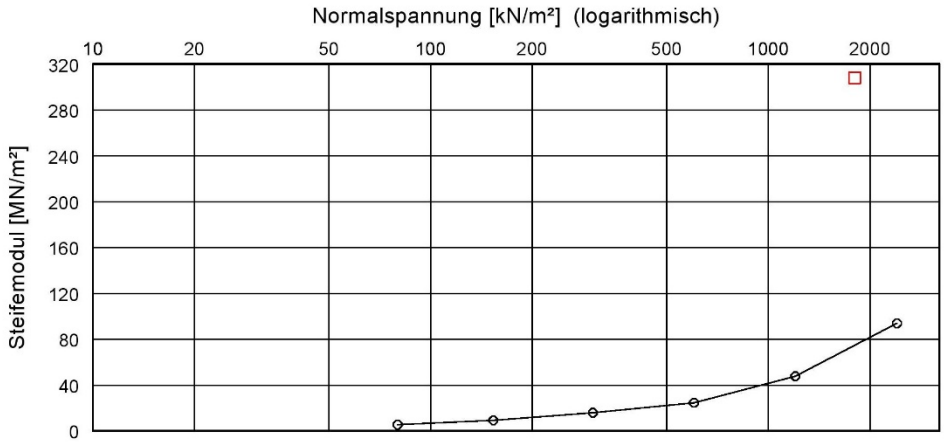
Die Durchlässigkeit von Ringspaltmörteln im maschinellen Tunnelvortrieb ist ein kritischer Parameter, der maßgeblich die Dichtigkeit und Stabilität des Tunnelbauwerks beeinflusst. Ziel ist es, den Ringspalt so abzudichten, dass unkontrollierter Wasserzutritt und Setzungen in der Umgebung des Tunnels vermieden werden. Die anzustrebende Durchlässigkeit des Mörtels hängt von den spezifischen geologischen und hydrogeologischen Bedingungen des Projekts ab. Die Bestimmung der Durchlässigkeit an Probekörpern 1K, EOS5 und CUS im Alter von 28 d zeigte bei allen Probekörper bei einem hydraulischen Gefälle von 2 bar keine messbare Durchlässigkeit. Damit werden die Forderungen nach Kapitel 2.1 sowohl für den Referenzmörtel, als auch die beiden teilamorphen Schlacken EOS 5 und CUS 2 unterschritten.

Oedometerversuche

Zu Bestimmung des Verformungs- und Konsolidationsverhaltens der geotechnischen Baustoffe unter einaxialer Belastung wurden Oedometerversuche an Proben mit der Mischung Nr. 12 (30% Schlacke, 3 % Aktivator und 9 % Wasserhalt) durchgeführt. Oedometerversuche werden in der Geotechnik eingesetzt, um Parameter zur Bewertung der Setzungs- und Tragfähigkeitsproblematik zu bestimmen. Der Versuch ermöglicht die Bestimmung des zeitabhängigen Verhaltens von Böden unter Belastung.

So ist Hauptzweck von Oedometerversuchen die Bestimmung des Kompressionsmoduls (Es), welcher die Verformungsfähigkeit des Bodens unter Belastung angibt. Auf dieser Basis kann eine Bewertung der Tragfähigkeit und Setzungprognose für Bauwerke, abgeleitet werden. Als Referenz zu den Proben auf Basis von Elektroofenschlacke und Kupferschlacke wurde ein konventioneller 1K Ringspaltmörtel auf Basis von Portlandzement gegenübergestellt (Bild 27).

