Abschlussbericht

Teil I

für das Projekt

„BAUSEP – Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte“

Im Rahmen der BMBF-Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)

Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2021 – 30.06.2024	**Berichtszeitraum:** 01.02.2021 – 30.06.2024
Vorhabenbezeichnung: BAUSEP – Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte	
Partner	**Förderkennzeichen**
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP	033R256A
bvw Steinwerk Hamminkeln GmbH & CO. KG	033R256B
Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum CUTEC	033R256C
KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik	033R256G
Ludwig-Maximilian-Universität München	033R256E
Stadtreinigung Hamburg AöR	033R256D
Thyssenkrupp MillServices & Systems GmbH	033R256H

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

In Abbildung 1 wird der schematische Ablauf des Projekts BAUSEP dargestellt. Die im Rahmen der Antragstellung entwickelte Planung konnte während der Projektlaufzeit im Wesentlichen unverändert beibehalten werden. Jedoch wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um sechs Monate beantragt. Dieser Schritt diente einerseits der Förderung der Teilnahme der Verbundpartner an der Abschlusskonferenz des BMBF in Goslar während der Projektlaufzeit. Andererseits war die Bereitstellung, Aufbereitung und Sortierung der HMV-Aschen für die industrielle Produktion von Pflastersteinen verzögert, weshalb die Verlängerung der Projektdauer zur Fertigstellung geplanter Arbeiten notwendig wurde.

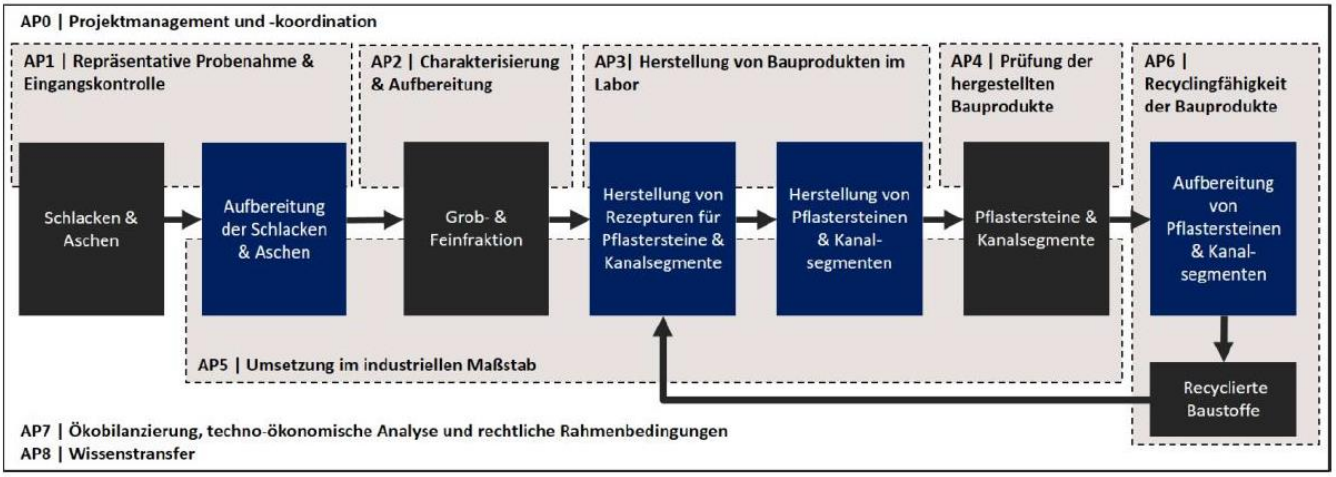

Abbildung 1: schematischer Ablauf des Projektes BAUSEP

Unter Berücksichtigung des aktuellen Wissens über potenzielle Probleme beim Einsatz von HMV-Aschen und Eisenhüttenschlacken in zementären Baustoffen, insbesondere hinsichtlich überhöhter Gehalte an Salzen und/oder Metallen sowie den Vorgaben der Ersatzbaustoffverordnung, wurde im Projekt ein Schwerpunkt auf die gezielte Aufbereitung von HMV-Aschen gelegt. Die Entwicklung von Rezepturen mit einer hohen Substitutionsrate primärer Gesteinskörnung im Korngrößenbereich von 2-8 mm und deren Übertragbarkeit in die industrielle Produktion stellte das zentrale Ziel dar. Zur Bewertung der erreichten Ressourceneffizienz wurden im Projekt sowohl die Ökobilanz als auch die Recyclingfähigkeit der hergestellten Pflastersteine unter umweltrelevanten Gesichtspunkten untersucht.

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens bestand darin, für die betrachteten Materialien den Nachweis einer (groß-)technischen Verwendung in zementären Anwendungen (z. B. Betonbauteile) zu erbringen, insbesondere die Unbedenklichkeit und das Fehlen einer Anreicherung von Schadstoffen nachzuweisen. Dies soll zur Etablierung einer einheitlichen Regulatorik für den Einsatz sekundärer Stoffströme auf nationaler Ebene beitragen.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnten geeignete Schlackenarten aus dem Portfolio der Eisenhüttenschlacken identifiziert werden, die primäre Gesteinskörnung bei der Herstellung von Pflastersteinen substituieren können. Zudem wurde eine Aufbereitungsstrategie für HMV-Aschen verifiziert, die deren Einsatz im gleichen Anwendungsbereich ermöglicht. Durch eine Ultraschallwäsche mit anschließender Siebung der Fraktionen wurde eine qualitativ hochwertige HMV-Asche gewonnen, aus der Metall- und Glasfraktionen entfernt wurden. Für diese Fraktionen bestehen marktrelevante Verwertungspfadoptionen, sodass eine nahezu vollständige Verwertung der Aschen im Sinne einer hohen Ressourceneffizienz realisiert werden kann.

Die aufbereiteten Mineralfraktionen wurden in iterativen Entwicklungsschritten in die Rezepturen für Pflastersteine und Schachtbauteile integriert, wobei primäre Gesteinskörnung im Bereich von 2-8 mm substituiert wurde. Für die Eisenhüttenschlacken konnten Substitutionsraten von bis zu 100% für die aufbereiteten HMV-Aschen von etwa 20% erzielt werden. Nach der Übertragung der Laborrezepturen in die industrielle Produktion wurden rund 150 qm Pflastersteine im Pflastersteinwerk in Hamminkeln hergestellt. Zudem wurden am Standort Lachendorf Schachtbauteile unter Verwendung von Eisenhüttenschlacke (Substitutionsrate 50%) produziert.

Im Anschluss wurde die Recyclingfähigkeit der produzierten Pflastersteine bewertet. Hierzu wurden die Steine mittels Backenbrecher zerkleinert und erfolgreich als RC-Gesteinskörnung bei der Herstellung von Beton eingesetzt. Parallel zur Analyse der technischen Machbarkeit des Recyclings wurde auch die Umweltverträglichkeit untersucht, wozu Säuleneluate erzeugt und analysiert wurden.

Zusammenfassend hat dieses Forschungsprojekt gezeigt, dass die entwickelten Bauprodukte die relevanten bau- und umwelttechnischen Vorschriften einhalten. Durch eine weitere Optimierung der Aufbereitungsstrategien für HMV-Aschen ist zu erwarten, dass die Materialwerte HMVA-1 der ErsatzbaustoffV dauerhaft eingehalten werden können, wodurch ressourceneffiziente Bauprodukte aus industriellen Nebenprodukten hergestellt werden können. Auch die Recyclingfähigkeit wurde nachgewiesen. Zudem zeigten die diffusionsgesteuerten Auslaugungen an Pflastersteinen eine sehr geringe Schadstoffmobilität, sodass eine Schadstoffanreicherung im Sinne des § 7 KrWG nicht zu befürchten ist.

Die Ergebnisse des Projektes weisen somit die Nutzbarkeit aufbereiteter HMV-Aschen und Schlacken nach und können Wegbereiter für den zukünftigen Einsatz der Materialien in Bauprodukten sein. Zudem können die Ergebnisse wertvolle und belastbare Aussagen zu rechtlichen & regulatorischen Fragestellungen liefern. Die Schaffung klarer rechtlicher Rahmenbedingungen zur Nutzung und Anwendung vorhandener, hochqualitativer mineralischer Stoffströme sollte in jedem Fall höchste Priorität haben, um die Ressourceneffizienz signifikant zu steigern. Letztlich spielt die Ressourceneffizienz eine wichtige Schlüsselrolle beim Erreichen der ehrgeizigen Klimaziele Deutschlands und Europas.

Abschlussbericht

Teil II

für das Projekt

„BAUSEP – Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte“

Im Rahmen der BMBF-Förderrichtlinie „Ressourceneffiziente Kreislaufwirtschaft – Bauen und Mineralische Stoffkreisläufe (ReMin)

Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2021 – 30.06.2024	**Berichtszeitraum:** 01.02.2021 – 30.06.2024
Vorhabenbezeichnung: BAUSEP – Separation von Aschen und Schlacken für die Herstellung ressourceneffizienter Bauprodukte	
Partner	**Förderkennzeichen**
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP	033R256A
bvw Steinwerk Hamminkeln GmbH & CO. KG	033R256B
Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum CUTEC	033R256C
KM GmbH für Straßenbau- und Umwelttechnik	033R256G
Ludwig-Maximilian-Universität München	033R256E
Stadtreinigung Hamburg AöR	033R256D
Thyssenkrupp MillServices & Systems GmbH	033R256H

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Inhalt

1 **Wissenschaftlich-technische Ergebnisse** 6
1.1 Arbeitspaket 0: Projektmanagement und -koordination 6
1.1.1 IBP 6
1.1.2 bvw 7
1.1.3 CUTEC 7
1.1.4 KM 7
1.1.5 LMU 7
1.1.6 SRH 7
1.1.7 tkMSS 8
1.1.8 Fazit AP 0 8
1.2 Arbeitspaket 1: Repräsentative Probenahme und Eingangskontrolle 9
1.2.1 IBP 9
1.2.2 bvw 10
1.2.3 CUTEC 10
1.2.4 KM 11
1.2.5 LMU 12
1.2.6 SRH 15
1.2.7 tkMSS 15
1.2.8 Fazit AP1 16
1.3 Arbeitspaket 2: Aufbereitung und Charakterisierung 16
1.3.1 IBP 16
1.3.2 bvw 18
1.3.3 CUTEC 18
1.3.4 KM 25
1.3.5 LMU 25
1.3.6 SRH 39
1.3.7 tkMSS 40
1.3.8 Fazit AP 2 40

1.4 Arbeitspaket 3: Herstellung von Baustoffen im Labor 41
1.4.1 IBP 41
1.4.2 bvw 43
1.4.3 CUTEC 44
1.4.4 KM 44
1.4.5 LMU 44
1.4.6 SRH 44
1.4.7 tkMSS 44
1.4.8 Fazit AP 3 44
1.5 Arbeitspaket 4: Prüfung der hergestellten Bauprodukte 45
1.5.1 IBP 45
1.5.2 bvw 46
1.5.3 CUTEC 47
1.5.4 KM 47
1.5.5 LMU 47
1.5.6 SRH 47
1.5.7 tkMSS 47
1.5.8 Fazit AP 4 47
1.6 Arbeitspaket 5: Umsetzung im industriellen Maßstab 48
1.6.1 IBP 48
1.6.2 bvw 48
1.6.3 CUTEC 49
1.6.4 KM 49
1.6.5 LMU 49
1.6.6 SRH 49
1.6.7 tkMSS 49
1.6.8 Fazit AP 5 49
1.7 Arbeitspaket 6: Recyclingfähigkeit der Bauprodukte 50
1.7.1 IBP 50

1.7.2 bvv 51
1.7.3 CUTEC 51
1.7.4 KM 52
1.7.5 LMU 56
1.7.6 SRH 56
1.7.7 tkMSS 56
1.7.8 Fazit AP 6 56
1.8 Arbeitspaket 7: Ökobilanzierung, techno-ökonomische Analyse und rechtliche Rahmenbedingungen 57
1.8.1 IBP 57
1.8.2 bvv 66
1.8.3 CUTEC 66
1.8.4 KM 67
1.8.5 LMU 67
1.8.6 SRH 68
1.8.7 tkMSS 68
1.8.8 Fazit AP 7 68
1.9 Arbeitspaket 8: Wissenstransfer 69
1.9.1 IBP 69
1.9.2 bvv 69
1.9.3 CUTEC 69
1.9.4 KM 69
1.9.5 LMU 69
1.9.6 SRH 69
1.9.7 tkMSS 69
1.10 Zusammenfassung 69
2 Vergleich erreichter Ergebnisse mit ursprünglicher Planung 72
3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten 74
3.1 IBP 74

3.2 bvw 74
3.3 CUTEC 74
3.4 KM 75
3.5 LMU 75
3.6 SRH 75
3.7 tkMSS 75
4 Nutzen der Ergebnisse, Verwertungsplanung 77
4.1 IBP 77
4.2 bvw 77
4.3 CUTEC 77
4.4 KM 78
4.5 LMU 78
4.6 SRH: 78
4.7 tkMSS 79
5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch Dritte 80
6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen 81

1 Wissenschaftlich-technische Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten sind die durchgeführten Arbeiten und die dabei erzielten Ergebnisse beschrieben und diskutiert. Dabei wurde die Beschreibung der Arbeiten anhand der Arbeitspakete durchgeführt. In Abbildung 1 ist der geplante zeitliche Ablauf des Projektes gezeigt.

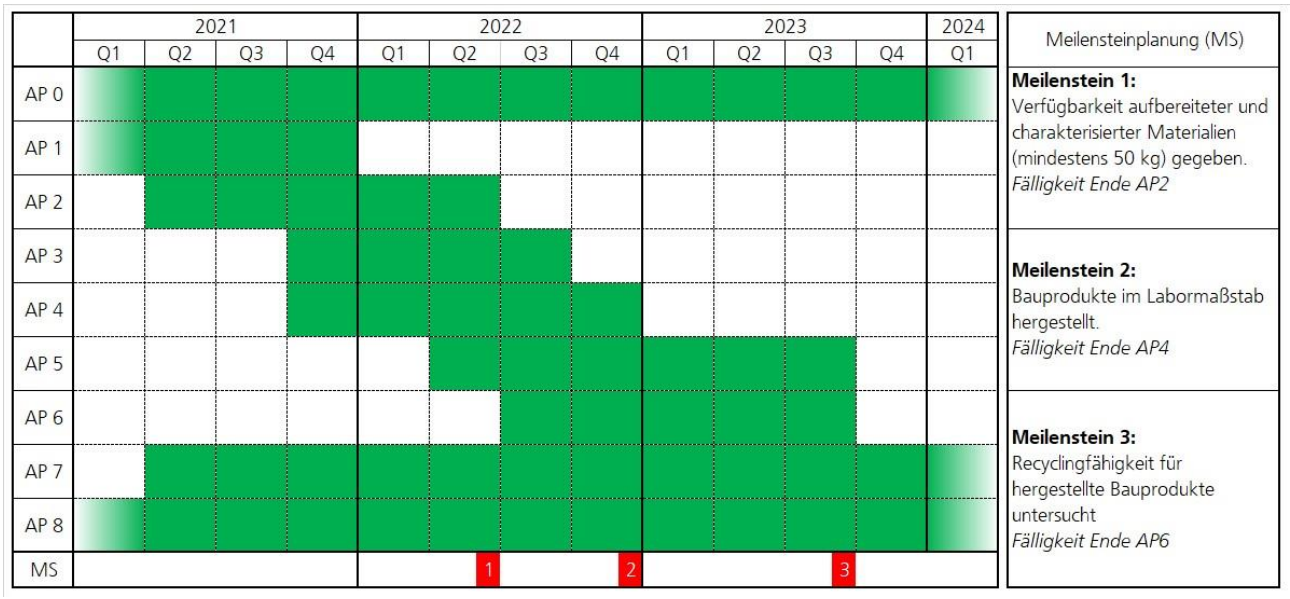

Abbildung 1: geplanter zeitlicher Ablauf des Projektes BAUSEP

1.1 Arbeitspaket 0: Projektmanagement und -koordination

1.1.1 IBP

Als Verbundkoordinator oblag dem Fraunhofer IBP die Koordination des Gesamtprojektes. Zu Beginn des Projektes wurde eine entsprechende interne Infrastruktur zur Sicherung und Ablage relevanter Daten geschaffen. Neben diesem Cloud-basierten Ablagesystem für Dateien wurde ein monatliches Jour-Fixe (via MS Teams) zum regelmäßigen Austausch von Ergebnissen und zur engen Abstimmung von anstehenden Arbeiten eingerichtet.

Im Rahmen der Anbahnung des Projektes wurde durch das Fraunhofer IBP die Ausarbeitung eines Kooperationsvertrages vorangetrieben, welcher am 31.05.2021 von allen Partnern unterschrieben wurde.

Für die interne Zusammenarbeit wurden zudem 6 Projekttreffen organisiert. Dabei war das Fraunhofer IBP stets in der grundlegenden Organisation und Koordination eingebunden. Die Projekttreffen wurden so gewählt, dass die einzelnen Partner/Unternehmen in sinnvollem Bezug zum Projektfortschritt Gastgeber waren und die jeweiligen „Produktions- bzw. Aufbereitungsstrecken" besichtigt werden konnten. Die Treffen fanden halbjährlich statt.

Wie in der Vorhabenbeschreibung geplant, wurde per Unterauftrag die Fa. Meinert Mineralstoffe GmbH unter Berücksichtigung des geltenden Vergaberechtes in das Vorhaben

eingebunden. Zusätzlich zum regelmäßigen Austausch von Arbeitsergebnissen durch die Teilnahme von Hr. Frank Meinert an den monatlichen Jour Fixe hat die Fa. Meinert ihre Arbeiten und Ergebnisse zusätzlich in jährlichen Zwischenberichten dokumentiert.

1.1.2 bvw

bvw hat sowohl an den persönlichen Projekttreffen als auch regelmäßig an den jour-fix Runden teilgenommen. Die im industriellen Maßstab hergestellten Bauprodukte wurden allen Projektteilnehmern zu Verfügung gestellt. Informationen und Ergebnisse von bvw sind in der Cloud hinterlegt. Der komplette Fertigungsprozess vom Rohstoffbezug bis zum verkaufsfähigen Bauprodukt, insbesondere der detaillierte Ablauf des Fertigungstaktes, wurde allen Projektteilnehmern vorgestellt und erläutert. bvw hat am 05. und 06.12.2022 zu einem Präsenztermin in Hamminkeln geladen. Hier konnten die Projektteilnehmer in der Praxis im Werk die Herstellung von Bauprodukten verfolgen und sich in der Akademie Klausenhof in Hamminkeln-Dingden dazu austauschen.

1.1.3 CUTEC

Seitens CUTEC wurde an den monatlichen Onlinemeetings sowie an den zweimal jährlich stattfindenden Verbundtreffen, von denen eines am CUTEC Forschungszentrum organisiert wurde, teilgenommen.

1.1.4 KM

Als Verbundpartner wurde an den regelmäßigen, in der Regel monatlichen Jour-Fix-Terminen, teilgenommen und je nach Fortschritt der Untersuchungen fachliche Hinweise in Bezug auf die einschlägigen Regelwerke gegeben. Dabei erfolgte auch die Teilnahme an diversen Präsenzterminen.

1.1.5 LMU

Bei den regelmäßig stattfindenden jour fix online meetings wurde der Fortgang des Projektes besprochen und evtl. aufgetretene Fragen diskutiert. Außerdem wurde bei offenen Fragen gemeinsam ein weiteres Vorgehen besprochen und festgelegt. Das 1. BAUSEP Projekttreffen fand am 7./8.10.2021 unter Berücksichtigung der geltenden Coronaregeln in München in den Räumen des Museums Mineralogia statt. Für interessierte Teilnehmer fand im Anschluss an das Projekttreffen eine Führung durch das Museum statt. Am 5.12.2022 wurde zusammen mit Prof. Deike (Lehrstuhl Metallurgie und Umformtechnik) an der Universität Duisburg/Essen ein workshop zum Thema Aschen aus der Hausmüllverbrennung und deren Aufbereitung für den Einsatz in der Baustoffindustrie abgehalten

1.1.6 SRH

Die Projektarbeit in der Projektgruppe war in regelmäßigen jour-fix Runden organisiert, Ergebnisse sind zentral in der „Fraunhofer owncloud" für jeden einsehbar abgelegt. Es fanden mehrere Präsenstermine statt, am 28.02.2022 war Hamburg SRH selbst Gastgeber und Treffpunkt für das 2. BAUSEP-Projekttreffen. Dabei konnten sich die Projektpartner vor Ort die

Müllverbrennungsanlage Borsigstraße der Stadtreinigung Hamburg anschauen sowie die Ascheaustragung und -Behandlung besichtigen.

Wie im Projektantrag beschrieben, wurde die SRH durch ihre 100 % Tochter, HiiCCE Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection and Circular Economy GmbH auf Basis einer vertraglichen Kooperationsvereinbarung unterstützt. Mit der Anerkennung als wissenschaftliches An-Institut durch die Technische Universität Hamburg wurde die ehemalige JOMA-Umwelt-Beratungsgesellschaft mbH in HiiCCE Hamburg Institute for Innovation, Climate Protection and Circular Economy GmbH umfirmiert.

1.1.7 tkMSS

Im Rahmen der Projektbearbeitung hat tkMSS sowohl an den regelmäßigen jour-fix Terminen als auch an den Präsenztreffen teilgenommen. Das fünfte BAUSEP-Projekttreffen wurde von tkMSS organisiert und fand am 14.11.2023 in Oberhausen statt.

1.1.8 Fazit AP 0

Diese Struktur und die regelmäßigen Treffen förderten die enge Zusammenarbeit und den Austausch von Wissen zwischen den Partnern, um die Projektziele erfolgreich zu erreichen.

1.2 Arbeitspaket 1: Repräsentative Probenahme und Eingangskontrolle

1.2.1 IBP

Nach erfolgter Probenahme wurden die Proben am Fraunhofer IBP angeliefert und dort auf Vollständigkeit kontrolliert. Im Anschluss wurden die Proben systematisch gekennzeichnet, um im späteren Projektverlauf Verwechslungen zu vermeiden. In Tabelle 1 sind die verwendeten Materialien aufgelistet. Die hier gelisteten HMV-Aschen wurden nach dem EOP-Watech Verfahren[1] (außerhalb des Projektes) prozessiert und dem IBP zugestellt.

Tabelle 1: Auflistung der untersuchten Materialien

Bezeichnung	Art der Probe	Korngröße [mm]
HX 0/1	Primärer Sand	0 bis 1
HX 0/2	Primärer Sand	0 bis 2
LiDonit 0/2	Stabilisierte LD-Schlacke	0 bis 2
LiDonit 2/5	Stabilisierte LD-Schlacke	2 bis 5
LiDonit 5/8	Stabilisierte LD-Schlacke	5 bis 8
HOS 0/2	Hochofenschlacke	0 bis 2
HOS 2/8	Hochofenschlacke	2 bis 8
EOS 2/4	Elektroofenschlacke	2 bis 4
EOS 4/8	Elektroofenschlacke	4 bis 8
BaseLith 3/8	Unbehandelte LD-Schlacke	3 bis 8
MVB EOP 1/2	Aufbereitete HMV-Asche	1 bis 2
MVB EOP 2/4 oG	Aufbereitete HMV-Asche nach Glasabtrennung	2 bis 4
MVB EOP 4/8	Aufbereitet HMV-Asche	4 bis 8
SEKS 2/8	Sekundärmetallurgische-Schlacke	2 bis 8

[1] Das EOP-Watech Verfahren, DOI: https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.04.08

1.2.2 bvw

bvw hat, wie auch bei den folgenden Punkten aufgezeigt, ausgewählte Rohstoffe aus der eigenen Fertigung für die Labortätigkeit beim IBP zur Verfügung gestellt. Für die Fertigung im industriellen Maßstab wurden Aschen und Schlacken in zuvor abgestimmten Mengen und Fraktionen von den anderen Projektteilnehmern bezogen. Dabei konnte auch eine Probe einer HMV-Asche bezogen werden, welche mit dem EOP-WATECH Verfahren aufbereitet wurde und mit dem Namen Ultralit gekennzeichnet wurde.

1.2.3 CUTEC

Insgesamt wurden in Abstimmung mit dem Projektpartner SRH drei Probenahmekampagnen innerhalb der Projektlaufzeit durchgeführt. Die eigentliche Entnahme und Abfüllung der Proben erfolgte dabei jeweils durch den Partner SRH.

Probennahme I: Mit Projektstart wurde umgehend mit der Planung einer ersten Probenahme von Hausmüllverbrennungsaschen begonnen. Die Probennahme in den Hausmüllverbrennungsanlagen wurde durch den Partner SRH in Hamburg organisiert und verschiedene Proben, bereits fertig konfektioniert, für die Abholung durch CUTEC bereitgestellt. Bei einem Teil der Proben handelte es sich um frische und noch nicht stabilisierte Aschen, die zeitnah noch einer Trocknung im CUTEC Forschungszentrum unterzogen werden mussten.

Abbildung 2: Probenahme in Hamburg, Trocknung des Materials im CUTEC, Fotos: CUTEC

Probenahme II: Für die weiterführenden Arbeiten stellte die Stadtreinigung Hamburg im Zuge einer zweiten Probennahme ca. 300 kg Aschen für die Versuche bereit, die von CUTEC Anfang Juli 2022 aus Hamburg abgeholt wurden. In Anlehnung an die Partikelgrößen des WATECH-Verfahrens, einem bereits entwickelten Aufbereitungsverfahren aus dem ebenfalls Material im Projektverbund eingesetzt wird, wurde das Material zunächst gebrochen und im Anschluss die Fraktion von 1 bis 4 mm für die Aufbereitungsversuche extrahiert.

Abbildung 3: Proben von Hausmüllverbrennungsasche der zweiten Probennahme, Fotos: CUTEC

Probenahme III: Für die abschließenden Arbeiten des Projektes, in diesem Fall die Bereitstellung von aufbereiteten Aschen in ausreichender Menge für die Baustoffherstellung beim Partner IBP, wurde eine dritte Probennahme durch SRH organisiert. Insgesamt wurde rund 1 t HMVA für die Weiterverarbeitung bereitgestellt. Abweichend wurde das Material mittels Spedition an das Institut geliefert.

Abbildung 4: Hausmüllverbrennungsasche aus Probennahme III, im Anlieferungszustand, Foto: CUTEC

1.2.4 KM

KM war nicht in die Probennahme oder Eingangskontrolle involviert.

1.2.5 LMU

Von den einzelnen Projektpartner wurden insgesamt 26 Proben an die LMU geliefert. Für die anschließende Charakterisierung wurden entsprechende Mengen entnommen und makroskopisch sowie mikroskopisch abgebildet. Die verbleibenden Probenmengen wurden an Fraunhofer IBP übergeben. Abbildungen 5 bis 12 zeigen die Proben, welche für die Charakterisierung bereitgestellt wurden und aus denen geeignetes Material für die Labor- und Industrieversuche ausgewählt werden sollten.

- Natürliche Primärrohstoffe bvw Steinwerk

Abbildung 5: natürliche Proben bvw Steinwerk

Abbildung 5 zeigt die natürlichen Proben, die bei bvw Steinwerk je nach Rezeptur zum Einsatz kommen. Es handelt ich um Sand in der Körnung 0/2, Kies in der Körnung 2/8 und 8/16, Basalt in der Körnung 1/3, 2/5 und 5/8 sowie Kalkstein in der Körnung 5/8.