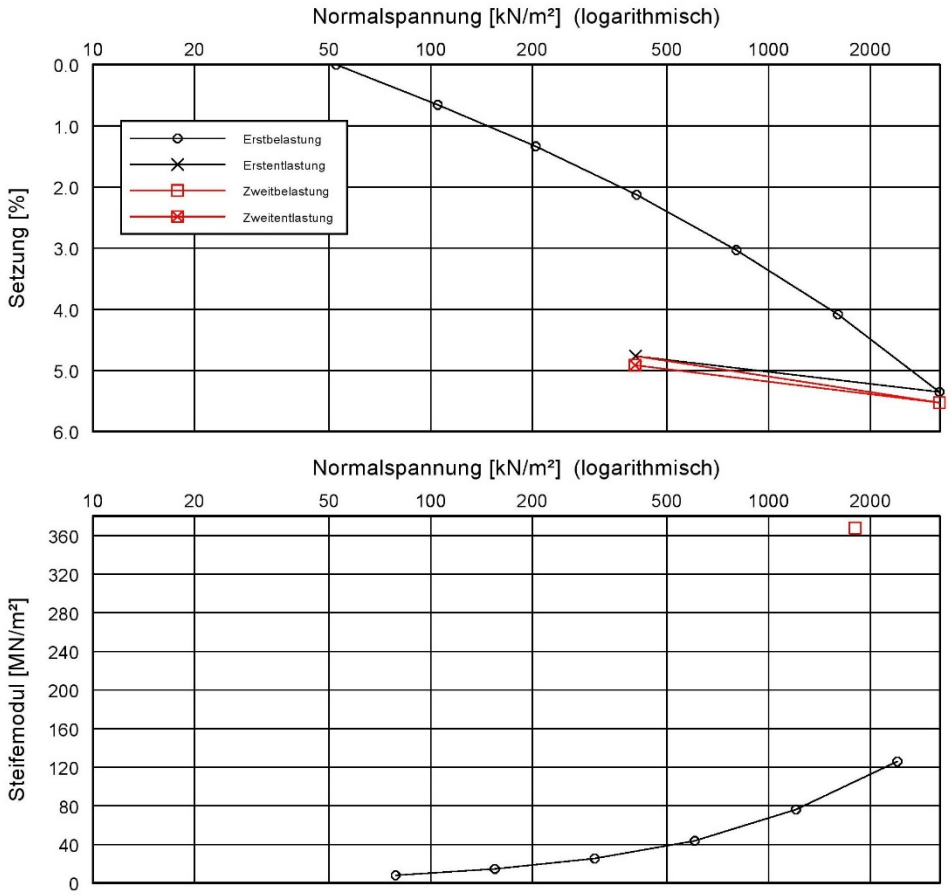




Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Normalspannung [kN/m²]	54.9	104.7	202.0	402.4	802.7	1601.0	3202.0	401.9	3202.6	410.5
Meßuhrablesung [mm]	-6.948	-6.768	-6.559	-6.307	-5.980	-5.646	-5.304	-5.438	-5.256	-5.399
Steifemodul [MN/m²]		5.5	9.3	15.9	24.5	47.7	93.8	-	307.9	-

Bild 27: Konventioneller 1K-Rinspaltmörtel als Referenz, Steifemodul im Oedometerversuch, Alter der Probe 4h

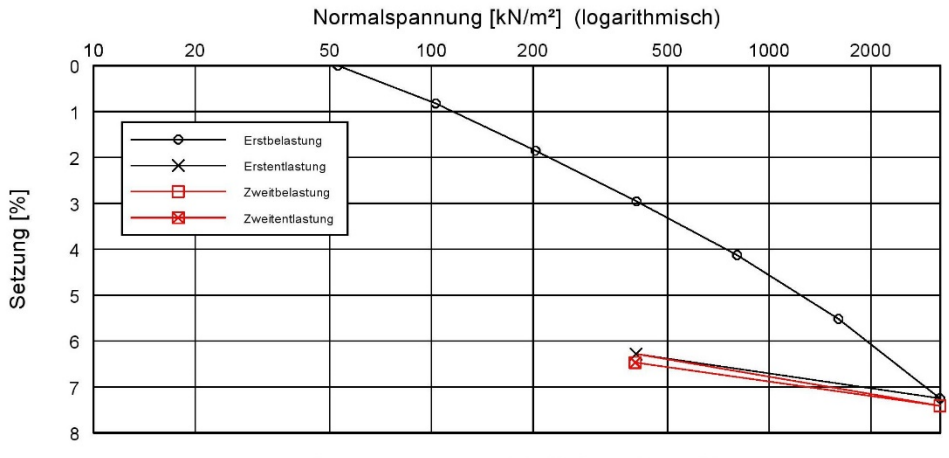
Der Steifemodul des Referenzmörtels 1K beträgt im Alter von 4h 94 MN/m² und steigt bei Wiederbelastung auf 308 MN/m² an.

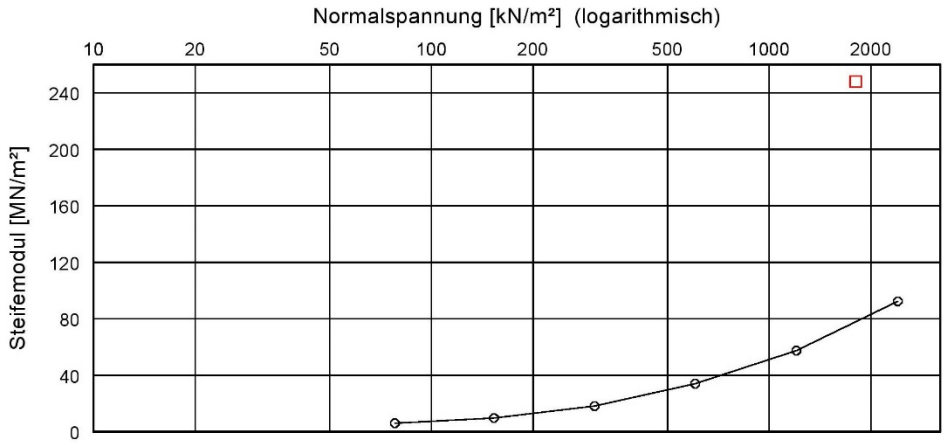


Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Normalspannung [kN/m²]	52.5	104.9	204.5	406.6	802.3	1603.7	3201.9	403.3	3201.8	401.9
Meßuhrablesung [mm]	1.759	1.890	2.026	2.185	2.365	2.576	2.830	2.712	2.865	2.742
Steifemodul [MN/m²]		8.0	14.7	25.5	43.8	76.1	126.0	-	367.7	-

Bild 28: EOS 5 Steifemodul im Oedometerversuch, Alter der Probe 4h

Der Steifemodul des Ringspaltmörtels auf Basis von Elektroofenschlacke EOS 5 (Bild 28) liegt im Alter von 4h bei 126 MN/m² und steigt bei Wiederbelastung auf 388 MN/m² an und erfüllt damit die Anforderungen nach Kapitel 2.1.