- SRH/JOMA MVA aufbereitete Hausmüllverbrennungsasche

Abbildung 6: SRH/JOMA aufbereitete Müllverbrennungsasche MVB EOP Watech, in den Körnungen 1/2, 2/4, 4/8, 8/12,5, 12,5/16 von links nach rechts

Abbildung 6 zeigt Müllverbrennungsasche der der Stadtreinigung Hamburg in den Körnungen 1/2, 2/4, 4/8, 8/12,5 und 12,5/16, die bei EOP Watech nach einem speziellen Verfahren aufbereitet wurde. Durch die weitergehende Aschenaufbereitungsmethode sind die Proben größtenteils vom Feinanteil, der als Verkrustung an den Oberflächen der einzelnen Partikel anhaftet, befreit.

- tkMSS LiDonit, stabilisierte LD-Schlacke

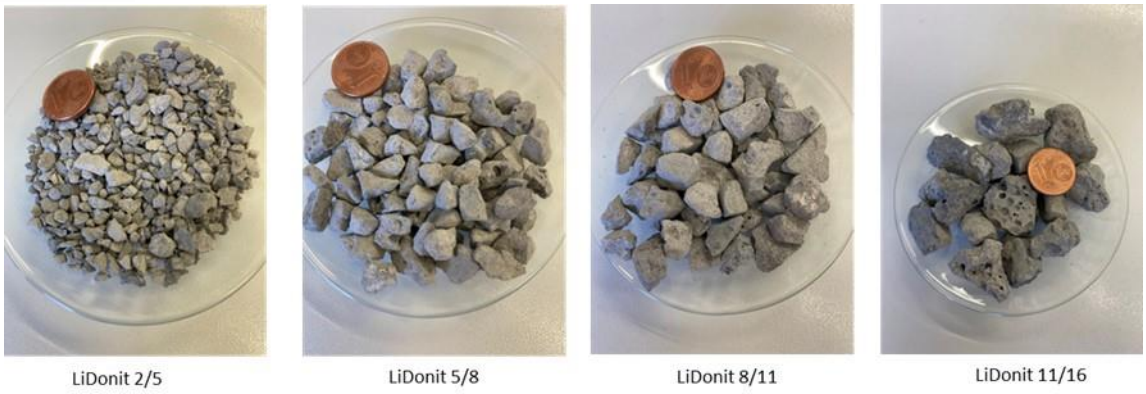

Abbildung 7: LiDonit, stabilisierte LD-Schlacke, tkMSS

Abbildung 7 zeigt stabilisierte LD-Schlacke in den Körnungen 2/5, 5/8, 8/11 und 11/16. Insbesondere bei den gröberen Körnen sind Hohlräume gut zu erkennen.

- tkMSS Hochofenschlacke HOS

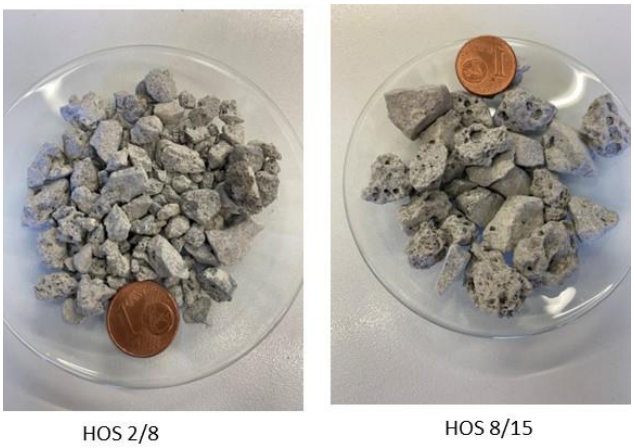

Abbildung 8: Hochoffenschlacke HOS, tkMSS

Abbildung 8 zeigt Hochofenschlacke in den Körnungen 2/8 und 8/15. Gut zu erkennen sind bei den gröberen Körnern die Hohlräume.

- tkMSS BaseLith, unbehandelte LD-Schlacke

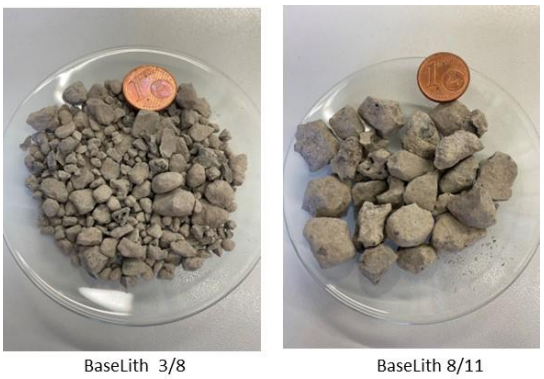

Abbildung 9: BaseLith, unbehandelte LD-Schlacke, tkMSS

Abbildung 9 zeigt unbehandelte LD-Schlacke in den Körnungen 2/8 und 8/11. Im Vergleich zu behandelter LD-Schlacke sind weniger Hohlräume erkennbar.

- Meinert Mineralstoffe E-Ofenschlacke, Stahlwerk Riesa

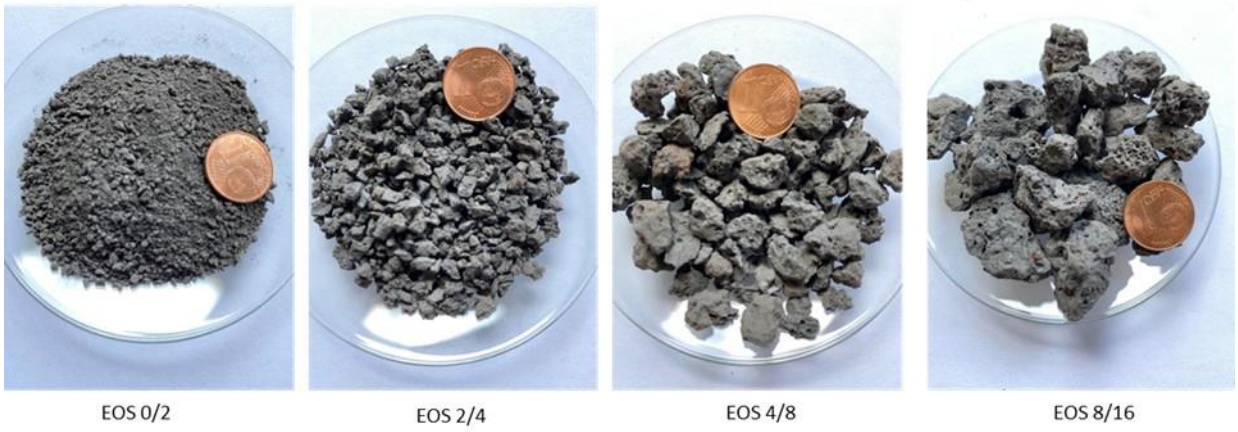

Abbildung 10: Hochofenschlacke, Meinert Mineralstoffe, Stahlwerk Riesa

Abbildung 10 zeigt Hochofenschlacke in den Körnungen 0/2, 2/4, 4/8 und 8/16. Bei den gröberen Körnen lassen sich noch einzelne Eisenpartikel erkennen, die in der Schlacke beim Austrag verblieben sind.

- tkMSS SEKS-Schlacke OX 2, Probennummer 0106123

Abbildung 11: SEKS-Schlacke OX 2, in den Korngrößen 2/8 (links) und 8/16 (rechts), tkMSS

Abbildung 11 zeigt SKS-Schlacke in den Körnungen 2/8 und 8/16. Es handelt sich um ein sehr inhomogenes Material, sowohl in Aussehen, Farben und Kornform.

- Hausmüllverbrennungsasche nach dem CUTEC-Verfahren aufbereitet und von Glaspartikeln entfrachtet

Q1 aufbereitet

Q2 aufbereitet

Abbildung 12: Die beiden Aschequalitäten Q1 und Q2 der Hausmüllverbrennungsasche, CUTEC

Abbildung 12 zeigt die nach einem speziellen Verfahren bei CUTEC aufbereiteten Hausmüllverbrennungsaschen, die zusätzlich von Glaspartikel entfrachtet wurden (siehe Kapitel 1.3.3).

1.2.6 SRH

Für die Charakterisierung und Untersuchung wurden von der SRH zu Projektbeginn zwei Proben von aufbereiteter Hausmüllverbrennungsasche (HMVA) bereitgestellt: 40 kg 0/32 (MVB EOP) und 20 kg 0/10 (MVR) HMVA carbonatisiert und ca. 8 Wochen gelagert. Es wurden außerdem 250 kg HMVA frisch ausgetragen und sofort getrocknet und gereinigt. Im Projektverlauf wurden dann nochmals weitere 350 kg aufbereiteter HMVA in Fässern sowie weitere 960 kg im BigBag zur Verfügung gestellt. Alle bereitgestellten HMVA wurden mit den an den Anlagen bestehenden Verfahren ausgetragen und von groben Eisenmetallen entfrachtet. Die Eingangskontrolle und Basisanalytik der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung aller HMVA erfolgte an der LMU.

1.2.7 tkMSS

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden von tkMSS insgesamt vier verschiedene Eisenhüttenschlacken für die Untersuchungen ausgewählt (s. Tabelle 1). Die unterschiedlichen Schlackenarten wurden an verschiedenen Standorten in Deutschland von fachkundigen Probenehmern gemäß LAGA PN 98 entnommen (ca. 1.000 kg pro Material). Diese Materialien wurden im thyssenkrupp MillServices & Systems Labor in Duisburg untersucht, ob sie die Anforderungen für die weiteren Untersuchungen erfüllen. Dabei zeigte sich, dass die beprobten Materialien charakteristisch und repräsentativ für die ausgewählten Stoffströme aus der Eisen- und Stahlindustrie sind. Anschließend wurden die Materialien für die weiteren Untersuchungen der Projektpartner aufbereitet, verpackt und an das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP in Holzkirchen geschickt. Die weitergehenden Untersuchungen wurden von den Projektpartnern durchgeführt. Die restlichen Probemengen wurden als Rückstellproben bei ca. 21 °C und trocken im Technikum von tkMSS gelagert.

1.2.8 Fazit AP1

Insgesamt gewährleisteten die strukturierte Probenahme und Eingangskontrolle eine fundierte Basis für die nachfolgenden Untersuchungen im Projekt.

1.3 Arbeitspaket 2: Aufbereitung und Charakterisierung

1.3.1 IBP

Zunächst wurden die Sieblinien der einzelnen Proben bestimmt. Konkret wurden die Proben dabei in zwei Kategorien aufgeteilt: feinkörnige Proben bis zwei Millimeter und gröbere Körnungen bis acht Millimeter. Dies erfolgte aus dem Grund um bei der Herstellung von Betonrezepturen mit Aschen & Schlacken die originalen, zu ersetzenden Sande/Kiese durch anteilige Mischung von feinen und gröberen Materialien möglichst identisch nachbilden zu können.

In Abbildung 13 sind die Fraktionen kleiner 2 Millimeter gezeigt. Die Kurven HX 0/1 und HX 0/2 entsprechen dem originalen Sand, wie er vom Industriepartner bvw zur Herstellung von Pflastersteinen eingesetzt wird. Es ist gut ersichtlich, dass die Kurven der anderen untersuchten Materialien LiDonit 0/2, HOS 0/2 und MVB 0/2 sehr geeignet sind, um die „idealen" Sieblinien von HX 0/1 und HX 0/2 nachzustellen. Insbesondere durch das gezielte Mischen der untersuchten Schlacken und Aschen kann eine nahezu perfekte Anpassung an die gewünschte „originale" Sieblinie erfolgen.

In Abbildung 14 sind die Fraktionen zwischen 2 Millimeter und 8 Millimeter gezeigt. Die Kurve HX 2/8 entspricht dem originalen Sand, wie er vom Industriepartner bvw zur Herstellung von Pflastersteinen eingesetzt wird. Ähnlich wie bei den feinkörnigen Materialien kleiner 2 Millimeter zeigt sich auch hier, dass der „originale" Sand gut durch Mischung aus den untersuchten Schlacken bzw. Aschen darstellbar ist. Im Falle der Hochofenschlacke HOS, welche ebenfalls im Kornband 2/8 untersucht wurde, zeigt sich, dass die Sieblinie schon als identisch zum Sand HX 2/8 betrachtet werden kann.

Die elektrodynamische Fragmentierung als Hochspannungsimpulszerkleinerung wurde als mögliche Aufbereitungsmethode getestet. Zunächst wurde damit begonnen Prozessparameter für die Fragmentierung zu bestimmen und zu optimieren. Im Anschluss wurden die Proben SEKS und EOS fragmentiert. Nach Auswertung der Ergebnisse wurde ersichtlich, dass aus der Auftrennung der Schlacken eine nahezu vollständige Auftrennung des Materials resultiert.

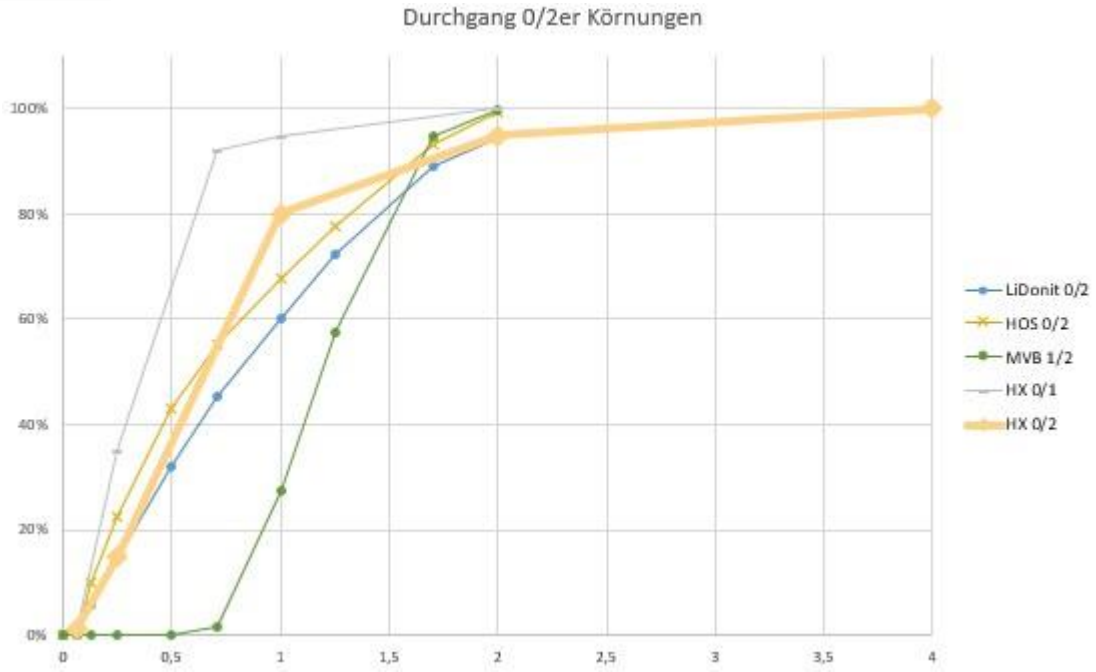

Abbildung 13 Sieblinien der untersuchten Materialien im Korngrößenbereich 0/2.

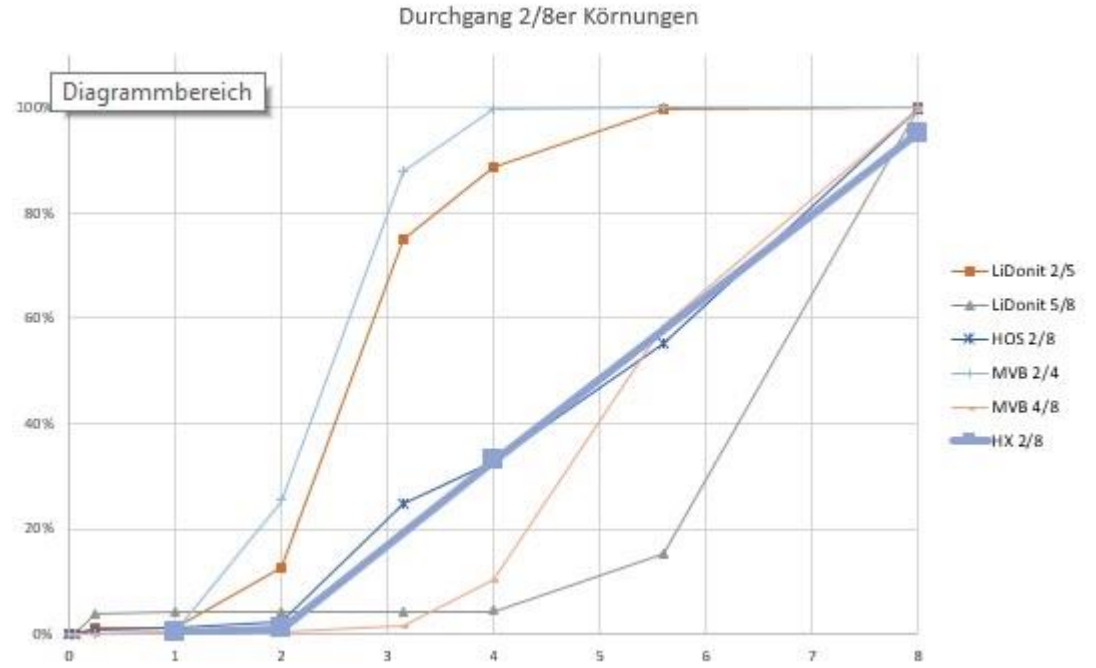

Abbildung 14 Sieblinien der untersuchten Materialien im Korngrößenbereich 2/8.

In den folgenden Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die fragmentierten Proben EOS und SEKS nach einer erfolgten Fraktionierung gezeigt.

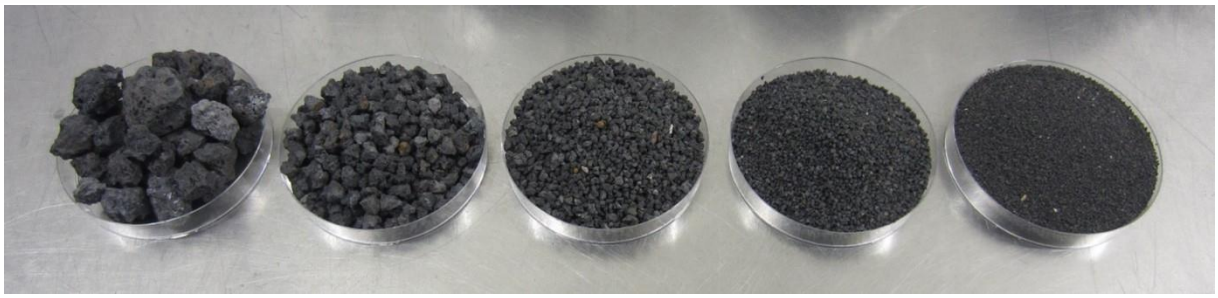

Abbildung 15 fraktionierte EOS nach der elektrodynamischen Fragmentierung (EDF).

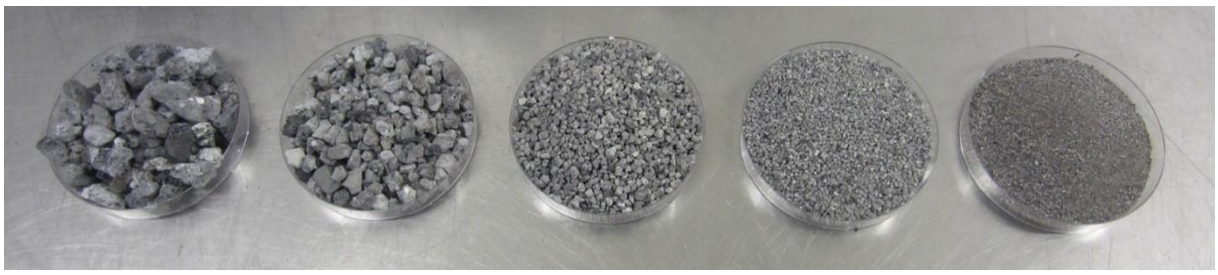

Abbildung 16 fraktionierte SEKS nach der elektrodynamischen Fragmentierung (EDF).

Mit Abschluss des AP 2 wurden erste Tastversuche zum Einsatz der aufbereiteten Aschen und Schlacken in zementären Systemen durchgeführt. Aus diesen konnte gezeigt werden, dass sowohl EOS als auch SEKS-Schlacken nicht im gewünschten Umfang primäre Gesteinskörnung ersetzen können. Aus diesem Grund wurden diese beiden Schlacken bei den weiterführenden Untersuchungen nicht weiterverwendet.

1.3.2 bvw

bvw hat die Rohstoffe aus der Fertigung dem IBP zur Verfügung gestellt zwecks Feststellung der Sieblinien und für die Herstellung der Probekörper im Labor. Die Herstellung der Probekörper im Labor ist betontechnisch deckungsgleich zu der Fertigung im industriellen Maßstab.

1.3.3 CUTEC

Dem Projektverbund ist bekannt, dass im Zuge der Arbeiten eines anderen Verbundprojektes bereits eine Verfahrensidee zur Aufbereitung von HMVA erforscht wurde[2]. Allerdings war die Informationslage zu Beginn des BAUSEP-Projektes, dass die Behandlungskosten des sogenannten WATECH-Verfahrens zu hoch sind, um die aufbereiteten Materialien wirtschaftlich zur Baustoffherstellung nutzen zu können. Eine exakte Bewertung des WATECH-Verfahrens war aufgrund des Fehlens jeglicher Informationen über die gewählte Aufbereitungsroute nicht möglich. Ziel der Arbeiten am CUTEC war die allgemeine Überprüfung ob, ggf. durch Nutzung tolerierbarer Nichtidealitäten, kosteneffizientere Möglichkeiten der Aufbereitung möglich sind.

[2] Abschlussbericht EOP-WATECH, online abrufbar: https://www.tib.eu/de/suchen/id/TIBKAT%3A1841627585

Zunächst wurden dazu die verschiedenen Proben auf ihre Elementarzusammensetzung hin analysiert. Ziel dabei war eine Übersicht über die enthaltenen wesentlichen Komponenten zu erlangen. Detaillierte Analysen der Zusammensetzung wurden nicht am CUTEC durchgeführt, sondern durch Partner des Verbundes, denen dazu Materialproben der Aschen zur Verfügung gestellt wurden. Exemplarisch ist die gemessene Zusammensetzung der Probe „MVB 0/32" aus der Probennahme I in Abbildung 17 dargestellt, weitere Proben wiesen vergleichbare Zusammensetzungen auf, Ausreißer wurden in den Analysen nicht festgestellt.

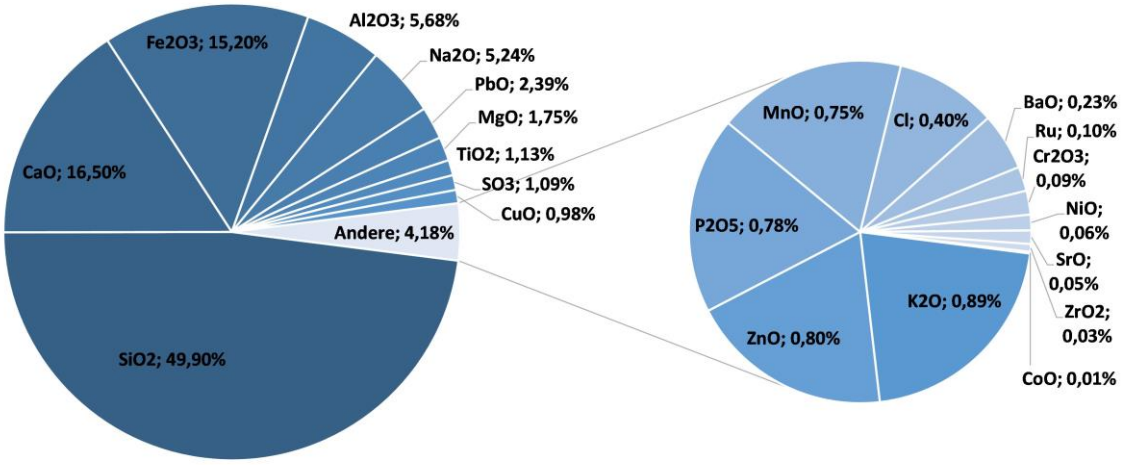

Abbildung 17: Zusammensetzung der Probe MVB 0/32, Probennahme I, Rohdaten RFA (nicht normiert, Summe: 104,1%)

Die hohen gemessenen Anteile an Silizium, zusammen mit Kalzium und Natrium, bestätigen die bereits optisch sichtbaren hohen Anteile an (Kalk-Natron-)Glas. Das Material wurde zwar bereits industriell einer Magnettrennung zur Eisenabscheidung unterzogen, enthält allerdings immer noch signifikante Anteile an Eisen. Dies liegt vermutlich daran, dass das Ziel der industriellen Magnettrennung am Standort der Verbrennungsanlage die Gewinnung einer verwertbaren Eisenfraktion ist, nicht aber die möglichst vollständige Abtrennung aller Fe-Anteile. Die noch enthaltenen Eisenanteile basieren vorwiegend auf nichtmagnetischen Eisenoxidanteilen und/oder in Aschepartikeln eingeschlossene magnetische Anteile. In späteren Versuchen abgeschiedene Magnetfraktionen zeigten sehr schlechte Qualitäten, was diese Annahme unterstützt. Die enthaltenen Salzfracht, wie Chloride und Sulfate, die ausgewaschen werden muss, ist laut den Eingangsanalysen geringer als zunächst angenommen. Zum Nachweis kritischer Spurenelemente, wie bspw. Antimon, ist die gewählte Messmethode nicht geeignet, belastbare Informationen darüber wurden nicht in den Laboren am CUTEC gesammelt.

Für erste Versuche wurde die im Baustoffsektor einsetzbare Körnung 2 – 4 mm aus den verschiedenen Proben der Probennahme I extrahiert und die Proben geteilt. Teilproben wurden (oberflächlich) gewaschen und einer (manuellen) Sortierung unterzogen. Ziel war dabei

Informationen über die enthaltenen Materialphasen zu erhalten. Auf eine manuelle und optische Sortierung wurde gesetzt, da die verschiedenen Fraktionen zum einen leicht zu unterscheiden waren, zum anderen eine wissenschaftliche Phasenuntersuchung mittels Röntgendiffraktometrie aufgrund der komplexen Probenzusammensetzung als nicht zielführend eingestuft wurde.

Auf Basis der vorliegenden Ergebnisse wurde für die ersten Aufbereitungsversuche eine erneute Magnettrennung vorgesehen, die manuell mittels handgeführtem Neodymmagneten erfolgte (Abbildung 18).

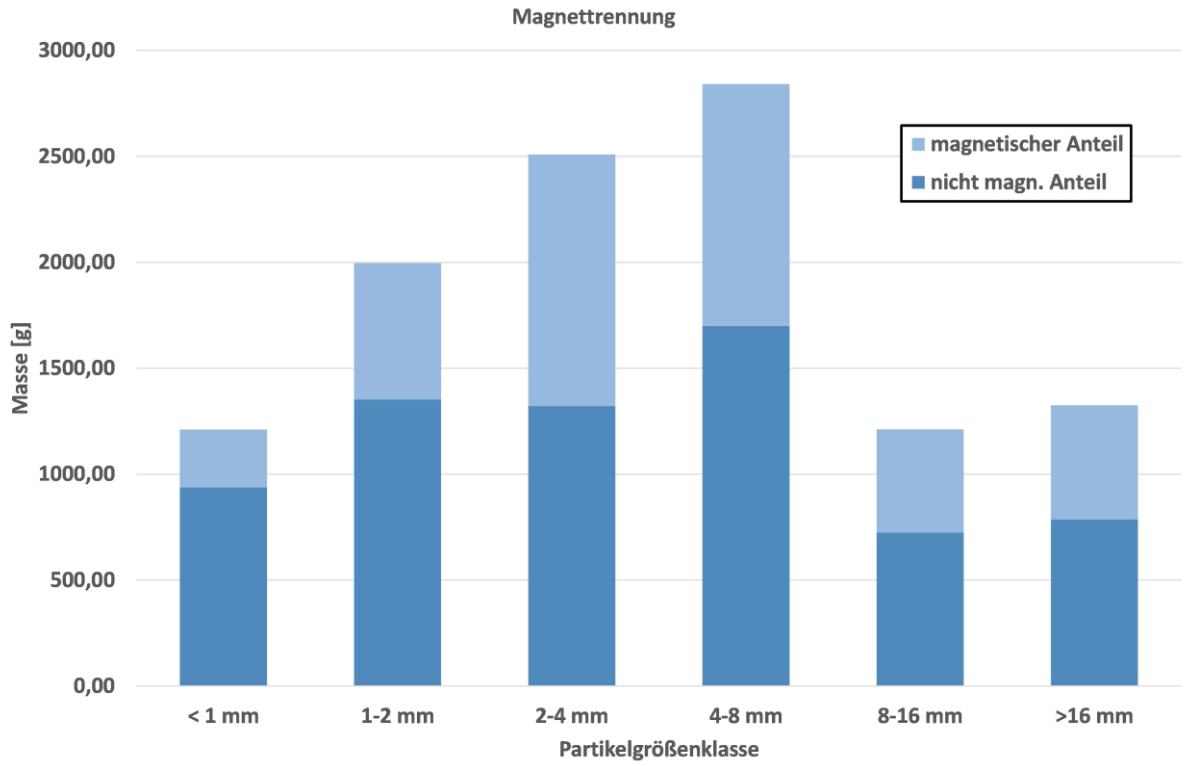

Abbildung 18: Ergebnisse Magnettrennung, Probe MVB 0/32, nach einfacher Wäsche, getrennt nach Partikelklassen

Die mittels Magnettrennung abgeschiedenen Mengen entsprechen nicht den gemessenen Eisenanteilen, was auf die erwartete Abscheidung von Mischpartikeln hindeutet. Da Eisenanteile für eine Verwendung als Zuschlagstoff in der Baustoffherstellung entfernt werden müssen, darüber hinaus die Mischpartikel geringe Festigkeiten und zusätzliche Frachten an Störelementen enthalten, ist eine Abtrennung unumgänglich. In späteren Aufbereitungsversuchen ist der Anteil der Magnetfraktion geringer, was vorwiegend daran liegt, dass die Fe-Separierung erst später in der Prozesskette, nach der Ultraschallwäsche, durchgeführt wurde. Durch den mechanischen Aufschluss wurden enthaltene Agglomerate, die magnetische Anteile enthielten, zerkleinert und ausgewaschen.

Proben der mit verschiedenen Methoden gewaschen Hausmüllverbrennungsaschen wurden, zwecks Einschätzung der Effizienz der Wäsche, mittels Mikroskopie beurteilt (Abbildung 19). Die mikroskopischen Untersuchungen zeigten, dass mit einfachen Waschverfahren, beispielsweise

in einer Siebtrommel, keine ausreichenden Reinigungsergebnisse erreicht werden können. Das Material weist dafür zu viele Poren auf, in denen sich problematischer (potenziell schwermetallhaltiger) Feinanteil befindet, dessen Anteil durch eine einfache Wäsche nicht zuverlässig ausreichend reduzieren lässt. Der logische nächste Schritt stellt die Wäsche unterstützt durch Ultraschall dar. Neben kleineren Laborgeräten standen dazu (aus älteren Projekten) noch passende Geräte im Technikumsmaßstab im CUTEC zur Verfügung.

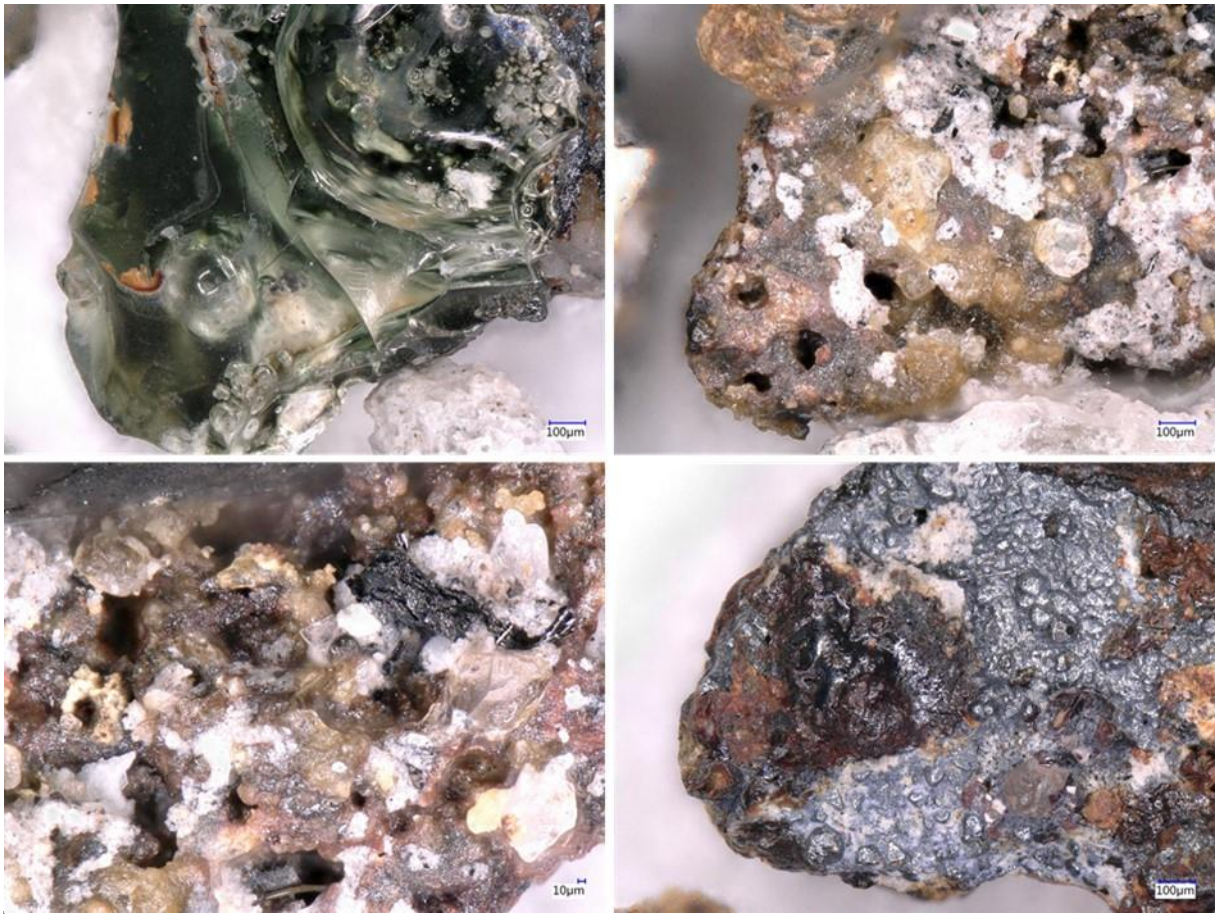

Abbildung 19: Mikroskopische Betrachtungen der HMV-Aschen, Probe MVB 0/32 aus Probennahme I, Körnung 2 – 4 mm, nach Ultraschallbehandlung, Fotos: CUTEC

Für diese weiterführenden Arbeiten stellte die Stadtreinigung Hamburg eine neue Probe von insgesamt circa 300 kg für die Versuche bereit, die von CUTEC aus Hamburg abgeholt wurde (Probenahme II). In Anlehnung an die Partikelgrößen des WATECH-Verfahrens, aus dem ebenfalls Material im Projektverbund eingesetzt wird, wurde das Material zunächst gebrochen und im Anschluss die Fraktion von 1 bis 4 mm für die weitere Behandlung extrahiert (Abbildung 20).

Die auf Basis der bisher vorliegenden Ergebnisse eingesetzte Prozesskette bestand dabei aus Brechen, Sieben (Rückführung des Überkorns zum Brechen), Magnettrennen (siehe Abbildung 21), Waschen, Ultraschallwaschen und Trocknen. Mit diesen Prozessschritten konnten aufbereitete Fraktionen erstellt werden. Am CUTEC durchgeführte Schütteleluatversuche im Rahmen von Laborvortests ließen ein positives Eluatverhalten erwarten, dienten aber aufgrund der nach wie vor unsicheren Analytik bezüglich kritischer Parameter, wie bspw. Antimon, nur

zum internen Gebrauch. Proben des Materials wurden für analytische Untersuchungen im Projektverbund bereitgestellt.

Da für die Verarbeitung der Schlacken aus dem Stahlwerk mit einer 2 – 8 mm Körnung mittlerweile hervorragende Ergebnisse erzielt werden konnten, wurde im Zuge der Verbundtreffen vereinbart, für die abschließenden Arbeiten auch die Aschen (inkl. des WATECH-Materials) von einer 1 – 4 mm auf die 2 – 8 mm Körnung umzustellen. Neben der möglicherweise schlechteren Wirkung der Ultraschallreinigung ergaben sich daraus allerdings auch einige weitere Änderungen bezüglich der anstehenden Bereitstellung größerer Mengen an aufbereiteten Aschen für die Baustoffherstellung. Zum einen sinkt durch die Anpassung des Korngrößenbereichs die Ausbeute, da die Fraktion 1 bis 2 mm zusätzlich entfällt. Zum anderen war die Nutzung einer „einfachen" Pilotanlage, auf Basis vorhandener Komponenten, zwecks Teilautomatisierung der Aufbereitung geplant. Für die Kreislaufförderung des Materials sollte eine vorhandene Schmutzwasserpumpe eingesetzt werden, die allerdings nur Partikel bis 6 mm ohne Beschädigungen fördern kann. Da kein passender Schneckenförderer verfügbar war, musste die Aufbereitung händisch und mit dem Laboraufbau erfolgen, der eigentlich nur als Provisorium gedacht war. Da für die Scale-Up-Versuche allerdings nur 250 kg aufbereitete Aschen benötigt werden, konnten die Arbeiten dennoch problemfrei und ohne Verzögerungen durchgeführt werden.

Abbildung 20: Genutztes Taumelsieb für die Klassierung, Brechen des Materials

Abbildung 21: Versuche zur Abtrennung magnetischer Partikel. Links händisch mittels eines Neodymmagneten, rechts mittels eines Elektromagneten im Technikum am CUTEC

Der Schwerpunkt der Arbeiten lag in der Bereitstellung größerer Mengen aufbereiteter Aschen aus der Hausmüllverbrennung für die Untersuchungen beim Partner IBP in Holzkirchen. Dazu wurde seitens der Stadtreinigung Hamburg eine Charge von rund 1 t Asche abgefüllt und nach Clausthal geliefert (Probenahme III).

Nach den Eingangsuntersuchungen wurden zwei Qualitäten Q1 und Q2 der gewünschten Zielfraktion 2 – 8 mm bereitgestellt: eine direkt aus der Asche extrahierte Kornfraktion der gewünschten Partikelklasse (Q2) und eine weitere 2/8-Fraktion, die durch Zerkleinerung des Überkorns entstanden ist (Q1, siehe Abbildung 22). Die Fraktionen wurden auch in den folgenden Aufbereitungsschritten getrennt weiterverarbeitet. Dies liegt im Wesentlichen darin begründet, dass die Zusammensetzung deutliche Unterschiede aufwies. Während die direkt ausgesiebte Fraktion einen höheren Anteil an Ascheagglomeraten enthielt, wies die nachgebrochene Fraktionen einen höheren Anteil an Bauschutt auf (Glas–, Keramik–, Ziegel– und Fliesenbruch), was auch Auswirkungen auf Eigenschaften wie die erreichbaren Baustofffestigkeiten oder die Eluatwerte erwarten ließ.

Abbildung 22: Verarbeitung der Asche: a) Überkorn > 8 mm zum Brechen, b) direkt gesiebte Fraktion Q2, c) Feinfraktion < 2 mm, d) Laborsiebung für Massenbilanz, e) Labortrennung für Massenbilanz

Dem Verfahrensentwurf aus dem Labor folgend wurden die beiden Qualitäten den Schritten Fe-Separation (Magnetscheidung) und Ultraschallwäsche zugeführt. Die Ultraschallwäsche

sollte eigentlich in Form einer provisorischen Technikumsanlage automatisiert werden. Aufgrund der geänderten Zielfraktion (2/8 statt 1/4) standen, wie bereits erwähnt, allerdings keine geeigneten Fördermöglichkeiten für die Zirkulation zur Verfügung. Die Aufbereitung erfolgte daher in kleineren Chargen händisch im Labor (Abbildung 23).

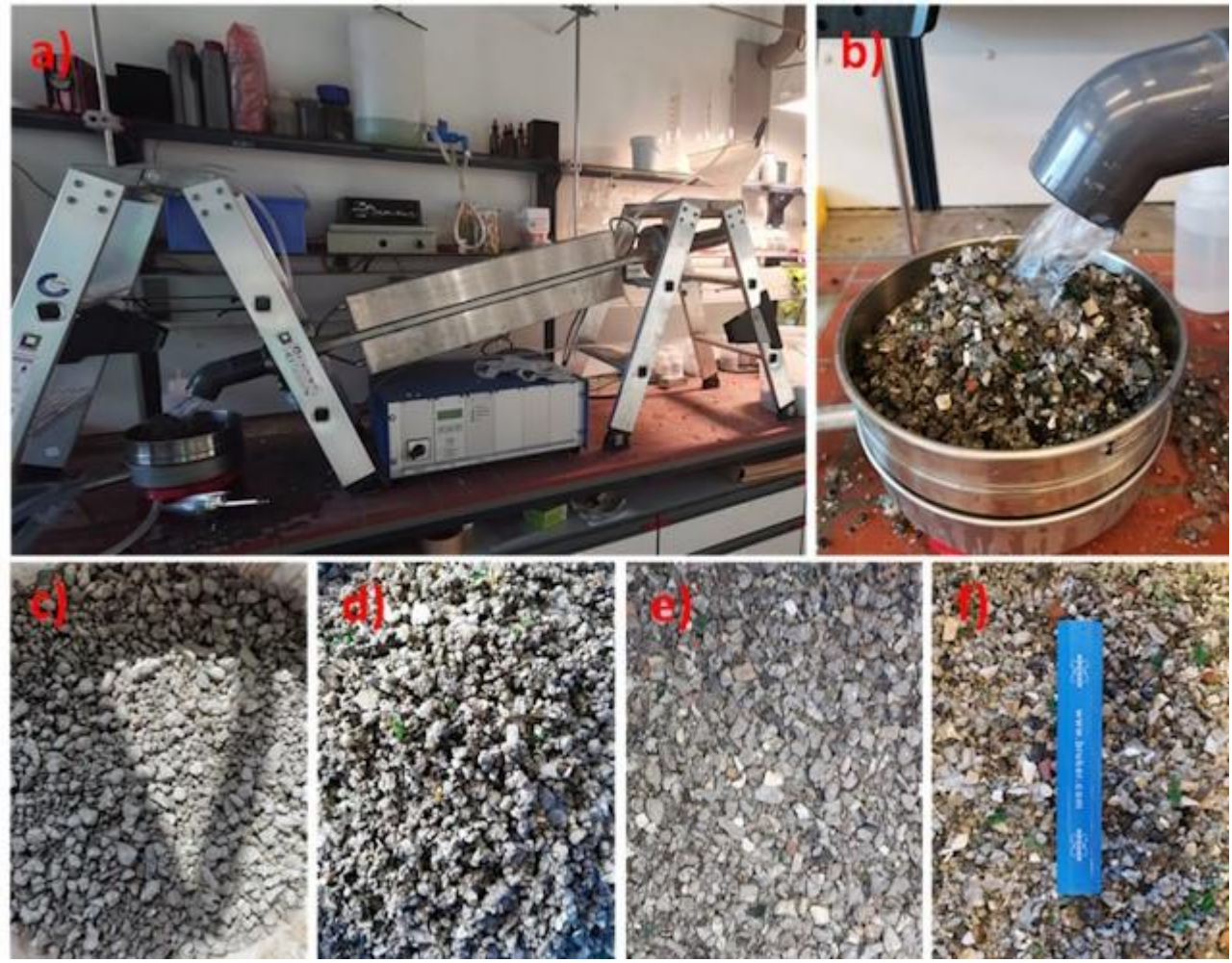

Abbildung 23: Aufbereitung der Aschen, a) provisorischer Versuchsaufbau zur Ultraschallwäsche, b) Wäsche der Fraktion Q1, c) Fraktion Q2 vor Wäsche, d) Fraktion Q2 nach Wäsche, e) Fraktion Q1 vor Wäsche, f) Fraktion Q1 nach Wäsche

Eine Änderung ergab sich hinsichtlich des nach wie vor in den Aschen enthaltenen Glasanteils. Im Rahmen eines Verbundtreffens wurde diskutiert, dass enthaltene Glaspartikel eventuell zu einer Verschlechterung der Festigkeitseigenschaften hergestellter Baustoffe führen, da der Zementleim nicht oder nur schlecht auf Glasoberflächen anhaftet. Da am Standort des CUTEC, und auch innerhalb des Projektverbundes, keine geeignete und automatisierte Sortiertechnik für die Trennung der größeren Mengen zur Verfügung stand, wurde der Einsatz einer (optischen) Sortiermaschine bei der Firma Mogensen in Hamburg durch den Verbundkoordinator organisiert. In diesen von CUTEC und der Stadtreinigung Hamburg vor Ort begleiteten, und von der Fa. Mogensen dankenswerterweise kostenfrei durchgeführten, Versuchen konnte ein Großteil der Glasfraktion erfolgreich aus den Proben entfernt werden, was die Aufbereitung damit abschloss (Abbildung 24). An dieser Stelle erwies sich der Wechsel der Kornfraktion auf die

2 – 8 mm als Vorteilhaft, da diese sich bei der eingesetzten Sortiertechnik positiv auf die erreichbare Trennschärfe auswirkt.

Abbildung 24: Versuche zur Glasabtrennung bei Mogensen in Wedel

Proben der verschiedenen Fraktionen wurden für weitergehende Analysen dem Projektverbund zur Verfügung gestellt, der Großteil im Anschluss für die Versuche zur Baustoffherstellung durch CUTEC nach Holzkirchen gebracht.

Bei der Bewertung der Ergebnisse aus den durchgeführten Aufbereitungsversuchen sind die Einschränkungen des verwendeten Versuchsaufbaus zu berücksichtigen. Der Ultraschallgenerator ist als Rohrreaktor eigentlich für einen kontinuierlichen Betrieb im Bereich der Schlammbehandlung vorgesehen, und nicht zur Behandlung von Suspensionen mit Partikeln im Größenbereich der BAUSEP-Versuche. Durch den Schrägeinbau konnten die Aschen zwar trotzdem mittels fließendem Wasser durch den Reaktor „gefördert" werden, allerding war dieser nicht komplett mit der Waschlösung (Wasser) gefüllt, die Hälfte der Schwinger blieb trocken und konnte auch nicht separat deaktiviert werden. Die ist nicht nur für den Reaktor kein idealer Betriebszustand, auch für die Behandlung der Aschen sinkt die Energieeffizienz erheblich. Zusätzlich musste die Betriebsleistung zur Schonung des Reaktors auf 25 % der Maximalleistung reduziert werden. Für eine industrielle Anwendung ist die die Reaktorgeometrie dementsprechend anzupassen.

Die Versuche zeigten, dass, ggf. durch eine Anpassung der ersten Prozessschritte, auch für die schlechtere Qualität „Q2" (siehe Abbildung 60: Fließbild des eingesetzten Verfahrens zur Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsaschen) eine Verbesserung der Qualität erreicht werden könnte. Eine Zerkleinerung des Materials in einer Prallmühle vor der Siebung wie es mittlerweile im EOP-Watech Verfahren umgesetzt ist, scheint für eine industrielle Aufbereitung der Aschen zielführend zu sein.

1.3.4 KM

Bei KM fand im Rahmen des AP 2 keine Aufbereitung oder Charakterisierung der Materialien statt.

1.3.5 LMU

Alle Proben wurden chemisch und mineralogisch charakterisiert. Die Analysemethoden waren Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) zur Bestimmung des Gesamtchemismus, Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) zur Bestimmung des mineralogischen Phasenbestandes, Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit einer energiedispersiver Röntgenanalyse (REM-EDX) zur Bestimmung der Oxidationsstufen von Kupfer, Bestimmung der Glühverlusts wurde bei 1050°C bestimmt, die Fe^{2+}-Gehalte wurden titrimetrisch mit Kaliumdichromat-Lösung (K2Cr2O7) ermittelt.

- Natürliche Primärrohstoffe bvw Steinwerk

Sand:

Chemische Zusammensetzung:

Chemische Hauptbestandteile: SiO_2 (85,8 Gew.-%); Al_2O_3 (5,7 Gew.- %), Fe_2O_3 (2,1 Gew.-%), CaO (2,4 Gew.-%) und K_2O (2,2 Gew.-%);

chemische Nebenbestandteile Na_2O, MgO;

Spurenelemente Ti, Cu, Ba.

Mineralogische Phasenidentifizierung: Quarz, Pyroxen, Feldspat.

Kies:

Chemische Zusammensetzung: Chemische Hauptbestandteile SiO_2 (88,3 Gew.-%); Al_2O_3 (5,8 Gew.-%), Fe_2O_3 (2,3 Gew.-%), CaO (1,1 Gew.-%), K_2O (1,1 Gew.-%); chemische Nebenbestandteile Na2O, MgO; Spurenelement Ti.

Mineralogische Phasenidentifizierung: Quarz, Pyroxen, Feldspat.

Basalt:

Chemische Zusammensetzung: Chemische Hauptbestandteile SiO_2 (40 Gew.-%); Al_2O_3 (14 Gew.-%), Fe_2O_3 (16 Gew.-%), CaO (12 Gew.-%), K_2O (1,3 Gew.-%), Na_2O (4 Gew.-%) MgO (8 Gew.-%), Ti

(1,6 Gew.-%); chemische Nebenbestande Cl, Cu, Sr; Spurenelemente Zn, Zr, Ba.

Mineralogische Phasenidentifizierung: Olivin, Pyroxen, Feldspat.

Kalkstein:

Chemische Zusammensetzung: Chemischer Hauptbestandteil CaO (98 Gew.-%), Nebenbestandteile MgO, Al_2O_3, SiO_2, Fe_2O_3.

Mineralogische Phasenidentifizierung Calcit, Dolomit.

- SRH/JOMA MVA EOP aufbereitete Hausmüllverbrennungsasche

Aufgrund der speziellen Aufbereitungsmethode ist die Müllverbrennungsasche weitestgehend von Inkrustierungen, die während der Verbrennung, der Nassaustragung und der Lagerung der Asche entstehen befreit. Abbildung 25 links zeigt die Müllverbrennungsasche nach dem Austrag aus dem Ofenraum. Abbildung 25 rechts zeigt die Asche, nachdem sie speziell aufbereitet wurde, bei 30-facher Vergrößerung. Neben Glas-, Keramik-, Steinbruchstücken gibt es schwarze Schmelzpartikel, die größtenteils magnetisch sind.

Abbildung 25: MVB unbehandelt (links), MVB 1/2 nach Aufbereitung, 30-fach vergrößert (rechts)

Die chemischen Zusammensetzungen der Proben MVB 1/2, MVB 2/4 und MVB 4/8 zeigt Abbildung 26. Oben links sind die Hauptelemente aufgetragen. Innerhalb der einzelnen Körnungen gibt es keine großen Schwankungen bei den Gehalten der Hauptelemente SiO_2, Al_2O_3, CaO, Fe_2O_3 und MgO. Bei den Nebenelementen steigen die Gehalte an Na_2O mit gröber werdendem Korn an, bei K_2O nehmen mit gröber werdendem Korn die Gehalte ab. Bei SO_3 und Cl nehmen die Gehalte zur gröberen Körnung hin ab. Bei den Spurenelementen nehmen die Gehalte an Cu mit steigender Körnung zu. Die Zn-Gehalte sind bei Körnung 1/2 und 2/4 identisch, bei Körnung 4/8 nehmen die Gehalte ab. Die Sr-Gehalte sind bei Körnung 1/2 und 2/4 identisch, bei Körnung 4/8 nehmen die Gehalte ab. Die Ba- und Pb-Gehalte sind bei Körnung 2/4 am höchsten, bei Körnung 4/8 am niedrigsten.

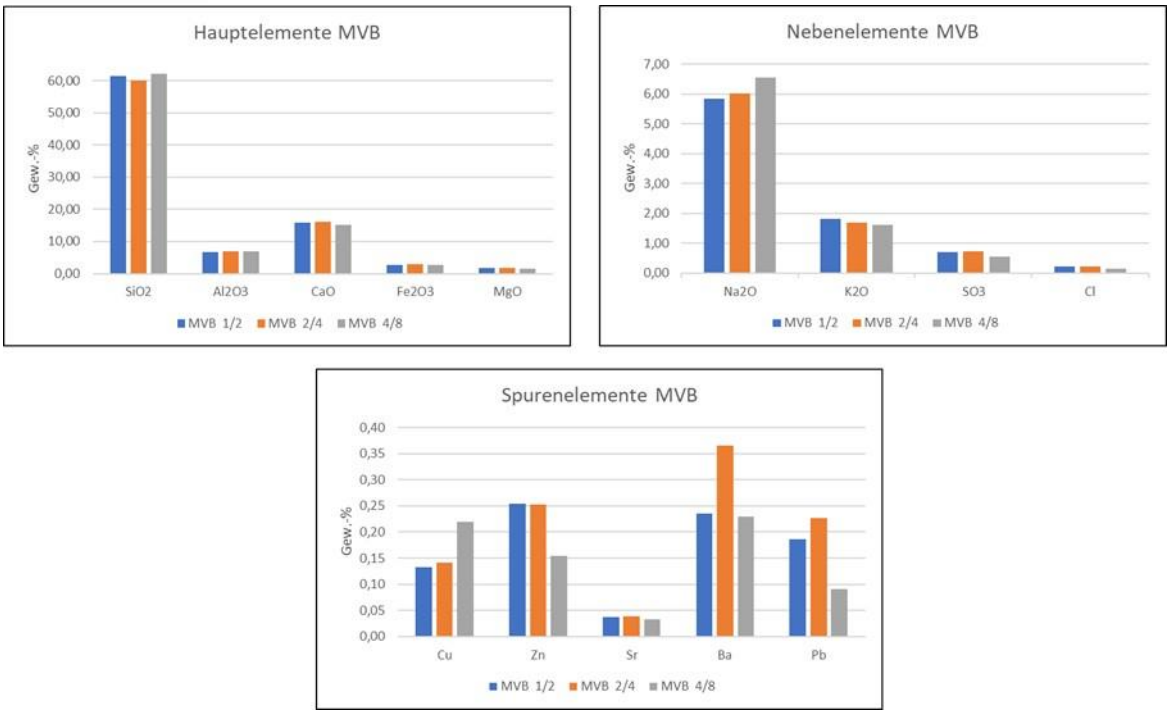

Abbildung 26 Haupt- (oben links), Neben- (oben rechts) und Spurenelemente (unten) MVB-Körnungen 1/2, 2/4 und 4/8

Röntgenographisch konnten die Mineralphasen Quarz, Gips, Feldspat und Glauberit identifiziert werden.