Versuch-Nr.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Normalspannung [kN/m²]	52.9	103.0	203.3	404.8	803.2	1603.3	3201.8	404.0	3202.2	401.3
Meßuhrablesung [mm]	0.087	0.252	0.458	0.679	0.912	1.191	1.537	1.343	1.569	1.381
Steifemodul [MN/m²]		6.1	9.8	18.2	34.1	57.5	92.4	-	248.0	-

Bild 29: CUS 2 EOS 5 Steifemodul im Oedometerversuch, Alter der Probe 4h

Der Steifemodul des Ringspaltmörtels auf Basis von Kupferschlacke CUS 2 (Bild 29) liegt im Alter von 4h bei 92 MN/m² und steigt bei Wiederbelastung auf 248 MN/m² an. Damit unterschreitet er zu diesem frühen Zeitpunkt die Steifigkeit des Referenzmörtels und die Anforderungen nach Kapitel 2.1.

2.4.1 Konzeptionierung und Durchführung verfahrensspezifischer Einbauversuche zwecks Nachweis der Gleichwertigkeit mit konventionellen geotechnischen Baustoffen

In Jahr 2017 hat die PORR beim Projekt ATCOST21 Großversuche zur Ringspaltverfüllung am unteren Fildertunnel durchgeführt. Auf Basis der damaligen Planungen und anderer zurückliegender Großversuche wurde ein Versuchskonzept erarbeitet. Bedauerlicherweise konnten jedoch im Zuge einer umfangreichen Recherche nach in der Projektlaufzeit keine geeigneten Tunnelbaustellen für die Durchführung eines Großversuches identifiziert werden. Daher wurden in einer frühen Phase (2022) als gleichwertige Alternative, Einbauversuche auf einem bei der STUVA vorhandenen Versuchsstand,

zur realitätsnahen Simulation der Ringspaltverpressung vorgesehen. Als Baustoff für die großmaßstäblichen Einbauversuche wurden 2 Chargen mit je 3 t zu aktivierende EOS (Nr. 6 und Nr. 10) beim assoziierten Partner KHD aufgemahlenen und zur STUVA transportiert. Entgegen der Erwartung zeigte die Beprobung dieser beiden Schlackenchargen nach dem großmaßstäblichen Aufmahlen abweichend von den zuvor hergestellten identischen Laborproben mit Kugelmahlung keine ausreichende Festigkeitsentwicklung. Für die Durchführung der projektierten Großversuche stand damit keine ausreichende Menge an geeigneter aktivierbarer EOS zur Verfügung.

2.4.2 Überprüfung der Umweltverträglichkeit

Die Beurteilung der Umweltverträglichkeit der unter Verwendung von EOS (oder CUS) hergestellten geotechnischen Baustoffe erfolgt primär im Hinblick auf deren Auslaugverhalten. Aspekte wie Strahlung, Faserfreisetzung, Exhalation u.v.a. spielen bei den im Rahmen von SABINE verwendeten Stoffen keine Rolle.

Da die Prüfung des Auslaugverhaltens von Baustoffen ggf. sehr aufwendig ist, da hierzu zunächst Mörtel oder Betone hergestellt werden müssen, die dann eine gewisse Zeit vorgelagert und erst dann für einen längeren Zeitraum eluiert werden, wird häufig das Auslaugverhalten der Baustoffkomponenten betrachtet, wobei hierbei industrielle Nebenprodukte, wie z.B. die EOS, im Fokus stehen. Im Rahmen von SABINE wurden die EOS 2, 3, 5 (teilglasig bis glasig), EOS 8, 11, 13 (kristallin) und die CUS 1 (teilglasig) gemäß Schütteltest nach DIN EN 12457-4 eluiert (Wasser/Feststoff = 10:1, 24 h Dauer). In Tabelle 16 sind sowohl die im Eluat bestimmten Gehalte als auch die Grenzwerte aufgeführt, die für industrielle Gesteinskörnungen in wasserberührten Betonen definiert wurden [7]. Diese Grenzwerte werden vom DIBt auch herangezogen, wenn z.B. alternative Bindemittelbestandteile beurteilt werden sollen. Die Grenzwerte in Klammern geben den Bereich wieder, der für andere Stoffe als Stahlwerksschlacken definiert wurde.