Da sich im Verlauf des Projektes die Fragestellung ergab, in welchen Oxidationsstufen Kupfer vorliegt und ob es Phasen gibt in denen Kupfer bevorzugt eingebaut wird, wurden weitere Charakterisierungen der Asche durchgeführt. Die Asche wurde nach gängiger Methode von Fe- und NE-Metallen entfrachtet. Da die Fe- und NE-Metall Entfrachtung nicht zu 100% möglich ist finden sich weiterhin Fe- und NE-Partikel, meistens feine Drähte in den Aschen (Abbildung 27).

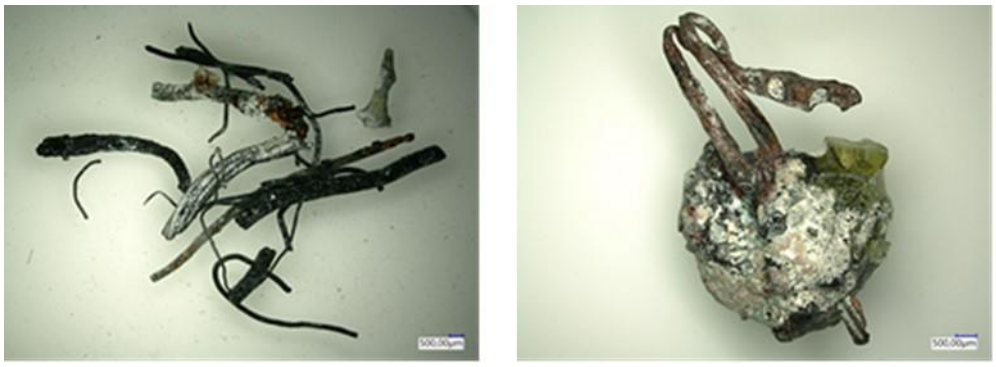

Abbildung 27 Feine Drähte (links); mit Korn verschmolzener Draht (rechts)

Eine Massenbilanzierung der abgetrennten Kupferdrähte zum Gesamtkupfergehalt (bestimmt mittels Röntgenfluoreszenzanalyse) ergibt, dass ca. 50 % des Gesamtkupfers auf Drähte zurückzuführen ist.

Die Kupferdrähte sind durch den Kontakt mit dem Rauchgas, das bei der Verbrennung entsteht, korrodiert (dunkle Stellen Abbildung 28). Bei der Abkühlung im Aschebett können sich an der Oberfläche der Drähte u. a. Feldspäte, Calcit und Melilith bilden (helle Stellen in Abbildung 28).

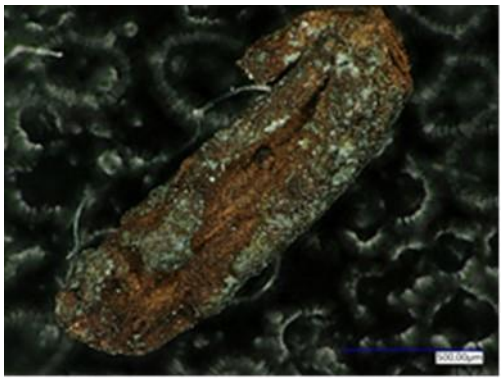

Abbildung 28 Lichtmikroskop Cu-Draht, 200-fache Vergrößerung

Der Querschnitt eines Cu-Drahtes zeigt, dass die Korrosion an der Oberfläche der Cu-Drähte stattfindet (Abbildung 29, dunkler Rand), der Kern ist metallisches Kupfer im BSE-Bild (Abbildung 29) hellleuchtend.

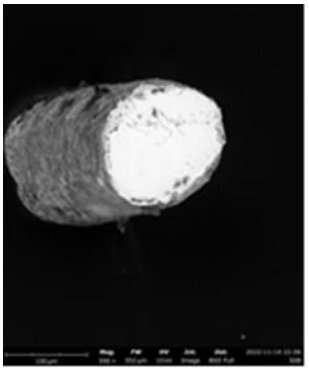

Abbildung 29 REM-Bild, Querschnitt eines Cu-Drahtes

Mittels rasterelektronischer, mikrochemischer Untersuchungen wurde analysiert in welchen Oxidationsstufen Kupfer vorliegt. Abbildung 30 (rechts) zeigt die lichtmikroskopische Aufnahme eines Cu-Drahtes bei 100-facher Vergrößerung. Bei den schwarzen Flecken handelt es sich um Kohlenstoff, was der Präparation geschuldet ist.

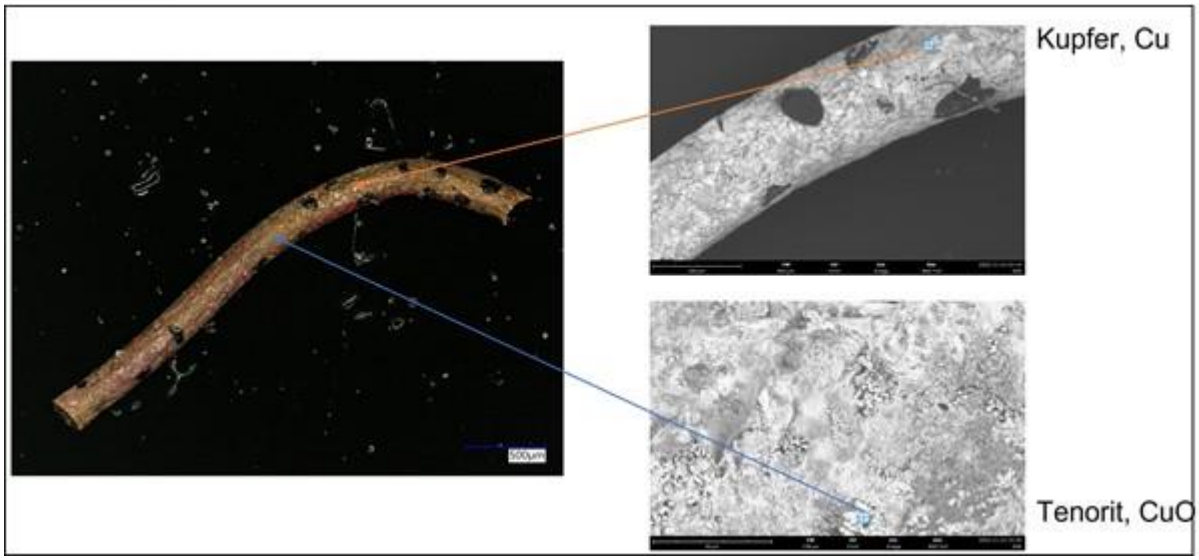

Abbildung 30 Lichtmikroskop Cu-Draht 100x; rechts: REM-BSE mit Cu metallisch (oben), REM-BSE mit Tenorit Ausblühungen

An der Oberfläche der Cu-Drähte (Abbildung 30, oben) sind anhand der unterschiedlichen hell-dunkel Abstufungen die Cu-führenden Phasen gut zu erkennen. Im BSE-Bild erscheinen die Cu-Phasen aufgrund ihres Atomgewichts heller. Bei Vergrößerung des Bildausschnittes (Abbildung 30 rechts unten) sind Ausblühungen an der Oberfläche der Kupferdrähte zu erkennen. Bei diesen Ausblühungen handelt es sich um Tenorit CuO. An einigen Stellen konnte auch Cuprit Cu_2O analysiert werden. Kupfer liegt somit in den Drähten elementar und in den Oxidationsstufen I und II vor.

Die Korrosionsschicht, die sich während der Verbrennung und der Abkühlung an der Oberfläche der Cu-Drähte bildet, lässt sich durch Behandlung mit verdünnter Salzsäure entfernen.

Die Müllverbrennungsasche Q1, wurde nach dem CUTEC-Ultraschallverfahren hergestellt und anschließende die Glasanteile der Asche bei einer externen Firma weitestgehend abgetrennt. An 19 magnetischen und 4 nicht magnetischen Schmelzpartikeln dieser Asche wurden semiquantitative Analysen durchgeführt.

Abbildung 31 exemplarisch 5 magnetische Schmelzpartikel aus Q1, 30-fach vergrößert

In Abbildung 31 zeigt exemplarisch 5 magnetische Schmelzpartikel aus Asche Q1. Die Schmelzpartikel wurden gemahlen und mit Höchstwachs C zu Pellets gepresst. Die Ergebnisse der Analysen sind in Abbildung 32 - Abbildung 34 dargestellt. MVB gibt immer den Ausgangswert der Asche an, gekennzeichnet durch die rote Linie.

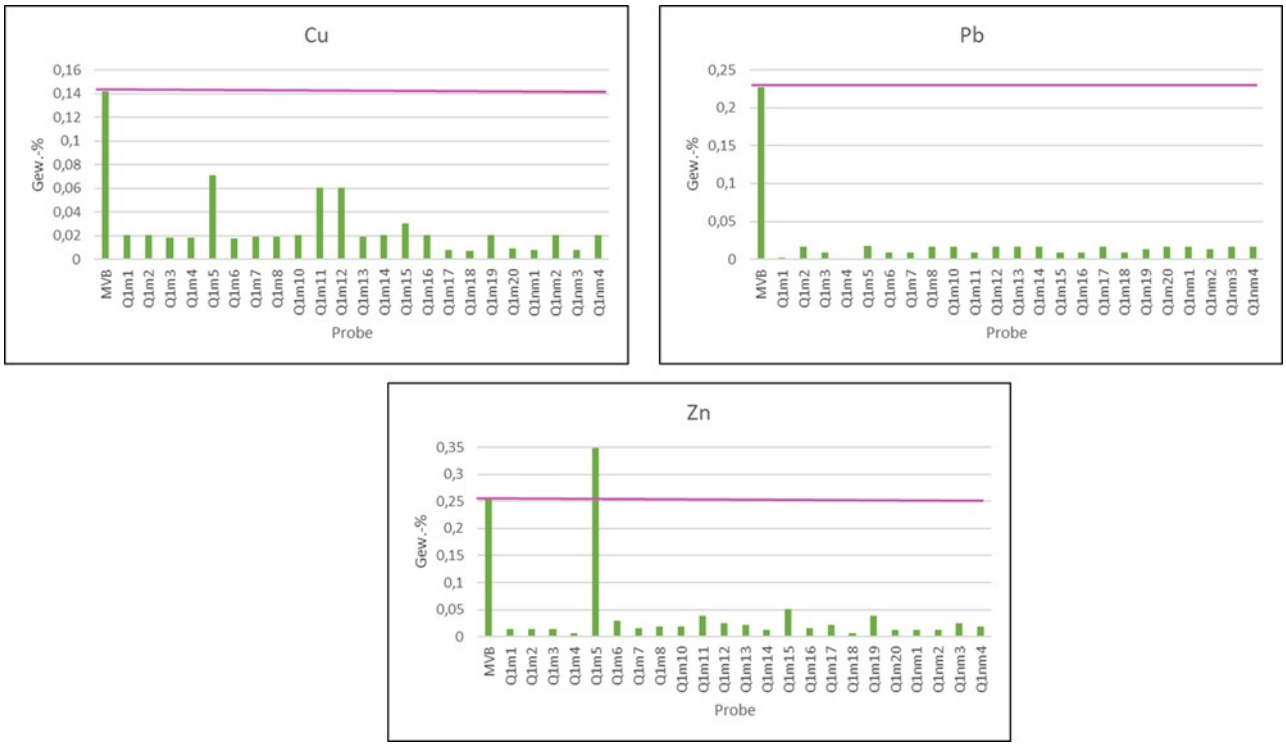

Abbildung 32 Gehalte an Cu, Pb und Zn, Ausgangs-MVB, magnetischen Schmelzpartikel (Q1m1-Q1m20), nicht magnetischen Schmelzpartikel (Q1nm1 – Q1nm4)

Die Cu-Werte liegen für alle Schmelzpartikel unter dem, des Ausgangswertes. Gleiches gilt für Pb und mit einer Ausnahme für Zn (Abbildung 32). In die Schmelzpartikel werden Cu, Pb und Zn nicht bevorzugt eingebaut.

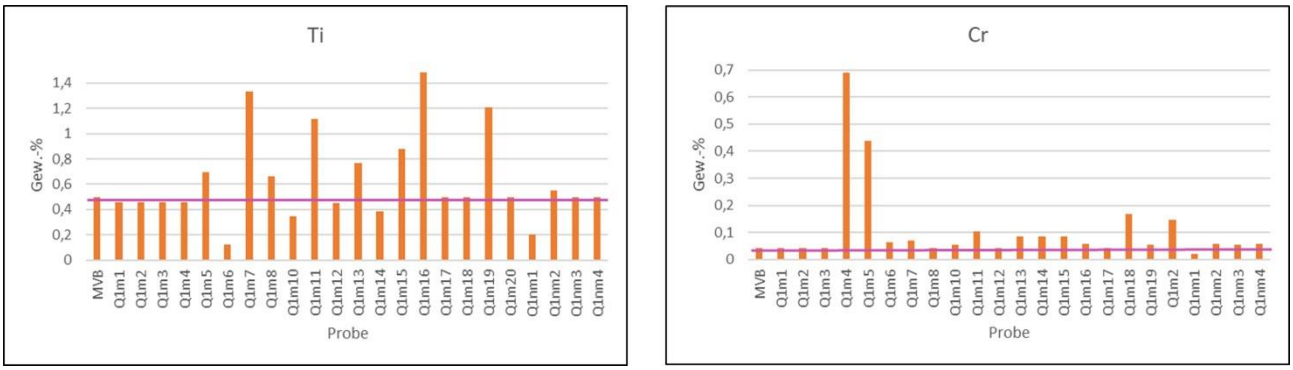

Abbildung 33 Gehalte an Ti und Cr, Ausgangs-MVB, magnetischen Schmelzpartikel (Q1m1-Q1m20), nicht magnetischen Schmelzpartikel (Q1nm1 – Q1nm4)

Die Werte für Ti liegen bei 8 Schmelzpartikeln z.T. deutlich über dem Ausgangswert, 4 Schmelzpartikel liegen unter dem Ausganswert und 9 Schmelzpartikel haben annähernd den gleichen Wert. Die Werte für Cr liegen bei 2 Schmelzpartikeln deutlich über dem Ausgangswert, 9 haben leicht erhöhte Werte gegenüber dem Ausgangswert und 12 Schmelzpartikel haben annähernd den gleichen Wert (Abbildung 33).

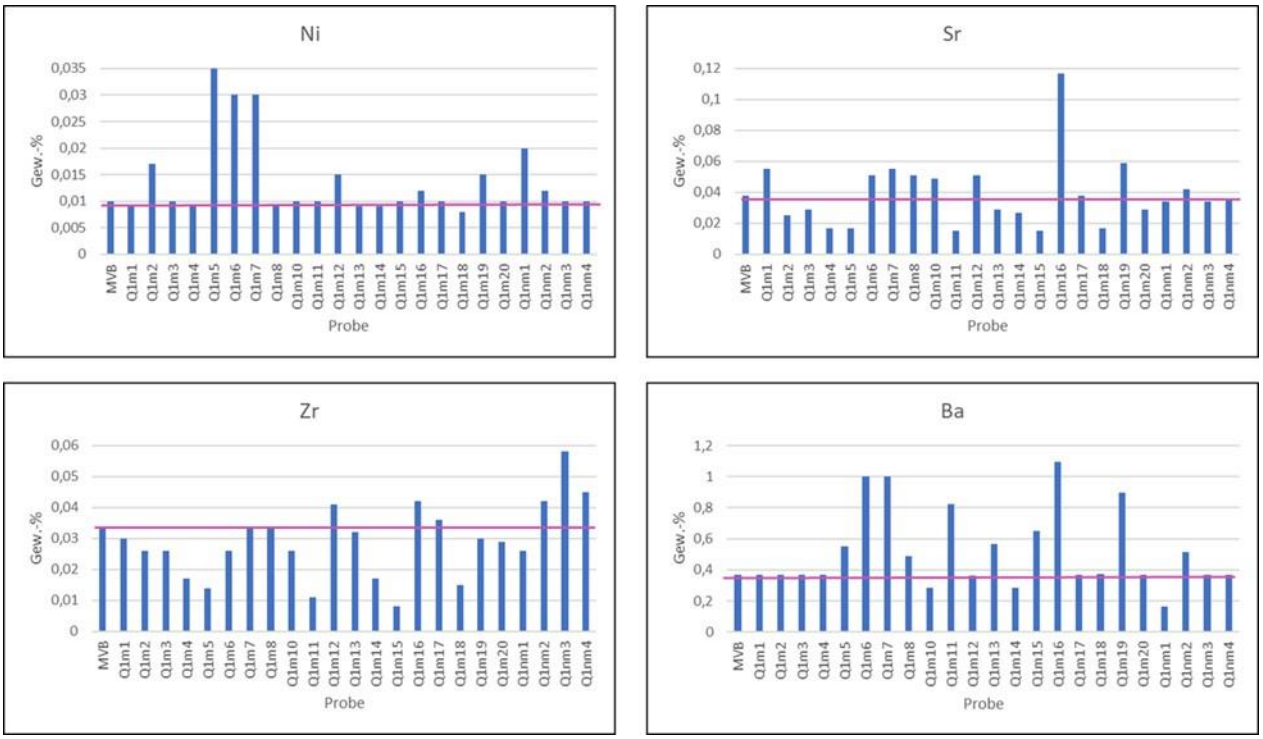

Abbildung 34 Gehalte an Ni, Sr, Zr und Ba, Ausgangs-MVB, magnetischen Schmelzpartikel (Q1m1-Q1m20), nicht magnetischen Schmelzpartikel (Q1nm1 – Q1nm4)

Bei Nickel liegen 9 Schmelzpartikel über dem Ausgangswert, 14 Schmelzpartikel haben annähern den gleichen Wert. Die Werte für Sr sind sehr schwankend. Es gibt 3 Schmelzpartikel die annähernd den gleichen Wert, wie die Ausgangsprobe haben. 9 Schmelzpartikel liegen darüber und 11 Schmelzpartikel liegen darunter. Bei den Zr-Werten liegen 5 Schmelzpartikel über dem Ausgangswert, 15 Schmelzpartikel unterhalb und 3 Schmelzpartikel haben annähern den gleichen Wert, wie die Ausgangsprobe. 3 Ba-Werte liegen unterhalb vom Ausgangswert, 10 liegen darüber und 10 Schmelzpartikel sind annähernd gleich mit dem Ausgangswert (Abbildung 34).

- tkMSS LiDonit, stabilisierte LD-Schlacke

Bei der LD- Schlacke handelt es sich um einfarbige, graue, homogene Körner. Mit zunehmender Größe sind deutliche Hohlräume und Poren in den einzelnen Körner zu erkennen (Abbildung 35).

Abbildung 35 stabilisierte LD-Schlacke 5/8

Die chemischen Hauptbestandteile von LiDonit zeigt Abbildung 36, oben links. In Abhängigkeit von der Körnung gibt es keine chemische Veränderung bei den Hauptelementen SiO_2, CaO und Fe_2O_3.

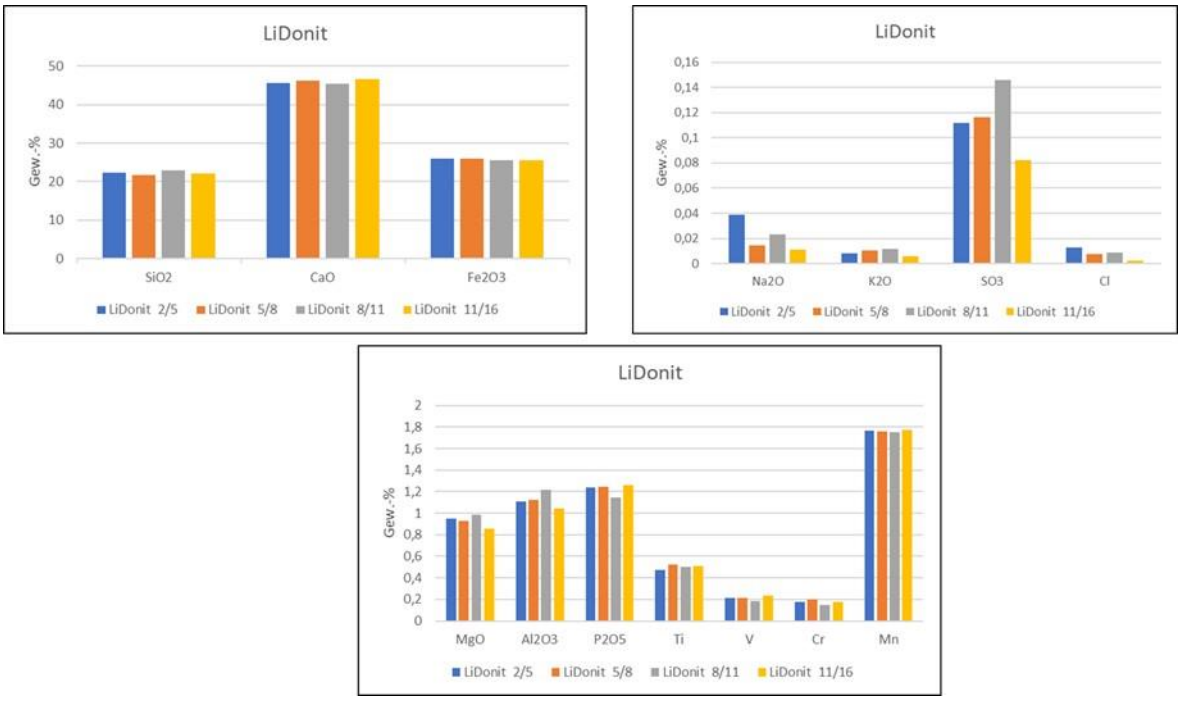

Abbildung 36 Chemischen Zusammensetzung LiDonit

Die Elemente Na, K, S und Cl sind bei der Körnung 11/16 am niedrigsten, bei Körnung 8/11 am höchsten (Abbildung 36, oben rechts). Die chemischen Gehalte der Elemente Mg, Al, P, Ti, V, Cr und Mn sind für alle Körnungen annähernd gleich. Abbildung 37 zeigt den Fe^{2+}-Gehalt in Abhängigkeit vom Glühverlust. Der Fe2+-Anteil des Gesamteisens nimmt mit größer werdender Korngröße zu. Bei Körnung von 2/5 mm beträgt der Fe2+-Anteil 10,58 % des Gesamteisens, bei Körung 11/16 mm beträgt der Fe2+-Anteil des Gesamteisens 12,02 %. Der Glühverlust (LOI) steigt mit größer werdender Korngröße von -0,41 % bei Körnung 2/5 auf -0,98 % bei Körnung 11/16 an.

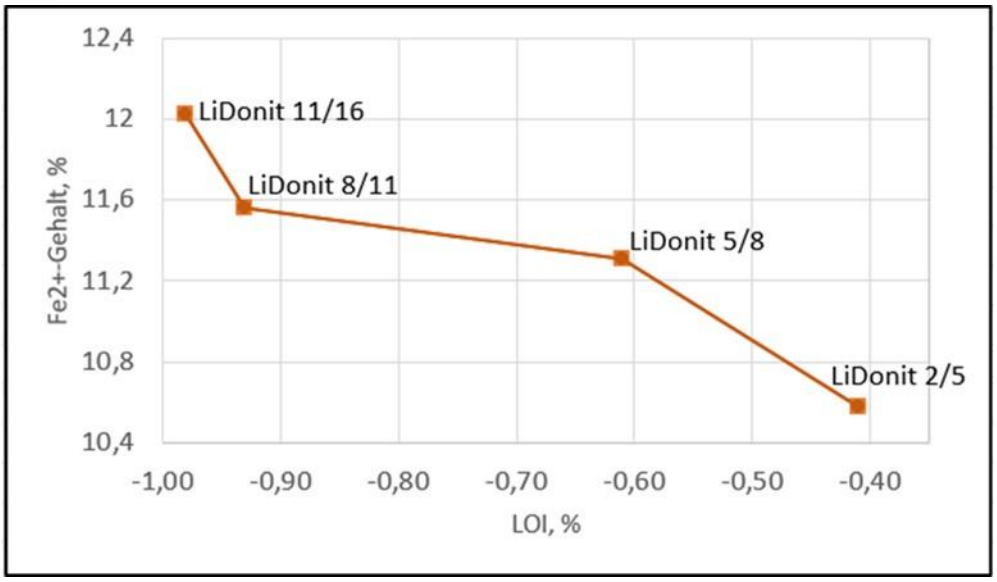

Abbildung 37 Fe^{2+}-Gehalt in Abhängigkeit vom Glühverlust

Röntgenographisch wurden die Phasen Larnit, Magnetit, Hematit und Quarz identifiziert.

- tkMSS Hochofenschlacke HOS

Bei der Hochofenschlacke handelt es sich um einfarbige, graue, homogene Körner. Mit zunehmender Korngröße sind deutliche Hohlräume und Poren in den einzelnen Körner zu erkennen (Abbildung 38).

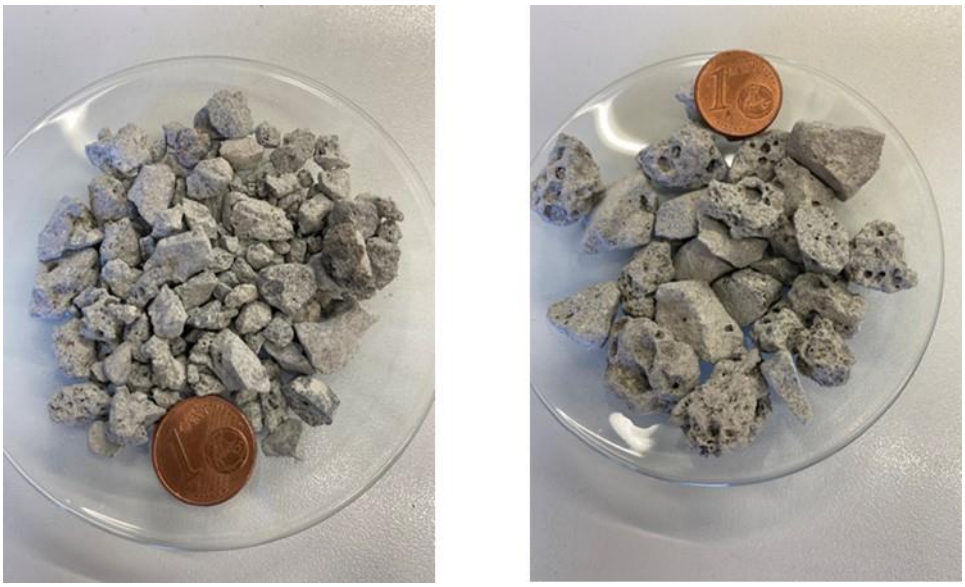

Abbildung 38 Hochofenschlacke HOS 2/8 (links) und HOS 8/15 (rechts)

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung HOS 2/8 und HOS 8/15

	HOS 2/8 Gew.-%	HOS8/15 Gew.-%
Na2O	0,23	0,28
MgO	4,38	4,42
Al2O3	8,94	9,18

SiO2	29,60	29,85
P2O5	0,26	0,24
SO3	2,70	2,73
K2O	0,40	0,42
CaO	47,51	46,59
Ti	0,51	0,54
V	0,03	0,02
Cr	0,03	0,04
Mn	0,50	0,61
Fe2O3	4,62	4,97
Sr	0,07	0,07
Zr	0,03	0,03
Ba	0,17	0,19

Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung HOS 2/8 und HOS 8/15 aufgeführt. Die chemischen Hauptbestandteile sind SiO_2, CaO, Al_2O_3, MgO und Fe_2O_3.

Der Fe2+-Anteil des Gesamteisens beträgt unabhängig von der Korngröße 2,5 %.

Röntgenographisch wurden die Phasen Ca-Silikat, Melilith, Merwinit nachgewiesen.

- tkMSS BaseLith, unbehandelte LD-Schlacke

Bei der unbehandelten LD-Schlacke handelt es sich um einfarbige, graue, homogene Körner. Mit zunehmender Größe sind deutliche Hohlräume und Poren in den einzelnen Körner zu erkennen. Abbildung 39 zeigt ein BaseLith Korn bei 100-facher Vergrößerung.

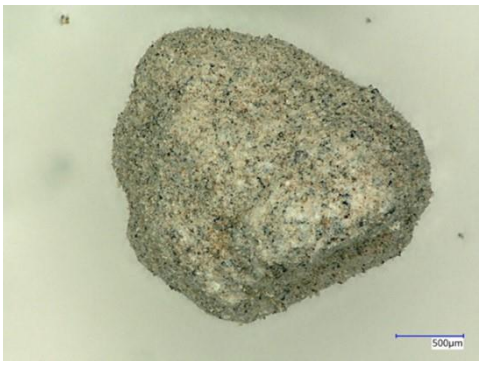

Abbildung 39 BaseLith Korn, 100-fache Vergrößerung

Die chemische Zusammensetzung ist in Tabelle 3 aufgeführt. Die chemischen Hauptbestandteile sind CaO, Fe_2O_3, SiO_2, Al_2O_3und MgO.

Der Fe^{2+} -Anteil des Gesamteisens beträgt 8,41 % bei BaseLith 2/8 und 12,37 % bei BaseLith 8/15.

Tabelle 3 Chemische Zusammensetzung BaseLith 2/8 und BaseLith 8/15

	BaseLith 2/8 Gew.-%	BaseLith 8/15 Gew.-%
Na2O	0,04	0,05
MgO	2,51	2,43
Al2O3	4,43	3,00
SiO2	11,33	11,88
P2O5	1,07	1,24
SO3	0,33	0,23
Cl	0,02	0,01
K2O	0,02	0,01
CaO	50,44	49,05
Ti	0,63	0,57
V	0,18	0,21
Cr	0,19	0,20
Mn	1,99	1,85
Fe2O3	26,76	29,22
Sr	0,02	0,02
Zr	0,02	0,01
Nb	0,02	0,02
Fe2+, %	8,41	12,37

Röntgenographisch wurden die Phasen Larnit, Fe-reicher Spinell und Kalk nachgewiesen.

- Meinert Mineralstoffe E-Ofenschlacke, Stahlwerk Riesa

Makroskopisch sind bei der E-Ofenschlacke noch Eisenpartikel zu erkennen, die beim Austrag der Schlacke aus dem Ofen mitgeschleppt wurden (Abbildung 40).

Abbildung 40 E-Ofenschlacke, wie angeliefert

Chemische Zusammensetzung: chemische Hauptbestandteile SiO_2 (13,5 Gew.-%), CaO (20 Gew.-%), Fe_2O_3 (40 Gew.-%), Al_2O_3 (10 Gew.-%); chemische Nebenbestandteile MgO (4,5 Gew.-%), Mn (5,7 Gew.-%), Cr (2,2 Gew.-%); Spurenelemente Na, S, Ti, V, Ba.

Der Fe^{2+} -Anteil des Gesamteisens nimmt mit größer werdender Korngröße zu. Bei Körnung von 0/2 mm beträgt der Fe^{2+} -Anteil 20,19 % des Gesamteisens, bei Körung 8/16 mm beträgt der Fe^{2+}-Anteil des Gesamteisens 25,86 %.

- tkMSS SEKS-Schlacke OX 2, Probennummer 0106123

SEKS-Schlacke

Die SEKS-Schlacke ist ein inhomogenes Material aus hellen und dunklen Partikeln mit magnetischen und nicht magnetischen Anteilen (Abbildung 41).

Abbildung 41 SGA-Schlacke 8/16

Chemische Zusammensetzung: chemische Hauptbestandteile SiO_2 (6 Gew.-%), CaO (37 Gew.-%), Fe_2O_3 (26 Gew.-%), Al_2O_3 (18 Gew.-%); chemische Nebenbestandteile MgO (7 Gew.-%), Mn (2 Gew.-%); Spurenelemente Na, S, Ti, V, Cr, Sr, Zr.

Die Körnungen 1/8 mm und 8/16 mm wurden bei IBP elektrodynamisch fragmentiert und jeweils in die Körnungen 0/1 mm und 1/2 mm gesiebt. Der Fe^{2+}-Anteil des Gesamteisens nimmt mit größer werdender Korngröße zu. Bei Körnung von 0/1 mm (fragmentiert aus Körnung 1/8 mm) beträgt der Fe^{2+}-Anteil 11,89 % vom Gesamteisen, bei Körung 1/2 mm (fragmentiert aus Körnung 1/8 mm) beträgt der Fe^{2+}-Anteil des Gesamteisens 14,72 %.

Bei Körnung von 0/1 mm (fragmentiert aus Körnung 8/16 mm) beträgt der Fe^{2+}-Anteil 13,85 % vom Gesamteisen, bei Körung 1/2 mm (fragmentiert aus Körnung 8/16 mm) beträgt der Fe^{2+}-Anteil des Gesamteisens 18,01 %.

Aufgrund der Inhomogenität des Materials wurden für die röntgenographische Phasenidentifizierung einzelne Körner unterschiedlichen Aussehens separiert und geröntgt.

Heller porenreicher Partikel, nicht magnetisch: Periklas, Mayenit, Wollastonit, Merwinit, Gehlenit.

Dunkler Partikel, nicht magnetisch: Hausmannite, Wüstit, Spinell, Brownmillerit, Hematit, Merwinit, Lime, Goehtit, Gips.

Dunkelgrauer Partikel, mit Hohlräumen, nicht magnetisch: Wüstit, Perowskit, Mayenit, Brownmillerit, Goehtit

Schwarzen, mattglänzender Partikel, nicht magnetisch: Wüstit, Perowskit, Brownmillerit

Hellgrauer Partikel, magnetisch: Skrebrodolskit, Hematit, Magnetit, Fayalit

1.3.6 SRH

Die herkömmlich aufbereitete und carbonatisierte HMVA wurde beim CUTEC zur Identifikation und Untersuchung von Verfahren zur Schad- und Störstoffabreicherung genutzt. Als das erfolgversprechendste Verfahren wurde schlussendlich eine Reinigungsstraße mit Ultraschallbad genutzt. Das gereinigte Material aus diesem Verfahren wurde im Projektverlauf für die Eluatuntersuchungen und Herstellung von Pflastersteinen genutzt.

Die frisch ausgetragene HMVA wurde mittels des innovativen EOP-Watech (BMBF-Projekttitel, FKZ 033RK056A) -Verfahren gereinigt. Daraus wurden insgesamt ca. 70 kg Material in fünf verschiedenen Körnungen (1/2, 2/4, 4/8, 8/12,5, 12,5/16 mm) für die weitere Verwendung hergestellt. Da das EOP-Watech Verfahren eine Technikumsanlage ist und einen hohen manuellen Aufwand erfordert, konnten im Projekt keine weiteren Mengen mehr mittels dieses Verfahrens hergestellt werden. Dadurch war die Herstellung von Pflastersteinen mit diesem Material im industriellen Maßstab nicht möglich.

Folgende Materialien wurden auf die Auslaugbarkeit (Eluatverhalten) untersucht:

Die Ausgangsmaterialien:

- Material aus EOP-Watech-Verfahren (Körnung 2/8)
- Material aus CUTEC-Verfahren (Körnung 2/8)
- Gebrochenes Überkorn aus CUTEC-Verfahren (Körnung 2/8)

Außerdem die aus den oben genannten Ausgangsmaterialien hergestellten und gebrochenen Pflastersteine, Körnung 2/8.

Um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten sowie auf alle möglichen Fragen aus Sicht des Boden- und Grundwasserschutzes sowie der Deponieverordnung Antworten geben zu können, wurden alle Materialien mittels der Verfahren der Schüttel- und Säuleneluate untersucht. Die ungebrochenen Steine wurden zudem mittels des Trogverfahrens beprobt. Die Schütteleluate wurden über die Technische Universität Hamburg durchgeführt, die Säuleneluate und das Trogverfahren über das Labor GEOTAIX, die Vergabe der Laboraufträge erfolgte unter Berücksichtigung des geltenden öffentlichen Vergaberechtes.

Die Ergebnisse der Eluatuntersuchung zeigen, dass die aufbereiteten Materialien die Grenzwerte der EBV HMVA-2 in jedem Fall einhalten. Punktuell werden die Grenzwerte HMVA-1 überschritten. Kritische Stoffe sind Antimon, Chlorid, Chrom, Kupfer und Molybdän, die die Grenzwerte in einzelnen Untersuchungen überschreitet, so dass demnach eine Zuordnung als HMVA-2 möglich wäre. Bemerkenswert ist, dass das Material aus den Pflastersteinen bzw. gebrochenen Pflastersteinen nur sehr geringe Mobilitäten aufzeigt und als RC-Gesteinskörnung verwendet werden kann.

1.3.7 tkMSS

Die beprobten und ausgewählten Eisenhüttenschlacken stammten aus der aktuellen Produktion. Bei diesen Materialien handelt es sich um güteüberwachte, industrielle Nebenprodukte, die überwiegend im Verkehrswegebau als Baustoffgemisch oder als Lieferkörnung eingesetzt werden. Die Umweltverträglichkeit wurde gemäß Ersatzbaustoffverordnung bestimmt und den Projektpartnern zur Verfügung gestellt. Die Einstufung gemäß Ersatzbaustoffverordnung erfolgte anhand der Materialwerten für Hochofenstückschlacke und Stahlwerksschlacke: Hochofenstückschlacke (HOS-1), LiDonit (SWS-1), BaseLith (SWS-1) sowie Elektroofenschlacke (SWS-2). Die Untersuchungen fanden jeweils an der Prüfkörnung 0/22,4 mm statt.

1.3.8 Fazit AP 2

Die Aufbereitung und Charakterisierung der Materialien haben gezeigt, dass verschiedene Verfahren und Analysen erforderlich sind, um die Eignung von Aschen und Schlacken für den Einsatz in Baustoffen zu prüfen. Die Ergebnisse der durchgeführten Analysen belegen, dass die untersuchten Materialien Potenzial haben, die Sieblinien herkömmlicher Rohstoffe nachzubilden. Trotz einiger Herausforderungen, wie der Unzulänglichkeit einfacher Waschverfahren, bieten die durchgeführten Analysen eine solide Basis für die weitere Verwendung der aufbereiteten Materialien. Die Optimierung der Verfahren bleibt jedoch entscheidend, um die Materialqualität zu verbessern und eine wirtschaftliche Nutzung sicherzustellen.

1.4 Arbeitspaket 3: Herstellung von Baustoffen im Labor

1.4.1 IBP

Im Jahr 2021 wurde mit der Herstellung erster Probekörper begonnen. Dafür wurde vom Projektpartner bvw eine Apparatur zur manuellen Herstellung von Probekörpern zur Verfügung gestellt, welche eine Verdichtung der Betonmischungen ähnlich wie in der industriellen Produktion ermöglicht. Zunächst wurden einige Vorversuche durchgeführt, um die Handhabung des Gerätes einerseits und die Materialeigenschaften andererseits zu verstehen. Bis Ende des Jahres wurde die Herstellung der Prüfkörper und die anschließende Prüfung der Spaltzugfestigkeit (angelehnt an DIN 12390-6) soweit optimiert und vorbereitet (siehe Abbildung 42). Die Bearbeitung der weiteren Probekörper und die Arbeiten im AP 4 wurden im Jahr 2022 begonnen.

Abbildung 42 Eindrücke von der Probekörperherstellung im Labor des Fraunhofer IBP.

Die Herstellung von Pflastersteinproben wurde 2022 fortgesetzt. Die Handhabung des Proctors, der im Jahr 2021 von der bvw zur Verfügung gestellt wurde, wurde vollständig verstanden und auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse wurde eine Bedienungsanleitung erstellt. Diese Anleitung unterstützte die identische Nutzung des Geräts, wodurch die Toleranzen der Bedingungen minimiert und die Reproduzierbarkeit der Proben verbessert wurden.

Außerdem wurden 13 verschiedene Mischungsdesigns mit unterschiedlichen Mengen an HOS- und LiDonit-Schlacken festgelegt und so optimiert, dass für jede Mischung die höchste Spaltzugfestigkeit erreicht wurde. Es wurden verschiedene Versuche durchgeführt, um den Wassergehalt für jede Mischung einzustellen. Zu diesem Zweck wurden verschiedene Methoden getestet, darunter das Vorbefeuchten der Schlacken und die Verwendung von zusätzlichem Mischwasser. Schließlich wurde die Verwendung von 10 % zusätzlichem Wasser als optimaler Mischwassergehalt für alle Mischungen ermittelt. Abbildung 43 zeigt eine Proctorprobe einer Betonmischung mit 50 % Ersatz der groben Gesteinskörnung (2/8 mm) durch HOS.

Abbildung 43 Proctor-Probe einer Betonrezeptur mit 50% Substitution der groben Zuschlagskörnung (2/8 mm) durch Hochofenschlacke.

Für alle Proben wurden die gleichen Lagerungsbedingungen wie beim Projektpartner bvw angewandt. Da der Projektpartner bvw in der Regel eine Lagerungsbedingung mit einer Luftfeuchtigkeit von 95 % und einer Temperatur von 20 °C verwendet, war es notwendig, am IBP ähnliche Lagerungsbedingungen zu schaffen. Zu diesem Zweck wurden die Proben in Klimacontainern oberhalb der Wasseroberfläche gelagert (Abbildung 44). Die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit des Behälters werden aufgezeichnet, indem ein Datenlogger in dem Container neben den Proben platziert wird. Die Durchschnittswerte von Luftfeuchtigkeit und Temperatur liegen nahe an den gewünschten Werten, d. h. einer Luftfeuchtigkeit von 95 % und einer Temperatur von 20 °C.

Abbildung 44 Lagerungsbedingungen der Proben im Klimacontainer.

Im Jahr 2023 wurde Hausmüllverbrennungsasche (HMV-Asche) als sekundäre Gesteinskörnung in der Pflastersteinmischung verwendet. Zwei Typen von HMV-Aschen, „CUTEC Q1“ und „CUTEC Q2“, wurden vom Projektpartner CUTEC (Clausthaler Umwelttechnik Forschungszentrum) zur Verfügung gestellt. „CUTEC Q1“ und „CUTEQ Q2“ wurden durch die

Verarbeitung grober Fraktionen (> 8 mm) bzw. durch das Sieben der Fraktion 2/8 mm gewonnen.

Die genaue Aufbereitungsstrategie für die HMV-Aschen ist im Bericht von CUTEC dargestellt. Es wurden zwei verschiedene Mischungen hergestellt, bei denen 30 Gew.-% primäre Kiese (2/8) durch „CUTEC Q1" bzw. „Q2" ersetzt wurden. Zusätzlich wurde für die HMV-Asche aus dem EOP-WATECH Verfahren eine Testmischung hergestellt. Der Herstellungsprozess, die Lagerungsbedingungen und alle anderen Schritte waren identisch zu den mit LiDonit und HOS hergestellten Proben. Abbildung 45 zeigt „Proctor-Proben" aus den vorgenannten Mischungen, die für die Bestimmung der Spaltzugfestigkeiten hergestellt wurden. Da im weiteren Verlauf des Projektes bekannt wurde, dass die HMV-Aschen aus dem EOP-WATECH Verfahren nicht in ausreichender Menge für die industrielle Produktion von Pflastersteinen zu Verfügung stehen, wurde diese Asche in weiteren Rezepturentwicklungen nicht berücksichtigt.

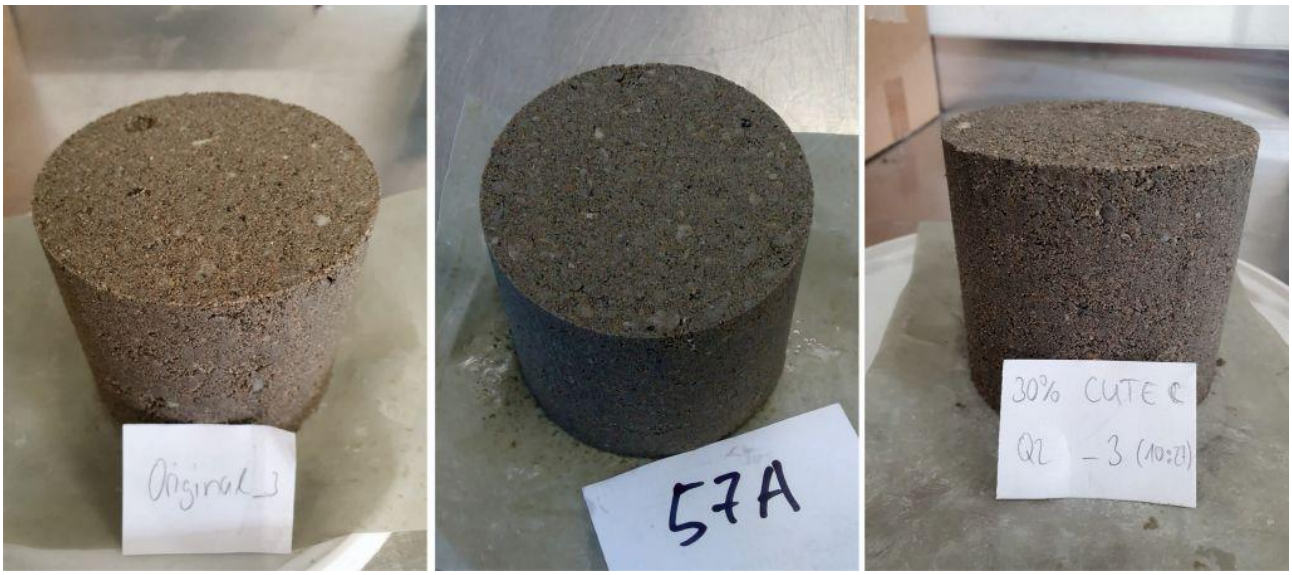

Abbildung 45: Beton-Proctor aus der Originalmischung (links), 30% CUTECQ1 (Mitte), und 30% CUTECQ2 (rechts).

1.4.2 bvw

bvw hat dem Projektpartner IBP Laborequipment zur Verfügung gestellt. Mit dem sogenannten Proctor lassen sich reproduzierbare Prüfkörper nach klar definierter Vorgehensweise erstellen. Die daraus resultierenden Laborergebnisse sind somit eindeutig der Betonrezeptur zuzuordnen. Die Laborversuche wurden in enger Abstimmung von bvw und dem IBP durchgeführt. Die Gegebenheiten der Fertigung bei bvw wurden auf die Laborumgebung beim IBP übertragen, insbesondere die klimatischen Bedingungen beim Aushärteprozess wurden nachgebildet. Auch wurde die Betonfeuchte detailliert abgestimmt und optimiert. Besondere Kriterien waren hier die Eigenfeuchte der verwendeten Rohstoffe und die Menge an Zugabewasser. bvw hat wiederholt die notwendigen Rohstoffe (u.a. Zement, Füller, Sand, Kies) für Laborversuche zur Verfügung gestellt. bvw hat im eigenen Labor Betonprobewürfel mit Lidonit für die Fertigung eines Schachtunterteils hergestellt (Abbildung 46). Die Laborrezeptur wurde von bvw erstellt und anschließend auf den industriellen Maßstab übertragen.

Abbildung 46: Probekörper zur Rezepturevaluierung des Schachtbauteils

1.4.3 CUTEC

Es wurden aufbereitete Aschen für die Baustoffherstellung im Technikumsmaßstab beim Partner IBP bereitgestellt. Am CUTEC Forschungszentrum wurden keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.4.4 KM

Bei KM wurden im Rahmen des AP 3 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.4.5 LMU

An der LMU wurden im Rahmen des AP 3 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.4.6 SRH

Bei SRH wurden im Rahmen des AP 3 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.4.7 tkMSS

tkMSS hat die Projektpartner mit seiner fachlichen Expertise im Bereich der Bearbeitung und Verwendung von Eisenhüttenschlacken unterstützt. Zusätzlich wurden Ergebnisse aus der werkseigenen Produktionskontrolle zur Verfügung gestellt.

1.4.8 Fazit AP 3

Im Arbeitspaket 3 wurde die Herstellung innovativer Baustoffe im Labor erfolgreich vorangetrieben, indem verschiedene Materialien und Techniken genutzt wurden. Die Zusammenarbeit zwischen den Partnern, insbesondere zwischen dem Fraunhofer IBP und bvw, ermöglichte die Entwicklung von 13 Mischungsdesigns und die Verwendung von sekundären Gesteinskörnungen.

1.5 Arbeitspaket 4: Prüfung der hergestellten Bauprodukte

1.5.1 IBP

Die Spaltzugfestigkeiten wurden nach 14 Tagen Aushärtung unter den oben genannten Bedingungen und nach DIN EN 1338 gemessen. Das Detail der Messung wurde jedoch in Absprache mit dem jeweiligen Projektpartner gewählt. Die Spaltzugfestigkeitsprüfung wurde mit einer FORM+TEST (Alpha 3-3000 S) Maschine mit einer Belastungsrate von (0,05 ± 0,01) MPa / s durchgeführt. Die entsprechenden Lastverteilungsstreifen waren 15 mm breit, 4 mm dick und 35 mm lang. Je Messung wurde ein neuer Streifen verwendet. Abbildung 47 zeigt die Spaltzugfestigkeit von allen Proben. In dieser Abbildung stehen 50LiD0/2 und 50HOS0/2 für die Pflasterbetonmischung, bei der 50 Gew.-% des Sandes durch LiDonit bzw. HOS ersetzt wurden. Die anderen Mischungen wurden auf die gleiche Weise bezeichnet.

Wie zu beobachten ist, wiesen die meisten der schlackenhaltigen Proben im Vergleich zur Originalrezeptur eine nahezu gleiche oder sogar höhere Spaltzugfestigkeit auf. Die Probe, bei der der gesamte Kies und Sand (100 Gew.-%) durch LiDonit 0/8-Schlacke ersetzt wurde, erreichte die höchste Festigkeit. Einige Proben, die HOS-Schlacke enthielten, z. B. die Mischung 100HOS2/8, wiesen jedoch ebenfalls eine hohe Festigkeit auf. Dies bedeutet, dass eine vergleichbare Spaltzugfestigkeit wie bei der Referenzprobe erreicht werden kann, wenn Kies und Sand im Pflasterbeton durch LiDonit- und HOS-Schlacken ersetzt wurden. Die Pflastersteinproben, bei denen 30 Gew.-% Kies durch „CUTEC Q1“ ersetzt wurden, zeigten eine Spaltzugfestigkeit von 88 % der Festigkeit der Originalmischung. Bei der Mischung mit „CUTEC Q2“ war dieser Wert etwa 61 %. Die höchsten Werte erzielten die Proben mit HMV-Asche aus dem EOP-WATECH Verfahren, welche 94% der Festigkeit der Originalmischung erreichten. Dabei muss allerdings einschränkend gesagt werden, dass der Anteil an HMV-Asche bei diesen Proben noch bei 17% lag, was in Anlehnung an die zunächst beim Partner bvw geplante Rezeptur festgelegt wurde.

Generell zeigten Pflastersteine, die mit LiDonit- und HOS-Schlacken hergestellt wurden, eine höhere Spaltzugfestigkeit als solche, die mit HMV-Asche hergestellt wurden. Bei mehreren Proben mit Schlacken wurden höhere Spaltzugfestigkeiten als bei der Originalrezeptur erzielt. Die Spaltzugfestigkeiten von Pflastersteinen mit HMV-Asche waren jedoch bei allen Mischungen niedriger als die der Originalprobe.

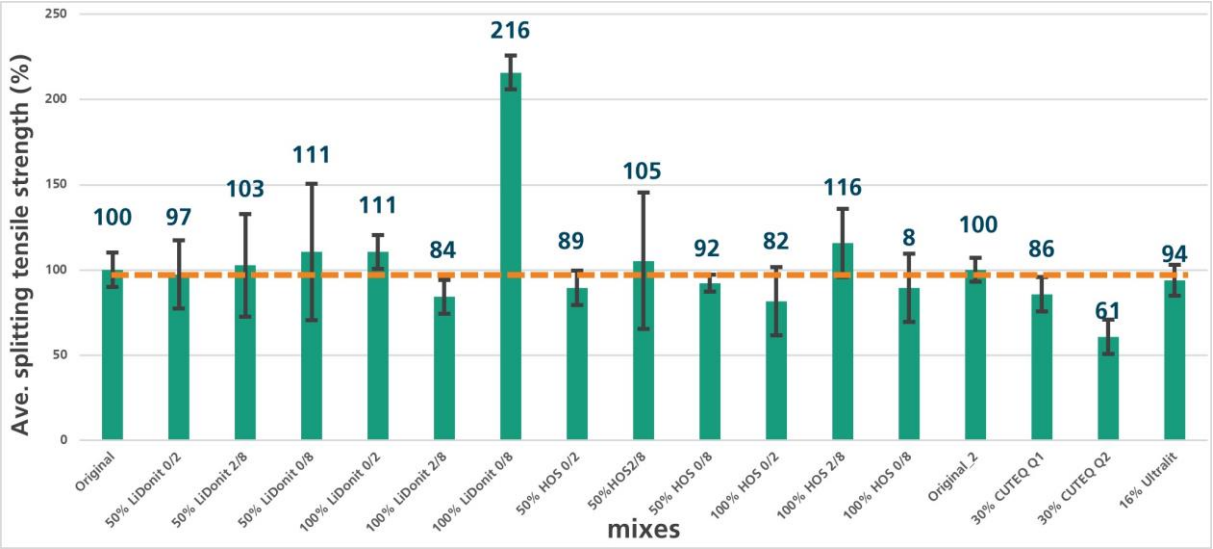

Abbildung 47 Spaltzugfestigkeit von allen Proben nach 14 Tagen.

1.5.2 bvw

bvw hat vom IBP zur Verfügung gestellte Prüfkörper im eigenen Labor untersucht und Rohdichten und Spaltzugfestigkeiten ermittelt und kommt hier zu denselben Ergebnissen wie der Projektpartner IBP. Zuvor wurden gemeinsam die labortechnischen Vorgehensweisen und Prüfungsmethoden, insbesondere die Spaltzugfestigkeitsprüfung, abgestimmt und die Werte gemäß der DIN EN 1338 kommuniziert. Die Rezepturen mit den besten Ergebnissen wurden dann für die Herstellung im industriellen Maßstab ausgewählt. bvw hat die im eigenen Labor hergestellten Betonprobewürfel nach 14 und 28 Tagen auf Druckfestigkeit überprüft. Die Probekörper haben die Anforderungen der DIN EN 12390-3 wie vorgeschrieben nach 28 Tagen erfüllt. Ein zugehöriges Prüfprotokoll ist in Abbildung 48 gezeigt.