Vergleicht man die Eluatwerte für die kristallinen und (teil)glasigen EOS aus demselben Stahlwerk miteinander (EOS 2 mit EOS 13, EOS 3 mit EOS 11, EOS 5 mit EOS 8), so erkennt man, dass die glasigen Schlacken eher weniger auslaugen als die kristallinen. Der Vergleich der Messwerte mit den Grenzwerten der ABuG zeigt jedoch, dass die Grenzwerte in allen Fällen weit unterschritten werden! Daraus folgt, dass das Auslaugverhalten der EOS und CUS kein Problem für deren Verwendung in geotechnischen Baustoffen darstellt.

Tabelle 11: Eluatkonzentrationen nach Elution gemäß DIN EN 12457-4 und Grenzwerte der ABuG

	ABuG	EOS 2	EOS 3	EOS 5	EOS 8	EOS 11	EOS 13	CUS 1
	µg/l							
As	60-100	0,2	0,2	< 0,1	< 0,1	0,6	0,4	0,3
Ba	-	7,0	6,0	18,3	2007	69,9	93,5	214
Be	-	0,2	< 0,1	< 0,1	0,1	< 0,1	0,2	< 0,1
Cd	(6-10)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Co	(100-300)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3
Cr	100 (60-300)	0,7	0,8	2,0	257	1,3	1,1	0,2
Cr-VI	-	< 10	< 10	< 10	257	< 10	< 10	-
Cu	-	0,7	0,7	2,6	0,2	0,2	0,3	15,9
Hg	(2)	< 0,1	< 0,1	< 0,1	0,3	0,3	0,2	< 0,1
Mo	-	3,8	1,3	8,7	206	22,5	37,1	4,3
Ni	(70-150)	0,2	0,2	1,0	< 0,1	0,1	< 0,1	11,6
Pb	(100-200)	0,1	0,1	0,5	< 0,1	< 0,1	< 0,1	3,6
Sb	-	< 0,1	0,1	0,1	< 0,1	0,2	< 0,1	2,3
Se	-	0,4	< 0,1	0,3	2,0	0,7	1,5	1,4
Sn	-	0,2	0,2	0,2	< 0,1	0,3	< 0,1	0,4
Sr	-	23,6	7,6	26,6	588	22,4	37,9	13,9
Tl	-	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
V	250	37,7	5,3	97,2	5,7	62,1	67,2	0,3
W	-	18,3	8,6	37,3	400	54,5	218	7,3
Zn	(200-600)	3,4	0,9	8,8	1,3	0,6	3,9	18,6
	mg/l							
Cl^-	(50)	11	< 1,0	2,8	2,3	< 1,0	< 1,0	-
F^-	5	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	< 0,4	-
SO_4^{2-}	(1000)	1,2	< 1,0	2,8	3,6	1,9	6,1	-
Elektrische Leitfähigkeit	µS/cm							
	1500 (700-5000)	184	52	174	1523	222	296	35
pH-Wert	-							
	10-13 (6-13)	11,0	10,3	11,0	11,7	11,0	10,1	9,6

Zur Überprüfung dieser Schlussfolgerung wurden 3 Bindemittelsysteme ausgewählt, an denen Auslaugtests an Mörteln in Anlehnung an des DVGW-Arbeitsblatt W 347 durchgeführt. Dieses regelt derzeit die Prüfung und Beurteilung von zementgebundenen Werkstoffen im Kontakt mit Trinkwasser. Die darin enthaltene Positivliste wird allerdings nicht fortgeschrieben, weshalb die Bewertung der alkalisch aktivierten Systeme daher in Anlehnung an dieses Merkblatt erfolgte.

Mit den alkalisch aktivierten Systemen wurden Mörtelprismen der Größe 40 mm x 40 mm x 160 mm in Anlehnung an DIN EN 196-1 hergestellt. Nach der Herstellung wurden die Probekörper 24 h bei

einer Luftfeuchtigkeit von > 90 % und anschließend bis zum 28. Tag in Leitungswasser gelagert. Zur Vorbehandlung wurden die Probekörper in dem im DVGW Merkblatt W347 definierten Vorlagerungswasser 8 Tage gelagert, das regelmäßig erneuert wurde. Die Prüfung der äußeren Beschaffenheit erfolgte an dem Prüfwasser, das im Kontaktversuch mit Referenzwasser gewonnen wird. Dieser 72-stündige Kontaktversuch wird 2-mal wiederholt. Das Referenzwasser setzt sich entsprechend den Angaben von Tabelle 11 zusammen.