Prüfprotokoll LiDonit

Herstelltag: 28.05.2024 **Prüftag Probe 1:** 11.06.2024 **Prüfalter Probe 1:** 14 Tage
Prüfalter Probe 2 & 3: 25.06.2024 **Prüfalter Probe 2 & 3:** 28 Tage

Rezepturnummer:

Rezeptbezeichnung:

Prüfergebnisse:

Probenummer	Länge mm	Breite mm	Höhe mm	Gewicht kg	Rohdichte kg/dm³	Bruchlast KN	Druckfestigkeit $f_{c,dry}$ N/mm²
1	150	150	150	8,948	2,651	1155,13	47,23
2	150	150	150	8,873	2,629	1243,74	50,86
3	150	150	150	8,927	2,645	1329,42	54,36
Mittelwert	150	150	150	8,916	2,642		50,82

Abbildung 48: exemplarisches Protokoll zur Prüfung der Druckfestigkeiten einer LiDonit-haltigen Probe

1.5.3 CUTEC

Es wurden aufbereitete Aschen für die Baustoffherstellung im Technikumsmaßstab beim Partner IBP bereitgestellt. Am CUTEC Forschungszentrum wurden keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.5.4 KM

Bei KM wurden im Rahmen des AP 4 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.5.5 LMU

An der LMU wurden im Rahmen des AP 4 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.5.6 SRH

Bei SRH wurden im Rahmen des AP 4 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.5.7 tkMSS

Bei tkMSS wurden im Rahmen des AP 4 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.5.8 Fazit AP 4

Die Prüfungen der hergestellten Bauprodukte zeigen, dass die Verwendung von LiDonit- und HOS-Schlacken die Festigkeit der Pflastersteine verbessert oder vergleichbar mit konventionellen Materialien ist. Auch aufbereitete HMV-Asche kann anteilig primäre Gesteinskörnung ersetzen, ohne eine negative Beeinflussung der Pflastersteine zu initiieren.

1.6 Arbeitspaket 5: Umsetzung im industriellen Maßstab

1.6.1 IBP

Das Fraunhofer IBP hat dem Industriepartner bvw die entwickelten Rezepturen aus AP 4 zu Verfügung gestellt und war während der gesamten Laufzeit des Arbeitspaketes wissenschaftlicher Ansprechpartner.

1.6.2 bvw

Die Haupttätigkeit von bvw war die Fertigung der Pflastersteine und eines Schachtunterteils im industriellen Maßstab (siehe Abbildung 49). Hier wurde die komplette Umsetzung von bvw realisiert. Die Beschaffung der Schlacken und Aschen wurde von bvw koordiniert inklusive Eingangskontrolle und Einlagerung der verschiedenen Fraktionen in dafür bereitgestellte Lagerboxen. Die von bvw zuvor definierten und mit den Projektteilnehmern abgestimmten Betonrezepturen wurden digital in der Mischersteuerung je Artikel hinterlegt. Für die Pflastersteinfertigung wurde eine Auswahl von Betonrezepturen berücksichtigt, die im Labor von IBP die besten Ergebnisse erzielt haben. Es wurden an mehreren Produktionstagen Pflastersteine mit 50 % und 100 % HOS, mit 50 % und 100 % Lidonit (Schlacken) und Pflastersteine mit 17 % HMV-Asche (CUTEC Q1/Q2) gefertigt. Die vorgesehenen Werkzeuge für die ausgewählten Produkte wurden vor Produktion in die Maschine A2 implementiert. Die Fertigungen wurden labor- und maschinentechnisch überwacht. Die Betonkonsistenz wurde begutachtet und die Betonfeuchtigkeit wurde durch das standardisierte Darrverfahren von bvw ermittelt und optimiert, ebenso wurden die Maschineneinstellungen, insbesondere die Betonbefüllung in der Maschine mit Menge, Weg, Zeit und die Rüttelstärke und – zeit definiert und optimiert. Es erfolgten Sichtkontrollen der gefertigten Produkte und Steinlagen hinter der Maschine A2 an der Frischseite. Folgende Kriterien sind in diesem Zusammenhang zu nennen: Beschaffenheit Vorsatz und Fase, Seitenschluss und Ausbildung der Abstandhalter im Bereich Kernbeton, Feuchtigkeit Vorsatz- und Kernbeton, Homogenität der beiden Betonmischungen im Stein. Zusätzlich wurden Wasseraufnahmen und Frischrohdichten durch direkte Entnahme von einzelnen Pflastersteinen vom Fertigungsbrett ermittelt. Die produzierten Pflastersteinlagen wurden zum Aushärten mittels Hubleiter und Schiebebühne in die Regalanlage der Klimakammer gefahren und am nächsten Werktag nach Aushärtung vor dem eigentlichen Abstapelvorgang erneut begutachtet. Auch wurden an dieser Position diverse Probesteine für die betriebsinterne Kontrolle im Labor entnommen. Die gefertigten Steinlagen wurden nach Begutachtung paketiert, umreift und auf dem Betriebsgelände an vordefinierten Standorten eingestapelt. Weitere Probesteine wurden dort für Projektteilnehmer entnommen. Die auf dem Betriebsgelände eingelagerten Pflastersteine unterliegen einer Langzeitüberwachung und werden in regelmäßigen Abständen kontrolliert und im Labor überprüft. Die Fertigung des Schachtunterteils mit Lidonit wurde nach denselben Kriterien wie bei der Herstellung der Pflastersteine durchgeführt. Nach definierter Betonrezeptur wurde die Schlacke (Lidonit) von dem Projektteilnehmer tkMSS zur Verfügung gestellt und entsprechend in der Fertigung mit den anderen Komponenten dosiert und vermischt. Die Fertigung wurde im gleichen Maße

überwacht und optimiert. Wie bereits zuvor im Labor bei IBP analysiert, erreichen die im industriellen Maßstab gefertigten Pflastersteine mit Aschen und Schlacken vergleichbare oder bessere Werte hinsichtlich der Rohdichte und der Spaltzugfestigkeiten wie die herkömmlich gefertigten Pflastersteine.

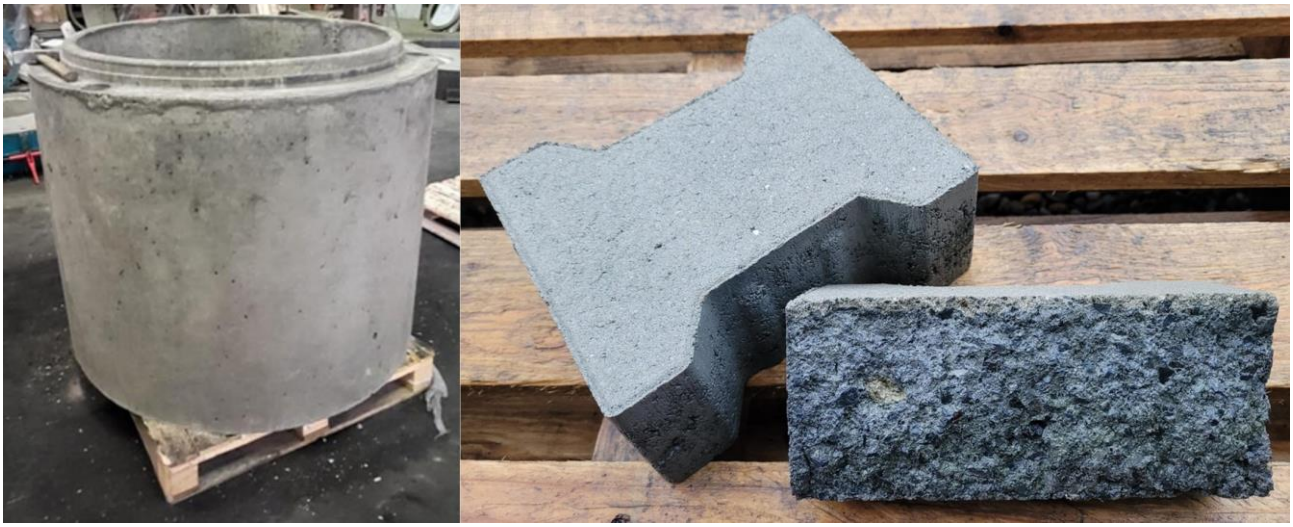

Abbildung 49: Schachtbauteil und Pflasterstein aus Produktion bei bvw

1.6.3 CUTEC

Es wurden aufbereitete Aschen für die Baustoffherstellung im Technikumsmaßstab beim Partner IBP bereitgestellt. Am CUTEC Forschungszentrum wurden keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.6.4 KM

Bei KM wurden im Rahmen des AP 5 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.6.5 LMU

An der LMU wurden im Rahmen des AP 5 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.6.6 SRH

Bei SRH wurden im Rahmen des AP 5 keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.6.7 tkMSS

tkMSS hat dem Projektpartner bvw Material zur Verfügung gestellt und war Ansprechpartner für fachliche Fragen.

1.6.8 Fazit AP 5

Die erfolgreiche Umsetzung im industriellen Maßstab durch bvw belegt die Anwendbarkeit der entwickelten Rezepturen und sichert die Qualität der Produkte.

1.7 Arbeitspaket 6: Recyclingfähigkeit der Bauprodukte

1.7.1 IBP

Die vom Fraunhofer IBP im Arbeitspaket 6 "Recyclingfähigkeit von Bauprodukten" geplanten Arbeiten wurden ebenfalls überwiegend im Jahr 2023 durchgeführt und im Jahr 2024 vollständig abgeschlossen. Im Jahr 2022 wurde die Rezyklierbarkeit von Pflastersteinen mit HOS und HMV-Asche und im Jahr 2023 die von Pflastersteinen mit LiDonit-Schlacke untersucht. Zu diesem Zweck stellte der industrielle Projektpartner bvw Hamminkeln dem IBP Pflastersteine aus LiDonit und HOS-Schlacke sowie HMV-Asche zur Verfügung. In Abbildung 50 ist der Prozess, mit dem die Verwertbarkeit, der mit Schlacken und Asche hergestellten Pflastersteine untersucht wurde, nachvollzogen.

Zunächst wurden die industriell hergestellten „BAUSEP-Pflastersteine“ mit einem Backenbrecher zerkleinert (Abbildung 50 a und b). Die zerkleinerten Partikel wurden anschließend gesiebt, um rezyklierte Gesteinskörnungen in der Fraktion 8/16 zu erhalten, wie er typischerweise in Betonformulierungen zur Anwendung kommt (Abbildung 50 c und d).

Die auf diese Weise gewonnene rezyklierte Gesteinskörnung wurden dann als Substitut für primären Kies 8/16 mm zu 50 Gew.-% in der Mischung des Normalbetons verwendet (Abbildung 50 e). Bei der Herstellung des Betons wurde darauf geachtet, dass die rheologischen Eigenschaften (insbesondere Ausbreitmaß, Fließfähigkeit) denen eines „Normalbetons“ entsprachen. Im letzten Schritt wurde die Druckfestigkeit der Betonwürfel nach 14 Tagen Aushärtung in Wasser gemessen (Abbildung 50 f).

Die Betonproben, die mit rezyklierten Gesteinskörnungen aus Pflastersteinen mit Schlacken und Asche hergestellt wurden, hatten eine vergleichbare Druckfestigkeit wie die von Normalbeton. Dies ist ein klarer Hinweis darauf, dass recyclierte (hier: gebrochene) Pflastersteine, die unter Verwendung von LiDonit- und HOS-Schlacken bzw. HMV-Asche hergestellt wurden aus bautechnischer Sicht ohne Einwand für die Herstellung von Beton geeignet sind. Somit konnte gezeigt werden, dass die hier untersuchten Schlacken aus der Eisen-/Stahlerzeugung und Aschen aus der Hausmüllverbrennung als kreislauffähige Baurohstoffe angesehen und genutzt werden können.

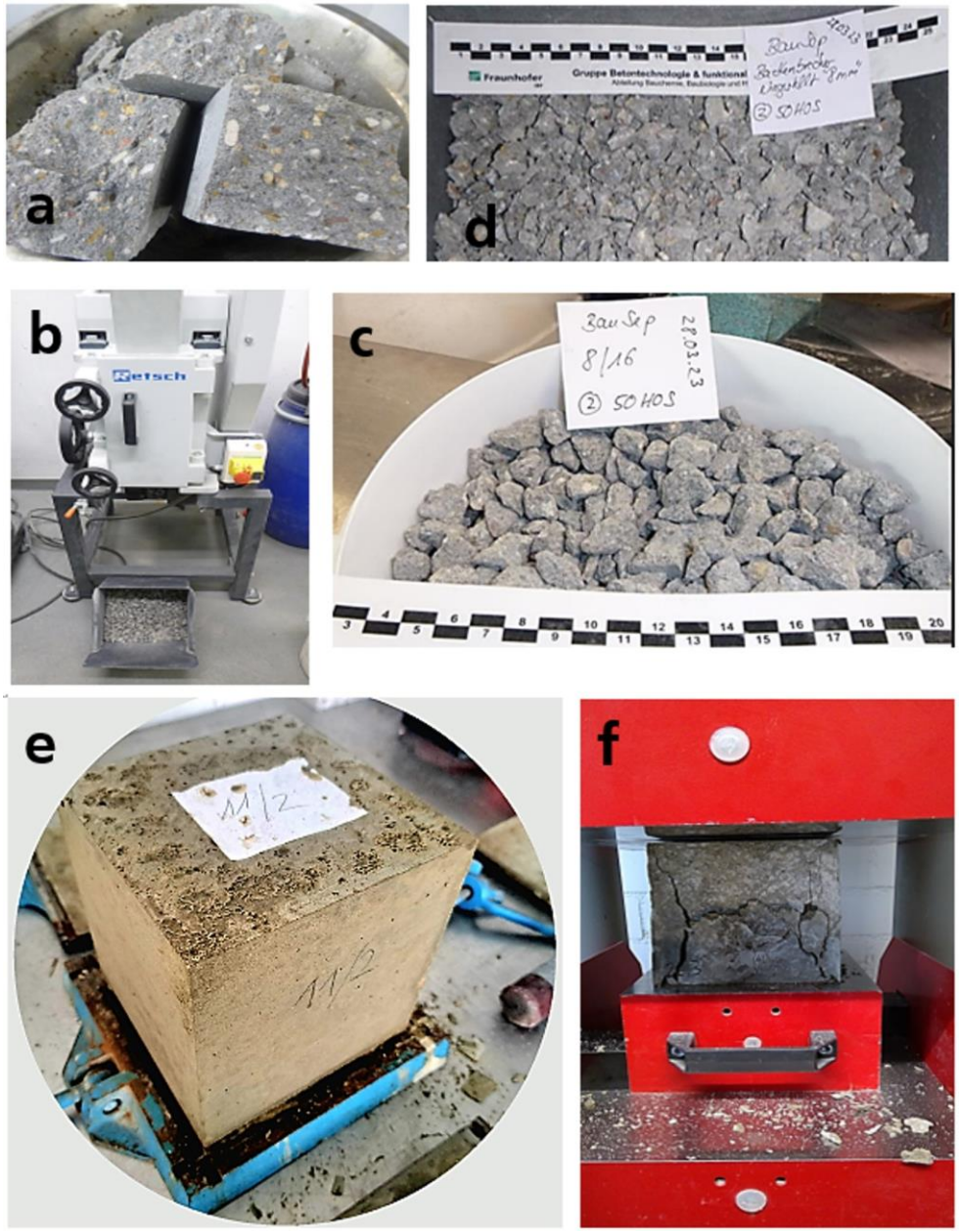

Abbildung 50: Verfahren zur Herstellung von Beton unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen, die aus Pflastersteinen mit Schlacken und Asche gewonnen wurden.

1.7.2 bvw

bvw hat die im industriellen Maßstab gefertigten Pflastersteine den Projektteilnehmern für weitere Prüfungen, insbesondere für die Ermittlung der Recyclingfähigkeit zur Verfügung gestellt. Es wurden diesbezüglich Pflastersteine mit unterschiedlichen Rezepturen und Anteilen von Schlacken und Aschen ausgewählt. Neben den Bauprodukten mit HOS- und Lidonit-Schlacken wurden auch Pflastersteine mit HMV-Aschen untersucht.

1.7.3 CUTEC

Es wurden aufbereitete Aschen für die Baustoffherstellung im Technikumsmaßstab beim Partner IBP bereitgestellt. Am CUTEC Forschungszentrum wurden keine Baustoffe hergestellt oder geprüft.

1.7.4 KM

Die Recyclingfähigkeit der Bauprodukte wurde auf der Grundlage der vorliegenden Ergebnisse fachlich bewertet. Hierzu wurden diverse Regelungen des Bauwesens (Tiefbau/Hochbau) berücksichtigt.

Die einschlägigen Regelungen des klassifizierten Straßen- und Erdbau sind aufgrund europäischer technischer Vorgaben, die ins nationale Regelwerk umgesetzt werden müssen, dauerhaft im Fluss. Gleiches gilt auch in Bezug auf die Anforderungen an die Schadlosigkeit von mineralischen Ersatzbaustoffen (MEB) sowie von Bauprodukten. Bedauerlicherweise sind aber vor allem die Regelungen hinsichtlich der Umwelteigenschaften nicht harmonisiert, was die Bewertung der Schadlosigkeit in Abhängigkeit vom Verwendungszweck so schwierig macht.

So sind die einschlägigen Regelungen des klassifizierten Straßen- und Erdbau (Tiefbau) andere als die Regelung für Bauprodukte im Hochbau. Zur Verdeutlichung dieser Problematik sind in Abbildung 51 die vollständigen Regelungen des klassifizierten Straßen- und Erdbaus (national/europäisch) gegenübergestellt.

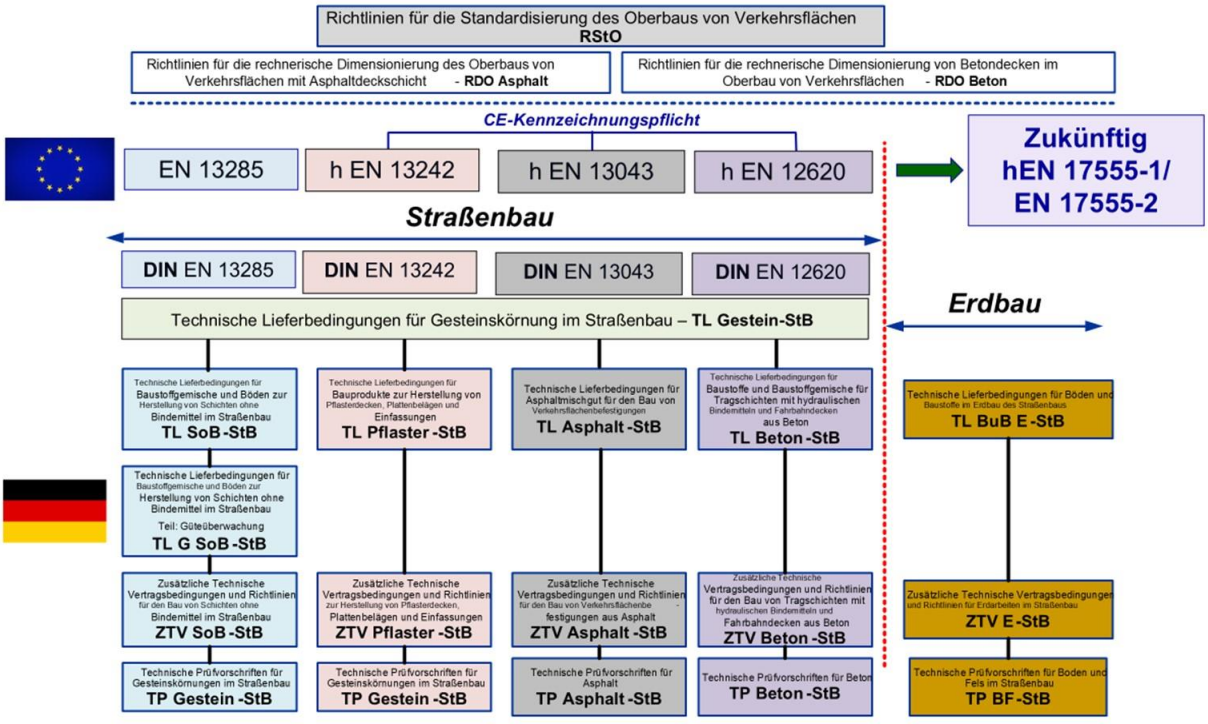

Abbildung 51: Einschlägige Regelwerke für Verkehrsflächenbefestigungen in Abhängigkeit von verschiedenen Anwendungsgebieten

Von der Systematik her sind die Regelwerke für den Tiefbau ähnlich zu denen des Hochbaus. So hat der Straßenbau für den Einsatz verschiedener Gesteinskörnung nach harmonisierter Norm (CE-Kennzeichnungspflicht) zum Beispiel für die Herstellung von Deckenbeton die DIN EN 12620, die auch für den Hochbau gilt. Hier wurden die Normen für die Gesteinskörnungen

aus technologischer Sicht bereits zwischen Tief- und Hochbau harmonisiert. Deutlich anders ist das bei der Beurteilung der Schadlosigkeit.

Für die Herstellung von Pflastersteinen als Bauprodukt sind die Anforderungen der harmonisierten Norm DIN EN 1338 Pflastersteine aus Beton, Anforderungen und Prüfverfahren, Deutsche Fassung EN 1338:2003 einzuhalten. Im Anhang ZA „Abschnitte in dieser Europäischen Norm, die Bestimmungen der EU-Bauproduktenrichtlinie betreffen" wird auf den Anwendungsbereich und die zugehörige Eigenschaft hingewiesen. Diese Europäische Norm und ihr Anhang ZA wurden unter den Mandaten M/119 „Bodenbeläge" und M/122 „Bedachungen, Oberlichter, Dachfenster und Zubehörteile" erarbeitet, die dem CEN von der Europäischen Gemeinschaft und der Europäischen Freihandelszone erteilt wurden.

Die in diesem Anhang angegebenen Abschnitte dieser Europäischen Norm entsprechen den Anforderungen dieser Mandate, die unter der Bauproduktenrichtlinie der EU (89/106) erteilt wurden.

Die Übereinstimmung mit diesem Anhang ZA rechtfertigt die Annahme, dass die in dieser Europäischen Norm behandelten Bauprodukte für ihren vorgesehenen Einsatzzweck unter Berücksichtigung geeignet sind, und es ist auf die begleitenden Angaben zum CE-Zeichen zu verweisen.

Bei Bauprodukten sind Randbedingungen zu berücksichtigen, die in der Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (MVV TB) geregelt sind. Die MVV TB ist eine grundlegende Verordnung zum Einsatz von Bauprodukten und Bauteilen. Sie konkretisiert die einzelnen Landesbauordnungen und soll die Umsetzung der länderspezifischen Vorgaben vereinfachen. Allerdings geht sie nicht nur auf baurechtliche Anforderungen ein, sondern z.B. auch auf Aspekte des Umweltschutzes. Die derzeit aktuellste Fassung der MVV TB (Ausgabe 2024/1) wurde im August 2024 veröffentlicht. Damit sind die Länder angehalten, die Inhalte der MVV TB 2024/1 in ihr Landesrecht umsetzen. Im Anhang 10 der MVV TB „Anforderungen an bauliche Anlagen ABuG sind Anforderungen an Flächenbeläge im Außenbereich festgelegt. Unter Punkt 6.1 wird darauf hingewiesen, dass bei Bauteilen für Flächenbeläge im Außenbereich aus Beton die Betonausgangsstoffe, die in Bodenbelägen verwendet werden, die in diesem Abschnitt festgelegten Anforderungen einzuhalten haben. Beim ausschließlichen Einsatz von natürlichen Gesteinskörnungen ist kein Nachweis bezüglich der Stoffgehalte (Schadlosigkeit) und der Freisetzung gefährlicher Stoffe zu erbringen. Gemäß § 7, Abs. 3 des KrWG heißt es hierzu: „Die Verwertung von Abfällen, insbesondere durch ihre Einbindung in Erzeugnisse, hat ordnungsgemäß und schadlos zu erfolgen. Die Verwertung erfolgt ordnungsgemäß, wenn sie im Einklang mit den Vorschriften dieses Gesetzes und anderen öffentlich-rechtlichen Vorschriften steht. Sie erfolgt schadlos, wenn nach der Beschaffenheit der Abfälle, dem Ausmaß der Verunreinigungen und der Art der Verwertung Beeinträchtigungen des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten sind, insbesondere keine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf erfolgt." Gemäß Anhang 10, MVV TB, dürfen Flächenbeläge aus Beton, der unter Verwendung industriell hergestellter Gesteinskörnungen

(HMV-Asche/Schlacken aus der Stahlerzeugung) hergestellt werden, nur eingebaut werden, wenn die industriell hergestellten Gesteinskörnungen die folgenden Anforderungen einhalten:

Die Stoffkonzentrationen im Eluat gemäß DIN EN 12457-4:2003-01 der industriell hergestellten Gesteinskörnung müssen die Obergrenzen gemäß Tabelle A-3 (Anhang A) einhalten.

Die Stoffgehalte im Feststoff der industriell hergestellten Gesteinskörnung müssen die Obergrenzen gemäß Tabelle A-3 (Anhang A) einhalten.

Industriell hergestellte Gesteinskörnungen, die weder in dem vorangegangenen Absatz noch in der Tabelle A-3 (Anhang A) genannt sind, sind für die Verwendung in Beton unzulässig. Die HMV-Asche ist dort nicht gelistet, demnach wäre ein Einsatz als Gesteinskörnung in Beton unzulässig. Die Stahlwerksschlacke ist benannt, somit wäre eine Gesteinskörnung unter Einhaltung der Anforderungen gemäß Tab. A-3 zulässig.

Pflastersteine werden sowohl im privaten Bereich als auch für öffentliche Verkehrsflächenbefestigungen verwendet. Für den öffentlichen Bereich gelten im Allgemeinen die einschlägigen Regelwerke des klassifizierten Straßen- und Erdbaus in Kombination mit europäischen Normen. In den Bauordnungen der Länder wird im § 1 Anwendungsbereich darauf hingewiesen, dass das Gesetz für bauliche Anlagen und Bauprodukte gilt. Gemäß § 1, Abs. 2 heißt es u.a. das Gesetz gilt nicht für Anlagen des öffentlichen Verkehrs einschließlich Zubehör, Nebenanlagen und Nebenbetrieben, ausgenommen Gebäude, was bedeutet, dass dasselbe Bauprodukt je nach Bauherr (privat/öffentlich) unterschiedlich zu bewerten wäre. Eine Harmonisierung ist hier unabdingbar.

Als Alternative wäre eine Bewertung gemäß der seit dem 01.08.2023 in Kraft gesetzten ErsatzbaustoffV sinnvoll und aus fachlicher Sicht angebracht. Hier wurde umfangreiche Forschung betrieben, um ein wissenschaftlich abgeleitetes Bewertungssystem zu entwickelten, was dann später in Festlegungen von Materialwerten an verschiedenen mineralischen Ersatzbaustoffen mündete. Ableitungssysteme zur Schadlosigkeit von mineralischen Ersatzbaustoffen sollten diesem System auch der Bewertung der Ergebnisse aus der Umweltverträglichkeitsüberprüfung zugrunde gelegt werden. Diese Ableitungssystem dient als Grundlage der Bewertung in Bezug auf die Schadlosigkeit der Gesteinskörnung aus Schlacken der Stahlindustrie und HMV-Aschen aus der thermischen Abfallbehandlung. An den Gesteinskörnungen der HMV-Asche wurden Perkolationsuntersuchungen gemäß DIN 19528 durchgeführt. Mit diesem Auslaugungsverfahren kann die dynamische Mobilität von Schadstoffen nachgewiesen werden. Das Verfahren ist in Abbildung 52 schematisch dargestellt.