Tabelle 12: Zusammensetzung des Referenzwassers

Parameter	**Einheit**	**Anforderungswert**
Elektr. Leitfähigkeit	[µS/cm]	500 ± 50
pH-Wert	[-]	7,3 ± 0,2
Org. geb. Kohlenstoff C	[mg/l]	< 0,2
Calcium Ca	[mg/l]	80 ± 10
Alkalinität HCO^-_3	[mg/l]	350 ± 50
Silikat SiO_2	[mg/l]	15 ± 5
Geruch	[TON]	< 2
Geschmack	[TFN]	< 2
Färbung	[1/m]	< 0,1
Trübung	[FNU]	< 0,1

Tabelle 13: Prüfschema, Anforderungswerte und Anzahl der Prismen für die im DVGW Merkblatt W347 definierten Anwendungsbereiche

		Einheit	**Anwendungsbereich**			
			I	**II**	**III**	**IV**
A/V-Verhältnis		[-]	1:4	1:4	1:6	-
Anzahl Prismen		[-]	3	3	2	-
Änderung gegenüber Referenzwasser bzgl. Trübung, Geruch und Neigung zur Schaumbildung		[-]	keine	Keine	Keine	-
A/V-Verhältnis		[-]	1:1	1:1	1:1	1:1
(Anzahl Prismen)		[-]	6	6	6	6
gesamter org. geb. Kohlenstoff als	TOC	[mg/m²]	2,5	10	15	-
Abgabe von	AS *		0,05	0,05	0,05	0,05
	Pb *		0,1	0,1	0,1	0,1
	Cd *		0,05	0,05	0,05	0,05
	Cr gesamt *		0,3	0,3	0,3	0,3
	Ni *		0,2	0,2	0,2	0,2
	Li **		-	0,3	0,3	-

Entsprechend der potentiellen Anwendungsgebiete sind Prüfungen mit verschiedenen Oberflächen zu Referenzwasservolumen Verhältnisse durchzuführen. Gemäß DVGW Merkblatt wird eine entsprechende Anzahl an Probekörpern in rd. 3800 ml Referenzwasser gelegt (Tabelle 12). Aufgrund

der thermischen Vorgeschichte der verwendeten Schlacken in den Bindersystemen sind keine organischen Bestandteile zu erwarten. Daher wurde auf die Bestimmung der TOC-Gehalte verzichtet. Die Ergebnisse der Versuche sind in Tabelle 13 bis Tabelle 15 zusammengestellt.

Tabelle 14: Ergebnisse der Prüfung des Mörtels EOS5_12 gemäß DVGW Merkblatt W347

Parameter	Einheit	Messwert		Einheit	Rechenwert	
Länge	mm	160				
Breite	mm	40				
Höhe	mm	40				
Arsen	µg/l	1,30	1,00	mg/m²*d	0,01	0,01
Blei	µg/l	3,30	15,40	mg/m²*d	0,02	0,09
Cadmium	µg/l	0,10	< 0,1	mg/m²*d	0,00	< 0,001
Chrom	µg/l	9,40	9,30	mg/m²*d	0,06	0,06
Lithium	µg/l	1,40	1,50	mg/m²*d	0,01	0,01
Nickel	µg/l	0,20	0,30	mg/m²*d	0,00	0,00
Geruch	-	kein	kein	Änderung zum Referenzwasser	keine	keine
Trübung	NTU	< 1,0	< 1,0		keine	keine

Tabelle 15: Ergebnisse der Prüfung des Mörtels EOS6_12 gemäß DVGW Merkblatt W347

Parameter	Einheit	Messwert		Einheit	Rechenwert	
Länge	mm	160				
Breite	mm	40				
Höhe	mm	40				
Arsen	µg/l	10,2	9,1	mg/m²*d	0,06	0,05
Blei	µg/l	1,4	3,9	mg/m²*d	0,01	0,02
Cadmium	µg/l	0,3	0,3	mg/m²*d	0,00	0,00
Chrom	µg/l	4,3	4,7	mg/m²*d	0,03	0,03
Lithium	µg/l	0,3	<0,1	mg/m²*d	0,00	< 0,001
Nickel	µg/l	2,1	2,5	mg/m²*d	0,01	0,02
Geruch	-	kein	kein	Änderung zum Referenzwasser	keine	keine
Trübung	NTU	< 1,0	< 1,0		keine	keine

Tabelle 16: Ergebnisse der Prüfung des Mörtels CUS2_12 gemäß DVGW Merkblatt W347

Parameter	Einheit	Messwert		Einheit	Rechenwert	
Länge	mm	160				
Breite	mm	40				
Höhe	mm	40				
Arsen	µg/l	5,8	4,6	mg/m²*d	0,04	0,03
Blei	µg/l	4,3	14,4	mg/m²*d	0,03	0,09
Cadmium	µg/l	<0,1	<0,1	mg/m²*d	< 0,001	< 0,001
Chrom	µg/l	1,1	1,3	mg/m²*d	0,01	0,01
Lithium	µg/l	27,6	34,1	mg/m²*d	0,17	0,21
Nickel	µg/l	1,5	2,6	mg/m²*d	0,01	0,02
Geruch	-	kein	kein	Änderung zum Referenzwasser	keine	keine
Trübung	NTU	< 1,0	< 1,0		keine	keine

An allen Eluaten wurden unabhängig vom untersuchten Mörtel keine Veränderungen bzgl. der Wasserbeschaffenheit festgestellt. Sämtliche Ergebnisse der flächenbezogenen Auslaugung zeigen keine Überschreitungen der im DVGW-Arbeitsblatt für die verschiedenen Anwendungsbereiche definierten Anforderungswerte. Auffällig war die an den Mörteln mit EOS6_12 gefundene, vergleichsweise hohe Auslaugung von Arsen (Der Anforderungswert ist nicht überschritten!). Eine Ursache hierfür konnte im Rahmen des Forschungsvorhabens noch nicht gefunden werden.

3. Literatur

Über die in den Fußnoten dieses Berichts direkt referenzierte Literatur hinaus bilden die nachfolgend aufgeführten Quellen die Grundlage für die beschriebenen Arbeiten.

- Battelle Memorial Institute: Toward a sustainable cement industry, Substudy 8. Columbus, 2002
- International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development: Cement Technology Roadmap 2009. Paris, Conches-Geneva, 2009
- International Energy Agency and World Business Council for Sustainable Development: Technology Roadmap - Low-Carbon Transition in the Cement Industry. Paris, Conches-Geneva, 2018
- Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): Monitoring-Abschlussbericht 1990-2012. Verminderung der CO2-Emissionen. Düsseldorf, 2013
- Verein Deutscher Zementwerke (VDZ): CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau. Düsseldorf, 2008
- E. Kleen: Neue zementfreie Ringspaltmasse. MC aktiv (2019) 1, 12

- Clausthaler Umwelttechnik-Institut (CUTEC): Bewertung der Substitution von industriellen Nebenprodukten der Stahlerzeugung durch Primärrohstoffe beim Einsatz im Straßen- und Wegebau. Clausthal-Zellerfeld, 2017
- H. Kühl: Slag cement and process of making the same. US-Patent 900939, 1908
- O. Purdon: The action of alkalies on blastfurnace slag. Journal of the Society of Chemical Industry 59 (1940) 9, 191-202
- V.D. Glukhovsky: Soil Silicates. Kiev, 1959
- P.V. Krivenko (ed.): 1st Int. Conf. Alkaline Cements and Concretes. Kiev, 1994
- Forss: F-Cement, a new low-porosity slag cement. Silicates Industriels 48 (1983) 3, 79-82
- J. L. Provis, J. van Deventer (ed.): Alkali Activated Materials, State-of-the-Art Report Volume 13. RILEM TC 224-AAM, Heidelberg u.a., 2014
- http://www.zeobond.com/products-e-crete.html (Stand 15.04.2019)
- https://www.wagner.com.au/main/what-we-do/earth-friendly-concrete/efc-home (Stand 15.04.2019)
- Shi, P. V. Krivenko, D. Roy (ed.): Alkali-activated cements and concretes. London, 2006
- International Conference Alkali Activated Materials – Research, Production and Utilization. Prag, 2007
- Hinweise für die Herstellung und Verwendung von zeitweise fließfähigen, selbstverdichtenden Verfüllbaustoffen im Erdbau, H ZFSV, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2012
- Dörendahl, Karsten; Walz, B. (Hrsg.); Pulsfort, M. (Hrsg.), Das Tragverhalten von Einphasen-Dichtwandmassen als Ausfachung von Baugrubenwänden, 2004
- Garbach, A. Ehrenberg: Alkaliaktivierte Bindemittel auf der Grundlage von Eisenhüttenschlacken. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 14070, 2008
- Ehrenberg, D. Stephan, C. Kaps: Alkalisch aktivierte Hüttensande für die betontechnische Anwendung unter aggressiven Bedingungen. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 15800, 2011
- Ehrenberg, D. Stephan: Verarbeitungsverhalten und Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit alkalisch aktivierten Hüttensanden für die Betonwarenindustrie. Abschlussbericht zum AiF-Forschungsvorhaben 18856, 2018

4. Ergänzende Darstellung der Verwendung

4.1 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Zuwendungen wurden entsprechend der im Projektantrag definierten Ziele eingesetzt. Vorrangig dienten die Mittel zur Finanzierung des wissenschaftlichen und technischen Personals, welches zur Bearbeitung der dargestellten Fragestellungen eingesetzt wurde. Der detaillierte zahlenmäßige Nachweis wurde separat übermittelt.

KHD in Köln führte im Unterauftrag des FEhS-Instituts insgesamt 4 Mahlungen an kristallinen EOS (2 x EOS 1, EOS 6, EOS 10) im Technikumsmaßstab durch, um zum einen größere Mengen gemahlener Schlacken in unterschiedlicher Feinheit bereitzustellen und um zum anderen Kenndaten

zur Konzeption einer industriellen Mahlanlage für EOS zu gewinnen. Dieses Konzept wurde im April 2024 vorgelegt. Die angebotsgemäßen Kosten in Höhe von 40.000 € wurden im März 2024 in Rechnung gestellt und vom FEhS-Institut beglichen.