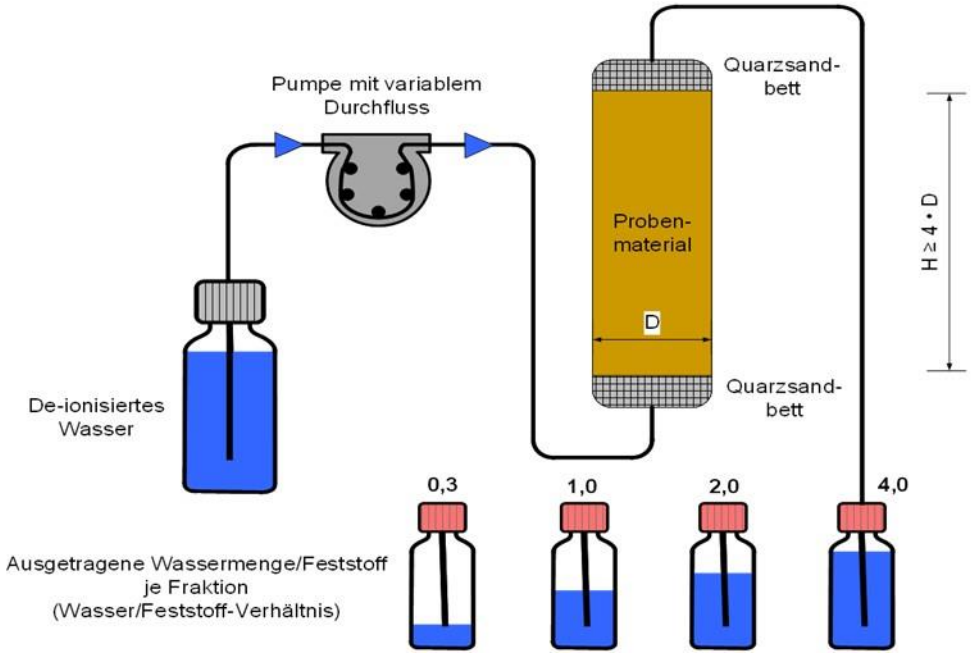

Abbildung 52: Schematische Darstellung der Apparatur zur Ermittlung der dynamische Schadstoffmobilität in Abhängigkeit verschiedener Wasser/Feststoff-Verhältnissen (0,3; 1,0; 2,0 und 4,0) gemäß DIN 19528 (Säule)

Mit Hilfe des Perkolationsverfahrens kann überprüft werden, wie schnell ein Schadstoff in einer Zeiteinheit abklingt (Abklingverhalten). Für die im Rahmen dieses Projektes geprüften HMV-Asche-Körnungen (Doppelbestimmungen) ist das Abklingverhalten für den Parameter Sulfat in Abbildung 53 gegenübergestellt.

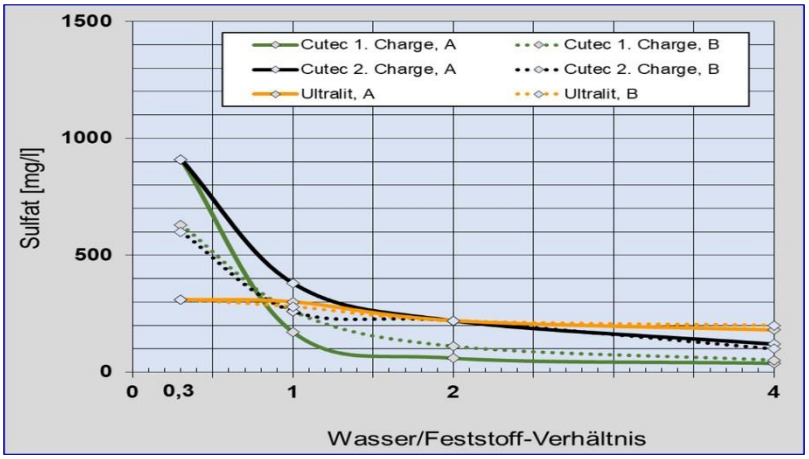

Abbildung 53: Verlauf der Schadstoffmobilität für den Parameter Sulfat in Abhängigkeit von der HMV-Asche-Körnung (unterschiedlich behandelt)

Aus diesen Kurven können die Materialwerte gemäß ErsatzbaustoffV berechnet und mit den Anforderungen verglichen werden. In Tabelle 4 sind die Anforderungen an die Materialwerte in Abhängigkeit von der jeweiligen HMV-Asche Qualität (HMVA-1 und HMVA-2) gegenübergestellt. Die geringsten Mobilitäten konnten bei der HMV-Asche 2/8 aus dem EOP-WATECH Verfahren (Ultralit) mit im Mittel 259 mg/l Sulfat nachgewiesen werden, was der HMVA-1-Qualität entsprechen würde, die es derzeitig noch nicht im Markt gibt.

Tabelle 4: Materialwerte gemäß ErsatzbaustoffV für HMVA-1 und HMVA-2

Parameter	Einheit	Materialwert gemäß **EBV vom 09.07.2021** (Artikel 1 der Mantelverordnung)	
		HMVA-1	**HMVA-2**
ELUATANALYSE			
pH-Wert[1)]	[-]	7 - 13	
Elektrische Leitfähigkeit[2)]	[µS/cm]	2.000	12.500
Chlorid	[mg/l]	160	5.000
Sulfat	[mg/l]	820	3.000
Antimon	[µg/l]	10	60
$Chrom_{ges.}$	[µg/l]	150	460
Kupfer	[µg/l]	110	1.000
Molybdän	[µg/l]	55	400
Vanadium	[µg/l]	55	150

1) Stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen, nur bei GRS Grenzwert
2) Stoffspezifischer Orientierungswert, bei Abweichungen ist die Ursache zu prüfen

Zusammenfassend hat dieses Forschungsprojekt gezeigt, dass die entwickelten Bauprodukte die einschlägigen bau- und umwelttechnischen Regelungen einhalten und durch weitere Optimierung in der Lage sein wird, dauerhaft die Materialwerte HMVA-1 der ErsatzbaustoffV einzuhalten und damit ressourceneffiziente Bauprodukte aus industriellen Nebenprodukten herzustellen. Auch die Recyclingfähigkeit konnte nachgewiesen werden. Weiterhin zeigten die diffusionsgesteuerten Auslaugungen an Pflastersteinen die sehr geringe Schadstoffmobilität, sodass eine Schadstoffanreicherung im Sinne des § 7 KrWG nicht zu besorgen ist.

1.7.5 LMU

Die LMU war nicht in den Arbeiten zur Recyclingfähigkeit involviert.

1.7.6 SRH

SRH war nicht in den Arbeiten zur Recyclingfähigkeit involviert.

1.7.7 tkMSS

tkMSS war nicht in den Arbeiten zur Recyclingfähigkeit involviert.

1.7.8 Fazit AP 6

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass die entwickelten Bauprodukte den relevanten bau- und umwelttechnischen Regelungen entsprechen und durch Optimierungen in der Lage sind, die Materialwerte der Ersatzbaustoffverordnung (HMVA-1) bzw. gültiger Regularien dauerhaft einzuhalten. Zudem wurde die Recyclingfähigkeit nachgewiesen, und die Untersuchungen ergaben eine sehr geringe Schadstoffmobilität, was eine Schadstoffanreicherung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) unwahrscheinlich macht.

1.8 Arbeitspaket 7: Ökobilanzierung, techno-ökonomische Analyse und rechtliche Rahmenbedingungen

1.8.1 IBP

Ziel dieses Arbeitspaketes ist zum einen die ökologische Bewertung der Lebenszyklusphasen Herstellung, Nutzung und Lebensende des Pflasterstein Stoffkreislaufes unter Berücksichtigung der Kreislaufführung und Ressourceneffizienz. Die Berechnung der Umweltwirkungen erfolgt im Rahmen einer Ökobilanz unter Anwendung der DIN EN ISO 14040/44[3][4]. Zum anderen wird in AP 7 die Wirtschaftlichkeit basierend auf den Kosten für Materialien und Energie sowie die entstehenden Erlöse der Produkte betrachten. Anhand dieser techno-ökonomischen Analyse werden für die Ökobilanz ermittelte Material- und Energieflüsse mit Kosten hinterlegt, sodass die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens bewertet werden kann. Daraus ergibt sich eine ganzheitliche Aussage über Umweltwirkung, Ressourceneinsatz, Kosten und Erlöse des gesamten Stoffkreislaufes.

Zur Berechnung der Umweltwirkungen wurde das während der Projektlaufzeit erstellte Massen- und Energieflussmodell in die Ökobilanzsoftware LCA FE[5][6] überführt. Tabelle 5 zeigt die Inventardaten der Materialzusammensetzung zur Herstellung von 1 Tonne untersuchter Betonrezepturen aus Schlacken und Tabelle 6 die Inventardaten der Materialzusammensetzung der Aschen. Es wurden Referenzmischungen für die Schlacke und Asche erstellt und ausgehend davon für Schlacke 12 Rezepturen und für Aschen 1 Rezeptur entwickelt und untersucht. Je nach Korngröße des BAUSEP-Sekundärmaterials wurden entweder der Kies oder der Sand anteilig ersetzt. Das BAUSEP-Sekundärmaterial wird aus den entsprechenden Aufbereitungsverfahren hergestellt. Als Ausgangsmaterial der Schlacken wurde LiDonit und Hochofenstückschlacke (HOS) verwendet, bei den Aschen wurden MVA-Aschen verwendet und durch das CUTEC aufbereitet (CUTEC Q1/Q2). Die Substitutionsmenge bei den Schlacken wird schrittweise erhöht, zuerst für den Sand und anschließend für den Kies. Zusätzlich wurden weiteren Untersuchungen durchgeführt, um den Einfluss der parallelen Substitution zu untersuchen. Bei den Aschen wird nur ein kleiner Teil der Kiesfraktion durch CUTEC Q1/Q2Material ersetzt.

In den nachfolgenden Abschnitten werden zuerst die Ergebnisse der Substitution durch Schlacke dargestellt, im Anschluss daran die Substitution durch Asche. Die Referenz Beton Schlacke setzt sich nur aus primärem und sekundärem Material zusammen. Das rückgewonnene BAUSEP-Sekundärmaterial wird in den Rezepturen 1-12 hinzugegeben. In Rezeptur 1&2 wird der Sand um 50% durch LiDonit 0/2 oder HOS 0/2 ersetzt, in Rezeptur 3&4

[3] DIN EN ISO 14040:2009-11, Umweltmanagement -Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen

[4] DIN EN ISO 14044:200610, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen.

[5] LCA for Experts Software System and Database for Life Cycle Engineering; Sphera Solutions GmbH, Leinfelden-Echterdingen, 1992-2023,

[6] Managed LCA Content Database, Sphera Solutions GmbH, Leinfelden-Echterdingen, Datenbank Version 2023.2, 2023

um jeweils 100%. Bei den Rezepturen 5-8 wird der Kies erst um 50% und dann um 100% durch LiDonit 2/8 oder HOS 2/8 ersetzt. Sand und Kies werden parallel substituiert in den Rezepturen 9&10 zu 50% und 11&12 zu 100%. Hierbei wird das BAUSEP-Sekundärmaterial LiDonit 0/8 oder HOS 0/8 verwendet.

In Abbildung 54 werden die Anteile an Primär-, Sekundär- und BAUSEP-Sekundärmaterial der untersuchten Betonrezepturen grafisch dargestellt. Bereits in den vorangegangenen Kapiteln (Kapitel 1.4 & Kapitel 1.5) wurden die technischen Eigenschaften und Funktionalitäten dieser Betonrezepturen untersucht. Die damit einhergehenden Umweltwirkungen werden aufgezeigt anhand der Umweltwirkungskategorie EF3.1 Klimawandel – total. Die Angaben erfolgen in kg CO_2-Äquivalent (CO_2 eq.). Die Auswirkungen des Einsatzes von Sekundärmaterial aus den im Projekt betrachteten Aufbereitungsverfahren werden in Abbildung 55 dargestellt. Ersichtlich ist, dass in der Wirkungskategorie EF3.1 Klimawandel – total die Primärmaterialien einen signifikanten Anteil an den kg CO_2 eq. haben. Insbesondere der Zement hat hier einen sehr dominanten Anteil von etwa 95 %. Einen geringen Anteil hat die Flugasche als Sekundärmaterial, gefolgt von Sanden und Kiesen und dem BAUSEP-Sekundärmaterial. Die Substitution von Sand und Kies haben somit einen geringen Einfluss auf die Wirkungskategorie EF3.1 Klimawandel – total. Basierend auf aktuellen Marktpreisen sind in Abbildung 56 die aggregierten Material- und Energiekosten der Herstellung je Tonne Betonrezeptur aufgezeigt.

.

Tabelle 5: Detaillierte Materialzusammensetzung [kg] der untersuchten Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Schlacke

Materialien		**Referenz Beton** Schlacke	**Sand**				**Kies**				**Sand & Kies**			
			Rezeptur 1 50% HX 0/2 LiDonit	**Rezeptur 2** 50% HX 0/2 HOS	**Rezeptur 3** 100% HX 0/2 LiDonit	**Rezeptru 4** 100% HX 0/2 HOS	**Rezeptur 5** 50% HX 2/8 LiDonit	**Rezeptur 6** 50% HX 2/8 HOS	**Rezeptur 7** 100% HX 2/8 LiDonit	**Rezeptur 8** 100% HX 2/8 HOS	**Rezeptur 9** 50% HX 0/8 LiDonit	**Rezeptur 10** 50% HX 0/8 HOS	**Rezeptur 11** 100% HX 0/8 LiDonit	**Rezeptur 12** 100% HX 0/8 HOS
Primär-material	**Gravel 2/8**	364	364	362	364	362	182	181	-	-	182	181	-	-
	Sand 0/2	410	205	204	-	-	410	408	410	408	205	204	-	-
	CEM II / A-LL 42,5 R	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
	Reducem BV20	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
	Brunnenwasser	53	53	57	53	57	53	57	53	57	53	57	53	57
Sekundär-material	**RC Material**	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44	44
	Flugasche	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22	22
BAUSEP-Sekundär-material	**LiDonit**	-	205	-	410	-	182	-	364	-	387	-	774	-
	HOS	-	-	204	-	408	-	181	-	362	-	385	-	770
	CUTEC Q1/Q2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

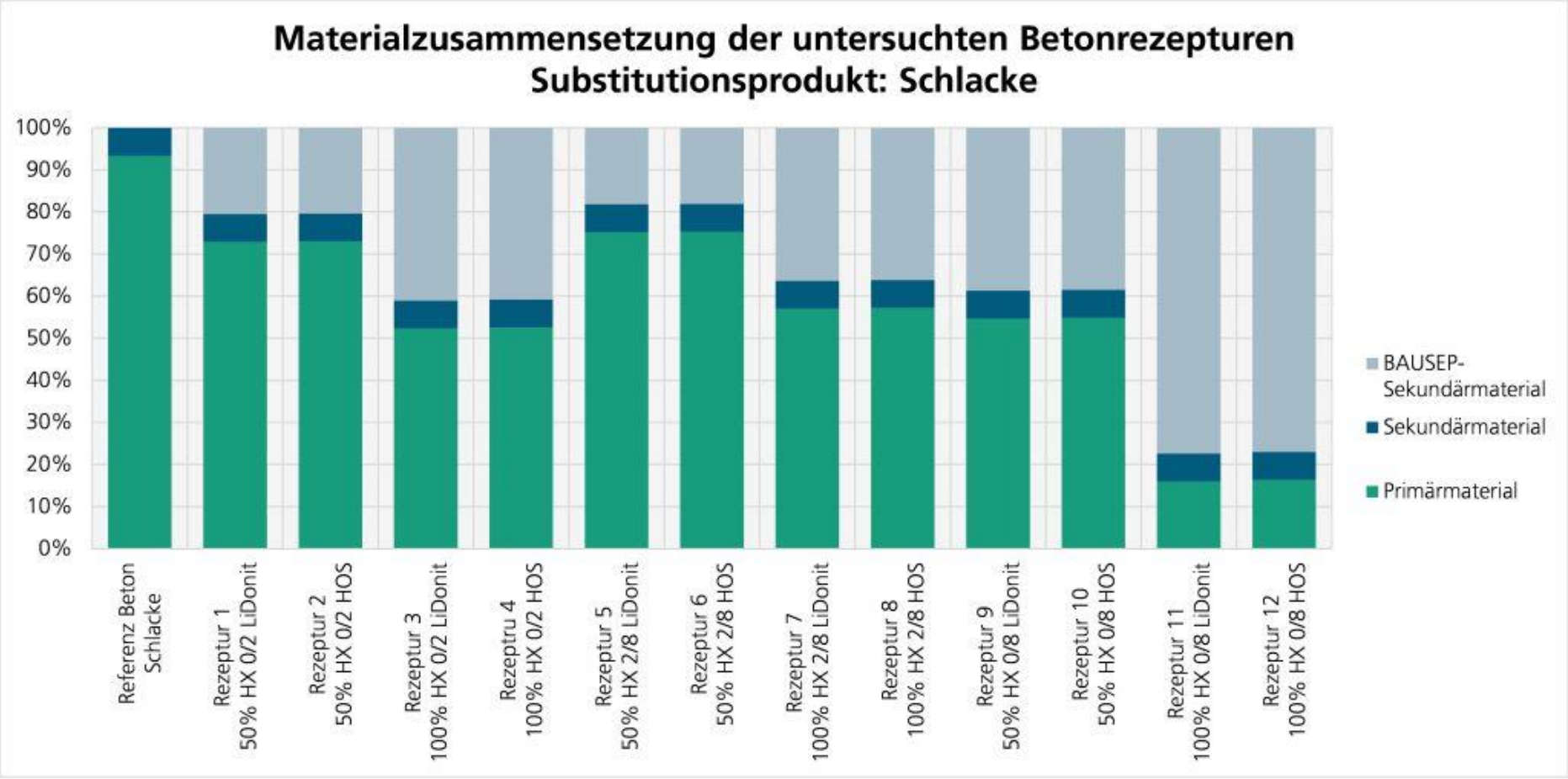
Materialzusammensetzung der untersuchten Betonrezepturen
Substitutionsprodukt: Schlacke
100%
90%
80%
70%
60%
50%
40%
30%
20%
10%
0%
Referenz Beton Schlacke
Rezeptur 1 50% HX 0/2 LiDonit
Rezeptur 2 50% HX 0/2 HOS
Rezeptur 3 100% HX 0/2 LiDonit
Rezeptru 4 100% HX 0/2 HOS
Rezeptur 5 50% HX 2/8 LiDonit
Rezeptur 6 50% HX 2/8 HOS
Rezeptur 7 100% HX 2/8 LiDonit
Rezeptur 8 100% HX 2/8 HOS
Rezeptur 9 50% HX 0/8 LiDonit
Rezeptur 10 50% HX 0/8 HOS
Rezeptur 11 100% HX 0/8 LiDonit
Rezeptur 12 100% HX 0/8 HOS
BAUSEP-Sekundärmaterial
Sekundärmaterial
Primärmaterial

Abbildung 54: Materialzusammensetzung der untersuchten Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Schlacke. Das BAUSEP-Sekundärmaterial ersetzt den Kies oder den Sand oder beides teilweise oder komplett verglichen mit der Referenz Schlacke.

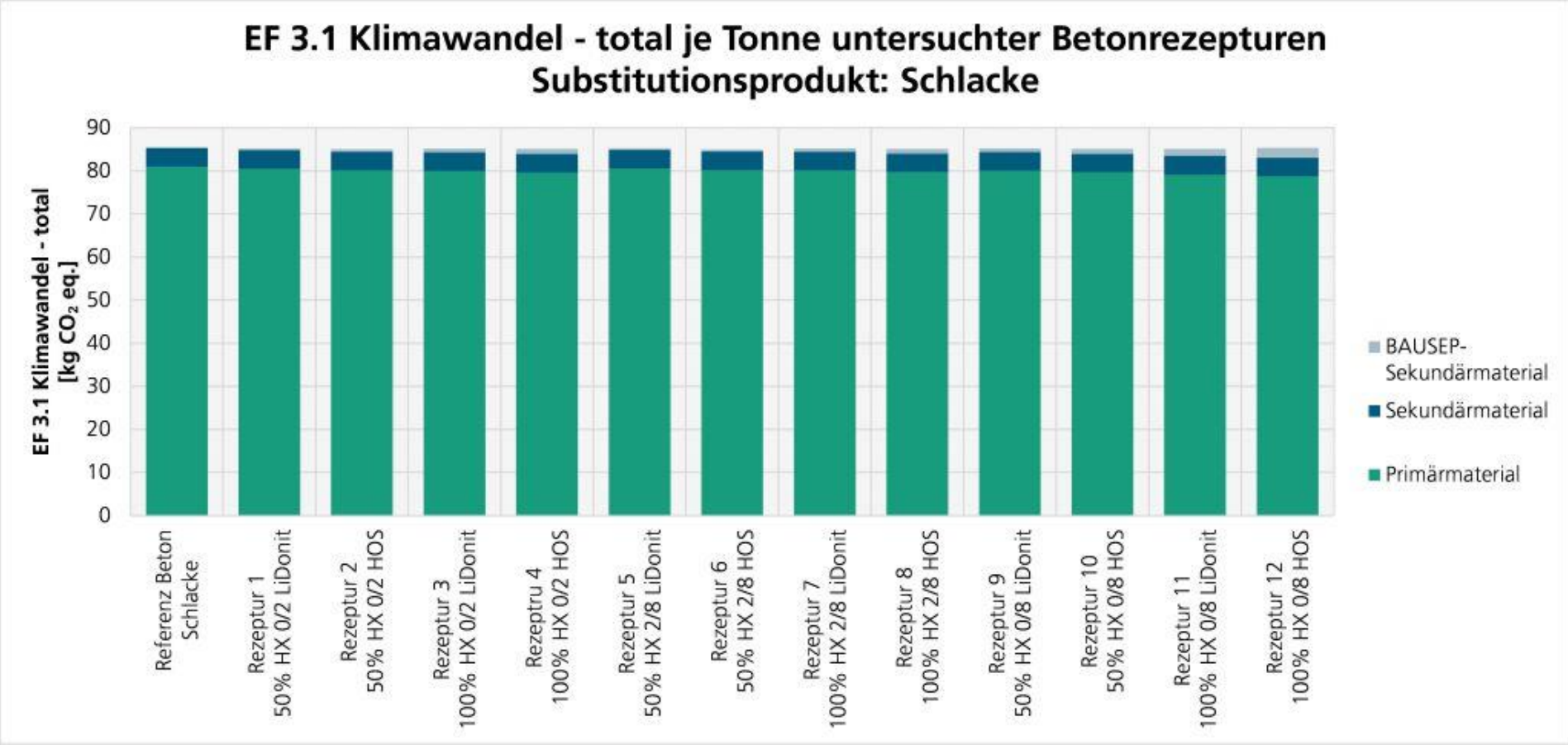

Abbildung 55: EF3.1 Klimawandel – total der untersuchten Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Schlacke

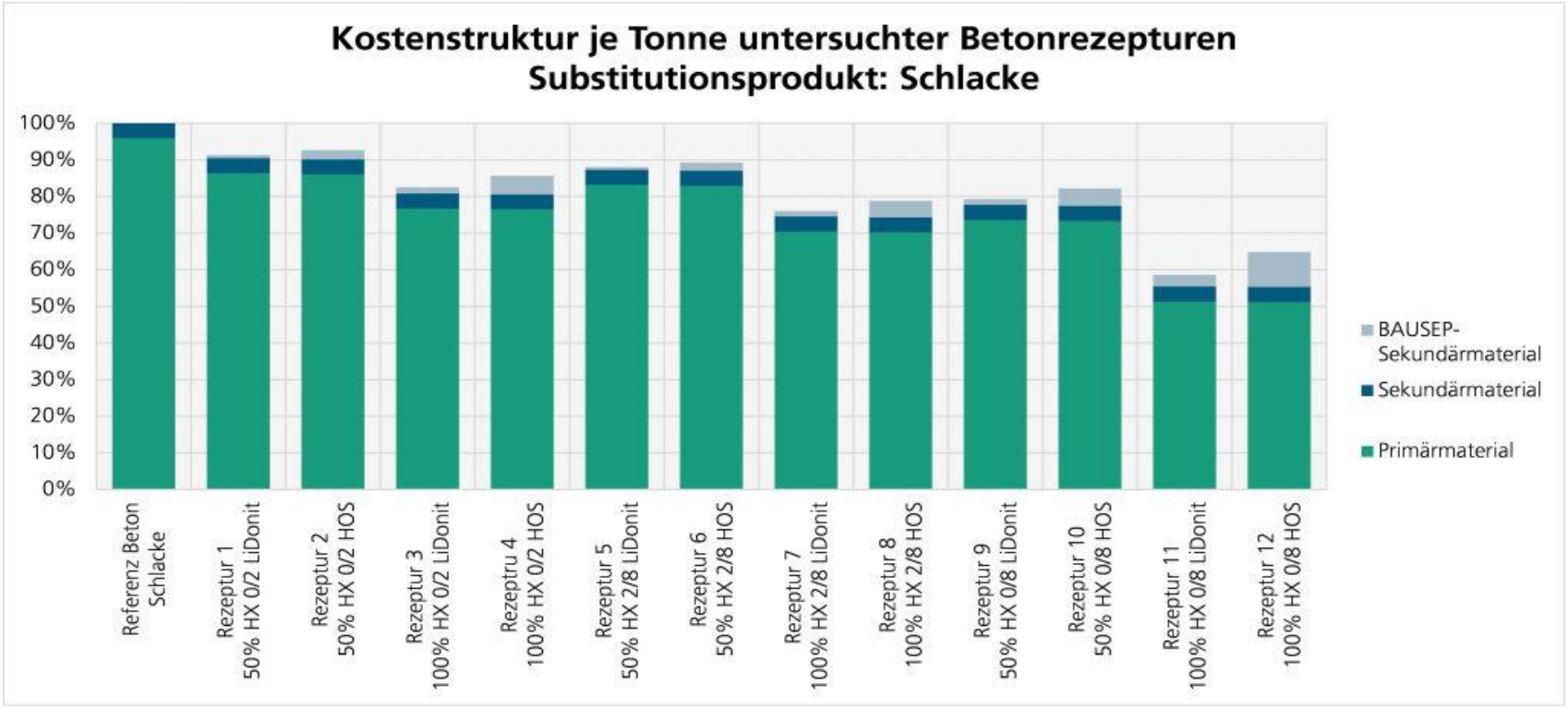

Abbildung 56: Kostenstruktur je Tonne untersuchter Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Schlacke

Ersichtlich ist, dass die Primärmaterialien einen signifikanten Anteil an den gesamten Kosten aufweisen. Die Hälfte davon fällt auf den Zement zurück, die andere Hälfte etwa gleichmäßig verteilt auf die Primärmaterialien Sand und Kies. Das Sekundärmaterial hat im Vergleich hierzu einen kleineren Anteil, ebenso die BAUSEP-Sekundärmaterialien LiDonit und HOS. Im Vergleich zur Referenz Beton Schlacke lassen sich die Kosten in den untersuchten Betonrezepturen aufgrund der Einsparungen von primärem Sand und Kies um bis zu 40 % reduzieren. Dies gilt für die Rezepturen 11 und 12, in denen beide Bestandteile vollständig substituiert werden.

In den oberen Abschnitten wurden die Auswirkungen auf Materialeinsatz, Klimawandel und Wirtschaftlichkeit der Substitution von Sand und Kies durch aufbereitete Schlacken untersucht. Nachfolgend werden die Auswirkungen der Substitution durch MVA-Asche auf die Ressourceneffizienz, den Klimawandel und die Wirtschaftlichkeit dargestellt.