Um für das nachträglich konzipierte Versuchsprogramm an teilamorphen Elektroofen- und Kupferschlacken ausreichende Schlackemengen zur Verfügung zu haben, wurden EOS 5 und CUS 2 im Frühsommer 2024 im Unterauftrag durch die UVR-FIA in Freiberg gemahlen. Die Kosten in Höhe von 6.700 Euro von der STUVA aus ursprünglich für den Großversuch vorgesehenen Mitteln bezahlt.

4.2 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die umfassende Entwicklung eines geotechnischen Baustoffs auf der Basis von Stahlwerksschlacke als Geopolymer-Bindemittel – wie im Projekt SABINE vorgesehen – wurde zuvor nicht durchgeführt. Insbesondere im Hinblick auf die ganzheitliche Abstimmung von Schlackenaufbereitung, Bindemittelaktivierung und Mischungsentwurf des geotechnischen Baustoffs für verschiedene exemplarische Anwendungsfälle wurde technisches und wissenschaftliches Neuland betreten.

Zur Erzielung einer höheren Verwertungsquote von Stahlwerksschlacken waren neue Kompetenzen aufzubauen, die bis dahin nur punktuell vorhanden waren. Zur Schaffung dieser Kompetenzen hat das Projekt SABINE einen wesentlichen Beitrag geleistet, da komplementäre Ansätze in interdisziplinären Forschergruppen aus Metallurgen, Chemikern, Mineralogen und Bauingenieuren zusammen mit gewerblichen Partnern aus dem Bereich der Erzeuger der Nebenprodukte (Stahlwerke) und der Verarbeiter dieser Sekundärrohstoffe (Bauunternehmen) bearbeitet wurden. Eine solche interdisziplinäre Forschung ist ohne ein gefördertes Forschungsprojekt nicht durchführbar, da für die Erarbeitung erforderlicher Konzepte und Durchführung umfangreicher experimenteller Versuchsreihen einschließlich Nachweis der Gleichwertigkeit mit konventionellen Ansätzen unter Berücksichtigung verfahrensspezifischer Einbauversuche umfangreiche finanzielle Mittel notwendig sind. Dies gilt in besonderem Maße vor dem Hintergrund der zu absolvierenden umfangreichen Parameterstudien bezüglich zweckmäßiger Bindemittel-Aktivator-Kombinationen, wobei es nicht nur um die Identifizierung technisch möglicher, sondern auch ökonomisch zielführender Ansätze geht.

Ferner war es den beteiligten gewerblichen Partnern aufgrund der hohen Komplexität der Aufgabenstellung, verbunden mit einem hohen wirtschaftlichen und wissenschaftlich-technischen Risiko, nicht möglich, eine derartige intensive theoretische und experimentelle Forschung vorzufinanzieren. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass ohne eine Förderung des Vorhabens weitere Forschung auf diesem Gebiet nicht durchgeführt worden wäre. Dies hätte jedoch zur Folge, dass die durch das Forschungsvorhaben angestrebte Umweltentlastung bzw. Erhöhung der Ressourceneffizienz in absehbarer Zeit nicht möglich ist. Allgemein bleibt anzumerken, dass das Projekt SABINE sowohl zu innovativen Lösungen in der Baubrache beiträgt als auch der heimischen Stahlindustrie zugutekommt, indem neue Verwertungs- bzw. sogar Wertschöpfungsmöglichkeiten geschaffen werden. Daher sollte aus Sicht der Bundesregierung, der Bundesrepublik Deutschland und aus gesamtgesellschaftlicher Sicht ein erhöhtes Interesse bestehen, die Einsatzmöglichkeiten von Stahlwerksschlacken als Bindemittel zu erweitern. Da eine große Menge von geotechnischen Baustoffen im Zuge von Infrastrukturprojekten (z. B. Verkehrstunnel oder kommunaler Leitungsbau)

zum Einsatz kommen, bei denen öffentliche Vorhabenträger Bauherrn sind, lässt dies den Einsatz von öffentlichen Mitteln für die vorliegende Forschungsaufgabe besonders gerechtfertigt erscheinen.

4.3 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

Die Verwertungspläne des Projekts SABINE umfassen sowohl wissenschaftliche als auch wirtschaftliche Ansätze, um die Ergebnisse in der Praxis nutzbar zu machen. Nach Bewertung der erzielten Ergebnisse erscheinen folgende Ziele als umsetzbar.

4.3.1 Wissenschaftliche Verwertung

Die gewonnenen Erkenntnisse zum Einsatz von alkalisch aktivierten Schlacken als Bindemittel in geotechnischen Baustoffen tragen zur Ressourceneffizienz und somit Erhöhung der Nachhaltigkeit bei und werden im Rahmen von Veröffentlichungen und Vorträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen als Basis für weitere Forschungsarbeiten verbreitet. Darüber hinaus sollen die Ergebnisse sollen in die maßgeblichen Regelwerke einfließen, um eine Anwendung im Bauwesen zu ermöglichen.

4.3.2 Wirtschaftliche Verwertung:

Die Entwicklung zementfreier Baustoffe auf Basis von Stahlwerksschlacken und anderen Nebenprodukten adressiert den steigenden Bedarf an CO_2-armen Lösungen und ressourcen-effizienten Alternativen. Dies soll die Wettbewerbsfähigkeit stärken und neue Märkte eröffnen. Die Partner planen, Beratungsleistungen und baustofftechnologische Prüfungen anzubieten, z. B. für Tunnelbau, Leitungsbau und Spezialtiefbau. Diese Leistungen können sowohl auf allgemeine Studien als auch auf konkrete Projektanforderungen abzielen.

4.3.3 Technologische Weiterentwicklung:

Die Forschung ermöglicht die Einführung innovativer Baustoffe, wie dargestellt bei Ringspaltmassen, Dichtwandmassen und Flüssigböden. Die entwickelten Materialien bieten durch Reduktion des Zementverbrauchs technische und ökologische Vorteile. Dabei sichern die praxisorientierten Ansätze bei der Zusammenarbeit mit den gewerblichen Partnern die Praxistauglichkeit der entwickelten Baustoffe.

4.3.4 Zukunftsperspektiven und Anschlussfähigkeit

Die Ergebnisse bilden eine gute Grundlage für zukünftige nationale und europäische Forschungs-projekte. Die beteiligten Partner sind zuversichtlich, dass resultierend aus den Erkenntnissen des Projektes SABINE eine gesteigerte Reputation sowie langfristige wirtschaftliche Vorteile durch den Wissensvorsprung und die Markteinführung der innovativen Baustofftechnologien abgeleitet werden kann.

4.4 Während der Durchführung des Vorhabens bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens

Während der Durchführung des Vorhabens sind bis zum Abschluss der Arbeiten keine unmittelbar für die Durchführung des Vorhabens relevanten Fortschritte von dritter Seite bekannt geworden.

4.5 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

Als Basis und Information für den direkten Austausch wurde ein Poster und ein Flyer zum Projekt erstellt. Projektbegleitend erfolgte die Darstellung des Projektes und der Ergebnisse über den Web-Auftritt unter: https://sabine.stuva.de/

Die Ergebnisse des Projektes SABINE wurden im Rahmen der zur Fördermaßnahme ReMin - Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe, gehörenden Veröffentlichungen (Zwischen und Abschlussbroschüre) und zugehörigen Veranstaltungen (Auftakt-, Zwischen-, und Schlusskonferenz 2024) präsentiert.

Das FEhS-Institut stellte Teilergebnisse von SABINE auf verschiedenen Konferenzen, in verschiedenen Publikationen, bei verschiedenen Gremien der Baustoffindustrie und bei einem Unternehmens-Workshop vor:

- Ehrenberg, A., Algermissen, D.: The steel production transformation process - Consequences for the slag utilization. 8th Int. Slag Valorisation Symposium, Mechelen, 18.-20.04.2023
- Ehrenberg, A.: Heutige und künftige metallurgische Schlacken – Potentiale und Herausforderungen. 21. Internationale Baustofftagung „ibausil“, Weimar, 13.-15.09.2023
- Ehrenberg, A., Algermissen, D.: EAF slag and its potential to substitute granulated blast furnace slag. 12th European Slag Conference, Bilbao, 23.-25.10.2024
- Ehrenberg, A.: The steel production transformation process in Europe: New slag types will substitute granulated blast furnace slag. ZKG Cement Lime Gypsum 76 (2023) No. 6, 86-96
- Ehrenberg, A.: Today's and future slags - Potentials and Challenges. ce/papers - Proceedings in Civil Engineering 6 (2023) 6, 241-256, https://doi.org/10.1002/cepa.2843
- Ehrenberg, A.: The steelmaking transformation process and its consequences for slag utilization. Steel Research 95 (2024) 8, http://doi.org/10.1002/srin.202400234
- Ehrenberg, A.: Was kommt nach dem Hüttensand? Konsequenzen der Transformation der Stahlindustrie. 30. Sitzung VÖZ-Qualitätskreis Hüttensand, Wien, 01.02.2023
- Ehrenberg, A.: Transformation der Stahlindustrie – Die Konsequenzen für den Betonbau. VDB-Jahrestagung 2023, Kassel, 11.05.2023

- Ehrenberg, A.: Neue Hüttensande durch die Transformation in der Stahlindustrie. "ExpertenForum Beton" der Bayrischen BauAkademie, Feuchtwangen, 24.-25.10.2023
- Ehrenberg, A.: Future availability of GGBS and long-term perspective worldwide. COWI GGBS Concrete Workshop, online, 30.10.2024
- Bei Projektende ist für den Sommer 2025 eine weitere Veröffentlichung geplant im "Report des Forschungsinstituts Nr. 1/2025, die sich einer Gesamtdarstellung von SABINE widmen wird. Der "Report" wird sowohl in gedruckter Form als auch online auf der Webseite des FEhS-Instituts bereitgestellt. Teilaspekte werden im Rahmen eines weiteren Vortrags am 04.06.2025 anlässlich des "Freiberger Stahltags" vorgestellt werden.