Tabelle 6 zeigt die Inventardaten der Materialzusammensetzung zur Herstellung von 1 Tonne untersuchter Betonrezepturen mit Asche als Substitutionsprodukt. Das BAUSEP-Sekundärmaterial CUTEC Q1/Q2 ersetzt aufgrund seiner Korngröße nur primären Kies. Damit einhergehend wird der Primärmaterialanteil der Betonrezeptur reduziert.

Tabelle 6: Detaillierte Materialzusammensetzung [kg] der untersuchten Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: aufbereitete HMV-Asche

Materialien		**Referenz Beton** Asche	**Kies** **Rezeptur 13** CUTEC Q1/Q2
Primär-material	**Gravel 2/8**	452	316
	Sand 0/2	383	383
	CEM II / A-LL 42,5 R	88	88
	Reducem BV20	0	0
	Brunnenwasser	47	47
Sekundär-material	**RC Material**	-	-
	Flugasche	29	29
BAUSEP-Sekundär-material	**LiDonit**	-	-
	HOS	-	-
	CUTEC Q1/Q2	-	137

In Abbildung 57 werden die Anteile an Primär-, Sekundär- und BAUSEP-Sekundärmaterial aus den im Projekt betrachteten Aufbereitungsverfahren grafisch dargestellt.

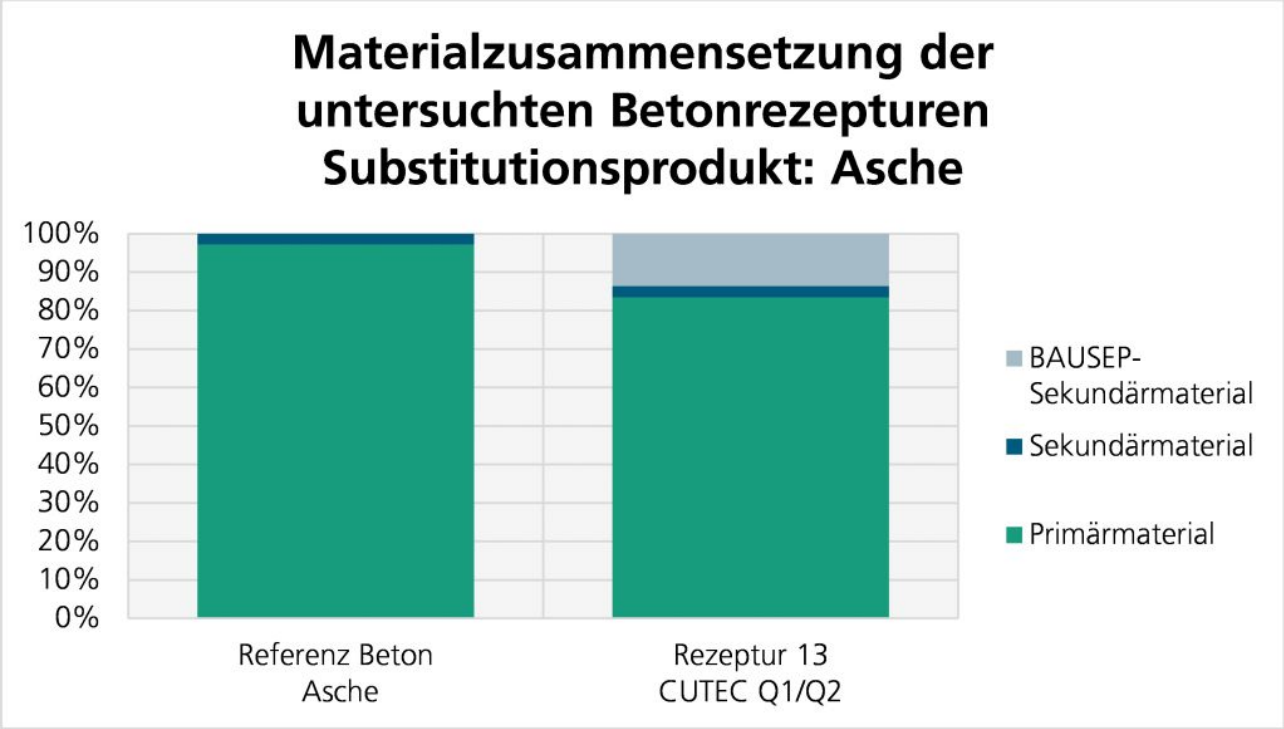

Abbildung 57: Materialzusammensetzung der untersuchten Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Asche

Bereits in den vorangegangenen Kapiteln (Kapitel 1.4 & Kapitel 1.5) wurden die technischen Eigenschaften und Funktionalitäten dieser Betonrezeptur untersucht. Die damit einhergehenden Umweltwirkungen werden aufgezeigt anhand der Umweltwirkungskategorie EF3.1 Klimawandel – total. Die Angaben erfolgen in kg CO_2-Äqulivalent. Die Auswirkungen des Einsatzes von Sekundärmaterial aus den im Projekt betrachteten Aufbereitungsverfahren werden in Abbildung 58 dargestellt.

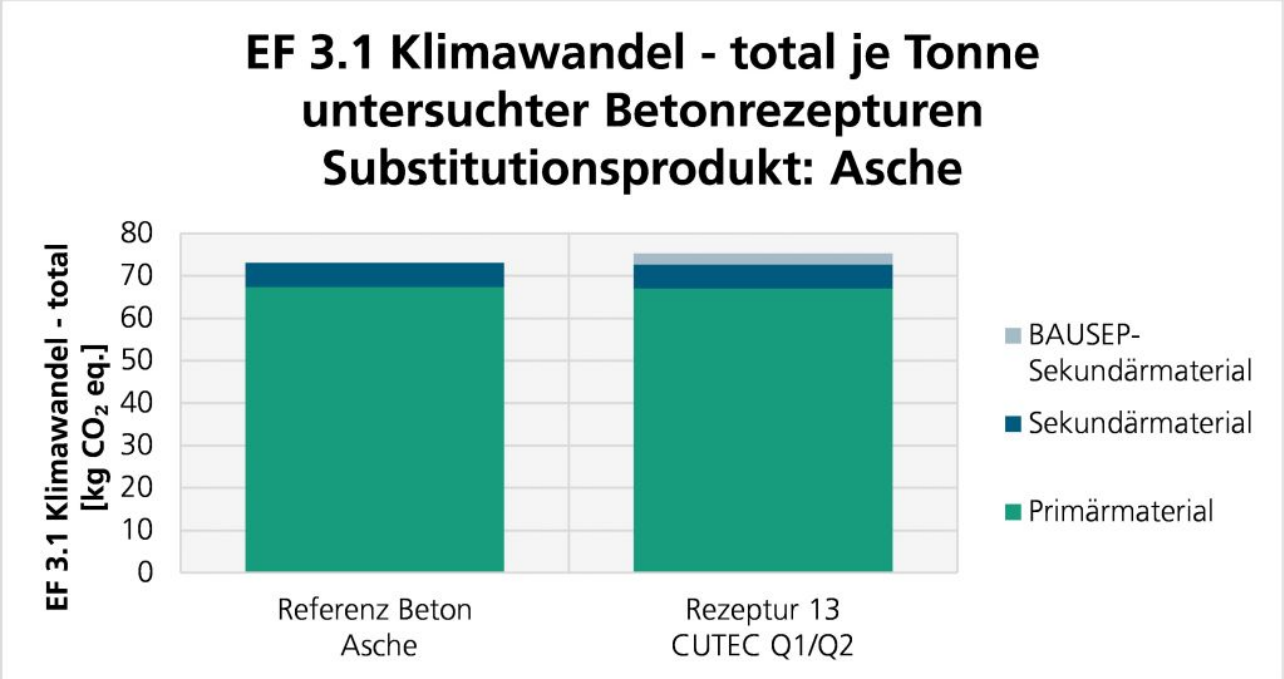

Abbildung 58: EF3.1 Klimawandel – total der untersuchten Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Asche

Ersichtlich ist, dass in der Wirkungskategorie EF3.1 Klimawandel – total die Primärmaterialien einen signifikanten Anteil an den kg CO_2 eq. haben. Insbesondere der Zement hat hier einen sehr dominanten Anteil von etwa 95 %. Einen geringen Anteil hat die Flugasche, gefolgt von Sanden und Kiesen. Die Aufbereitung und Bereitstellung des BAUSEP-Sekundärmaterials CUTEC Q1/Q2 verursacht mehr CO_2 eq. Emissionen als die primäre Bereitstellung des Substitutionsproduktes Kies. In Bezug auf die Wirkungskategorie EF3.1 Klimawandel verschlechtert die Substitution von Kies somit das Ergebnis.

Basierend auf aktuellen Marktpreisen sind in Abbildung 59 die aggregierten Material- und Energiekosten der Herstellung je Tonne Betonrezeptur aufgezeigt.

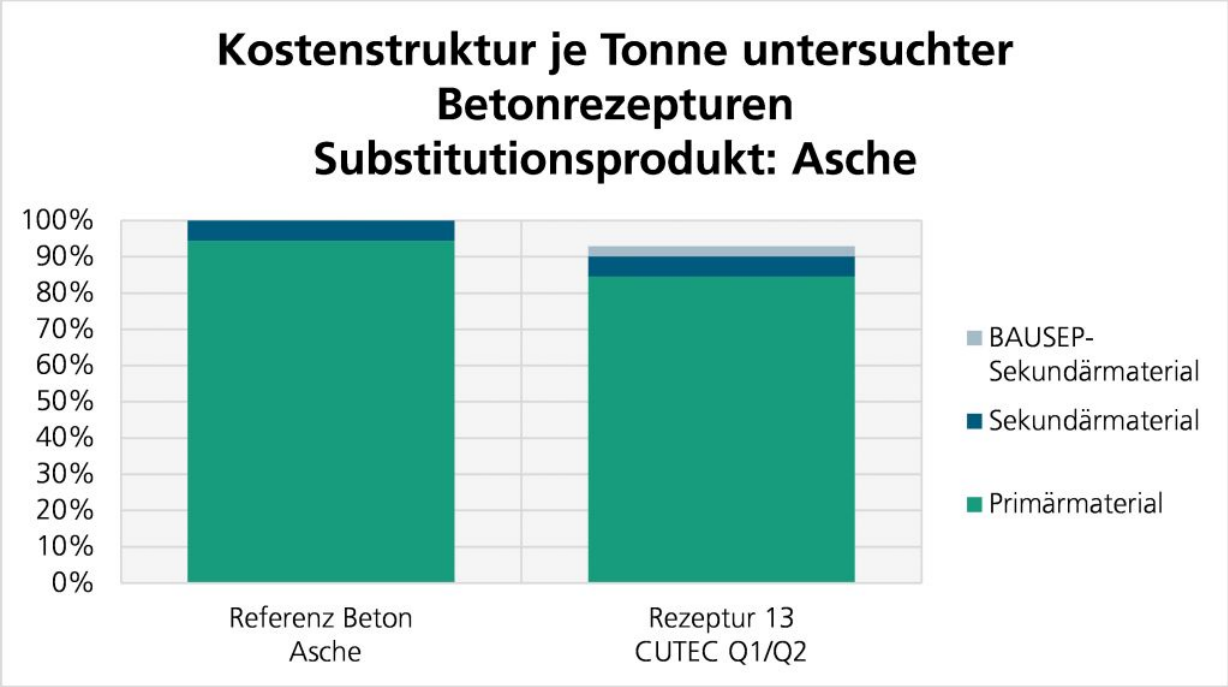

Abbildung 59: Kostenstruktur je Tonne untersuchter Betonrezepturen – Substitutionsprodukt: Asche

Ersichtlich ist, dass die Primärmaterialien einen signifikanten Anteil an den gesamten Kosten aufweisen. Die Hälfte davon fällt auf den Zement zurück, die andere Hälfte etwa gleichmäßig verteilt auf die Primärmaterialien Sand und Kies. Das Sekundärmaterial hat im Vergleich hierzu einen kleineren Anteil, ebenso das BAUSEP-Sekundärmaterial CUTEC Q1/Q2. Im Vergleich zur Referenz Beton Asche lassen sich die Kosten aufgrund der Einsparungen von Kies mit der betrachteten Betonrezeptur 13 um ca. zu 10 % reduzieren.

Schlussfolgerung:

Die Ressourceneffizienz der Primärmaterialien kann durch Substitution durch Ersatzstoffe wie Schlacken und/oder Aschen wesentlich gesteigert werden. Dadurch können strategisch wichtige primäre Rohstoffe geschont werden und darüber hinaus die wirtschaftsstrategische Unabhängigkeit gesteigert werden. Wichtig ist dabei, dass die Ressourceneinsparung nicht zur Verlagerung von Problemen hinsichtlich weiterer Umweltwirkungskategorien führt. Für den EF3.1 Klimawandel – total war dies nicht der Fall. Allerdings kann durch die Substitution das Umweltprofil der Betonrezepturen nicht wesentlich verbessert werden, da der signifikante

Treiber Zement nicht ersetzt wird. In diesem Bereich muss die Forschung und Entwicklung weitergehen, denn auch in der Kostenstruktur hat der Zement einen großen Anteil. Diese Herausforderungen und Chancen müssen in zukünftigen Projekten weiter untersucht werden und diesen Bedarf gilt es zu fördern. Auch im Hinblick auf die Flugasche, die aufgrund des Kohleausstiegs zeitnah nicht mehr national verfügbar ist, müssen weitere Rohstoffe und Abfallprodukte auf Eignung untersucht werden, um strategisch für die Zukunft aufgestellt zu sein.

1.8.2 bvw

bvw hat für die Erstellung der Datensammlung entsprechende Informationen zur Verfügung gestellt. Es wurde der komplette Ablauf des Fertigungsprozesses vom Rohstoffbezug über die Dosierung der Rohstoffe, die Erstellung der Betonrezepturen, die Beschickung der Fertigungsmaschinen mit Beton, der eigentliche Fertigungstakt auf Unterlagsbrettern, die Einlagerung der gefertigten Produkte auf der Frischseite, die Auslagerung der ausgehärteten Produkte aus der Klimakammer auf der Trockenseite mit Qualitätskontrolle, Abnahme der einzelnen Lagen mit Robotern, Paketierung der Lagen auf Schwerlastanhängern, Umreifung der Pakete und Vorschub der Wagen aus der Abstapelhalle für den Weitertransport mit Staplern und der Bretttransport zurück in das Brettmagazin für die nächste Fertigung aufgezeigt. Es wurden von bvw neben den Massen- auch die Energieströme und -verbräuche der einzelnen Komponenten und Motoren skizziert.

1.8.3 CUTEC

Für die ökobilanzielle Bewertung von Verfahren sind die Erstellung von Massen– und Energiebilanzen von entscheidender Bedeutung. Dazu wurden, im Zuge der Verarbeitung des Materials aus Probennahme III (Abbildung 60), die verarbeiteten Massen protokolliert und die Energieverbräuche der eingesetzten Anlagentechnik gemessen. Lediglich für den Schritt der Magnettrennung war die Integration eines Verbrauchszählers nicht möglich. Auch für die extern durchgeführten Trennversuche zur Entfernung der Glasfraktion liegen keine Stromverbrauchsdaten aus den durchgeführten Versuchen vor.

Die gemessenen Daten wurden ausgewertet, in Form der benötigten Massen– und Energiebilanzen zusammengefasst, und dem Projektverbund zur Verfügung gestellt (Abbildung 61). Zu berücksichtigen ist, dass der nicht ideale Betriebszustand des eingesetzten Ultraschallreaktors (wie im Kapitel Aufbereitung beschrieben) zu deutlichen höheren Energieeinsätzen führt, als im Idealbetrieb für vergleichbare Resultate notwendig wäre. Andererseits ist der Energiebedarf für die Glasabtrennung und Magnetscheidung, aber auch für eine automatisierte Förderung der Aschen im Bereich der Wäsche, nicht erfasst.

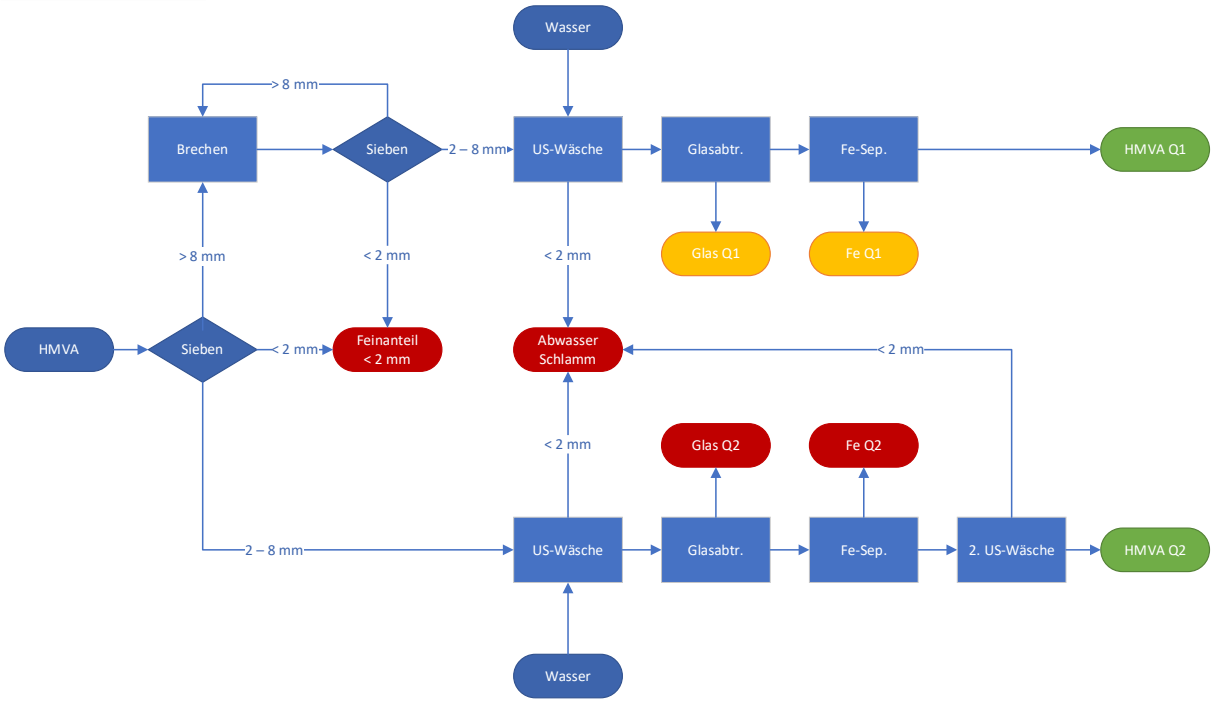

Abbildung 60: Fließbild des eingesetzten Verfahrens zur Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsaschen

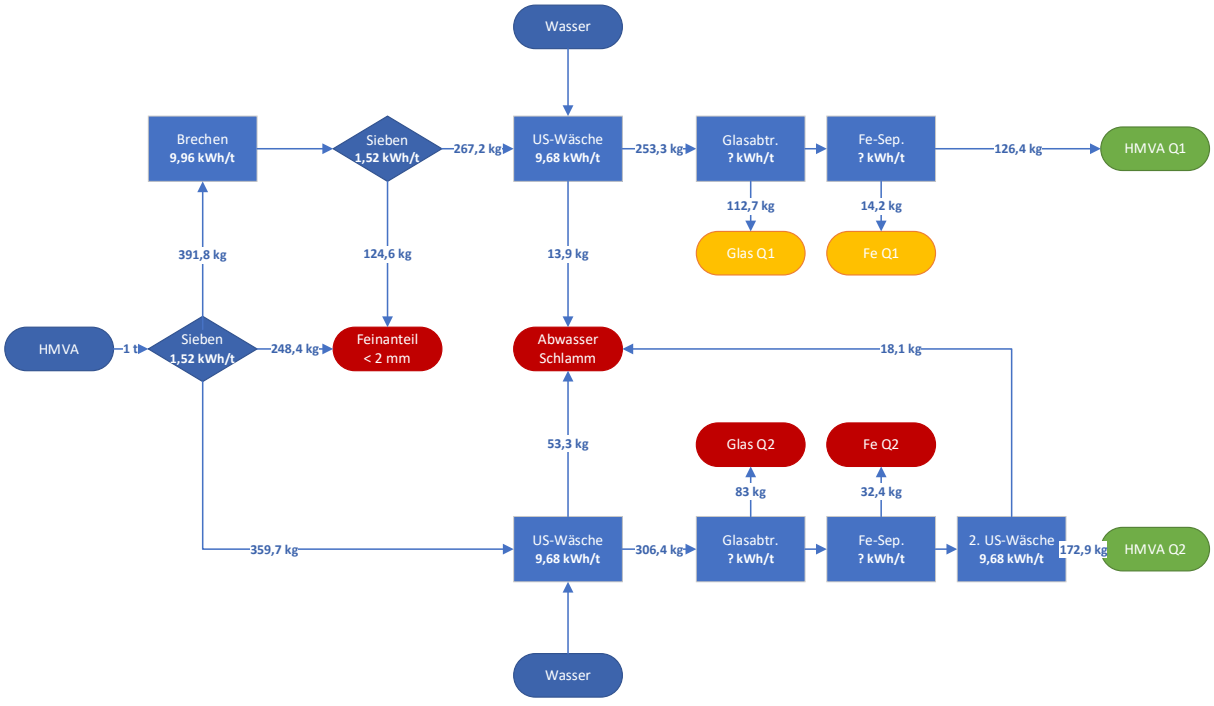

Abbildung 61: Zusammenfassung der Materialströme und Energieverbräuche des eingesetzten Verfahrens

1.8.4 KM

KM war nicht in den Arbeiten zur Ökobilanzierung involviert.

1.8.5 LMU

Die LMU war nicht in den Arbeiten zur Ökobilanzierung involviert.

1.8.6 SRH

In der Ersatzbaustoffverordnung sind derzeit in der Fremdüberwachung (FÜ), wahlweise der Säulen- oder das Schüttelverfahren zur Bewertung von Ersatzbaustoffen anzuwenden. Hinsichtlich der Gleichwertigkeit wurden die beiden Verfahren für die Testreihen parallel angewendet, im Ergebnis ist eine hohe Übereinstimmung der Materialwerte festgestellt worden.

1.8.7 tkMSS

Für die Bewertung hat tkMSS dem IBP die Abläufe der Schlackenaufbereitung vom Beet bis zur Gesteinskörnung sowie die erforderlichen Daten zu Massen- und Energieströmen bzw. Energieverbräuchen zur Verfügung gestellt.

1.8.8 Fazit AP 7

Die Untersuchungen zeigen, dass die Substitution von Primärmaterialien durch aufbereitete Schlacken und Aschen die Ressourceneffizienz steigert und die Wirtschaftlichkeit der Betonherstellung verbessert. Dennoch bleibt der Zement ein bedeutender Faktor in der CO2-Bilanz, was die Notwendigkeit weiterer Forschung und Entwicklung in diesem Bereich unterstreicht. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen und Anforderungen an die Nachhaltigkeit von Bauprodukten müssen weiterhin harmonisiert werden, um die Verwendung von Ersatzbaustoffen zu fördern und umweltfreundlichere Baupraktiken zu unterstützen.

1.9 Arbeitspaket 8: Wissenstransfer

1.9.1 IBP

Der Verpflichtung zur Veröffentlichung von Projektergebnissen wurden seitens des Fraunhofer IBP ebenfalls entsprochen. Zu Beginn des Projektes wurde eine Pressemitteilung veröffentlicht und das Projekt zudem auf der Webauftritt des Institutes verlinkt (https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/bausep.html). Im Laufe des Projektes wurden die Ergebnisse auf den ReMin-Statuskonferenzen durch Poster und Vortrag präsentiert. Zudem wurden ausgewählte Projektergebnisse auf der Fachtagung „ibausil" im Rahmen eines Vortrages und einer zugehörigen Veröffentlichung vorgestellt (https://doi.org/10.1002/cepa.2887).

1.9.2 bvw

Hier verweisen wir auf Punkt 1.9.1 IBP

1.9.3 CUTEC

Hier verweisen wir auf Punkt 1.9.1 IBP

1.9.4 KM

Hier verweisen wir auf Punkt 1.9.1 IBP

1.9.5 LMU

Hier verweisen wir auf Punkt 1.9.1 IBP

1.9.6 SRH

Hier verweisen wir auf Punkt 1.9.1 IBP

1.9.7 tkMSS

tkMSS hat intern und extern über das Forschungsprojekt berichtet. Dazu zählen z.B. Kundenveranstaltungen, Arbeitskreissitzungen und Posts bei LinkedIn. Weiterhin wurde das Projekt in Veröffentlichungen erwähnt (siehe Kapitel 6).

1.10 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens bestand darin, für die betrachteten Materialien den Nachweis einer (groß-)technischen Verwendung in zementären Anwendungen (z. B. Betonbauteile) zu erbringen, insbesondere die Unbedenklichkeit und das Fehlen einer Anreicherung von Schadstoffen nachzuweisen. Dies soll zur Etablierung einer einheitlichen Regulatorik für den Einsatz sekundärer Stoffströme auf nationaler Ebene beitragen.

Im Rahmen der durchgeführten Arbeiten konnten geeignete Schlackenarten aus dem Portfolio der Eisenhüttenschlacken identifiziert werden, die primäre Gesteinskörnung bei der Herstellung von Pflastersteinen substituieren können. Zudem wurde für HMV-Aschen deutlich, dass eine effiziente Aufbereitungsstrategie dazu führt, dass ein Einsatz der Mineralikfraktionen aus HMV-Aschen in Bauprodukten und -anwendungen möglich ist. Durch eine Ultraschallwäsche mit anschließender Siebung der Fraktionen wurde eine qualitativ hochwertige HMV-Asche gewonnen, aus der Metall- und Glasfraktionen entfernt wurden. Für diese Fraktionen bestehen marktrelevante Verwertungspfadoptionen, sodass eine nahezu vollständige Verwertung der Aschen im Sinne einer hohen Ressourceneffizienz realisiert werden kann. Die Tatsache, dass die im Projekt genutzte Aufbereitungsstrategie in ähnlicher Form (im Zuge von Weiterentwicklungsschritten) auch im EOP-WATECH Verfahren umgesetzt ist, bestätigt, dass eine hochqualitative Aufbereitung von HMV-Asche auch in größeren Maßstäben möglich ist. Damit scheint auch eine Skalierung in praxisrelevante Größenordnungen angebracht, um zukünftig die Bedarfe am Markt adressieren zu können.

Die aufbereiteten Mineralfraktionen wurden in iterativen Entwicklungsschritten in die Rezepturen für Pflastersteine und Schachtbauteile integriert, wobei primäre Gesteinskörnung im Bereich von 2-8 mm substituiert wurde. Für die Eisenhüttenschlacken konnten Substitutionsraten von bis zu 100% für die aufbereiteten HMV-Aschen von etwa 20% erzielt werden. Nach der Übertragung der Laborrezepturen in die industrielle Produktion wurden rund 150 qm Pflastersteine im Pflastersteinwerk in Hamminkeln hergestellt. Zudem wurden am Standort Lachendorf Schachtbauteile unter Verwendung von Eisenhüttenschlacke (Substitutionsrate 50%) produziert.

Im Anschluss wurde die Recyclingfähigkeit der produzierten Pflastersteine bewertet. Hierzu wurden die Steine mittels Backenbrecher zerkleinert und erfolgreich als RC-Gesteinskörnung bei der Herstellung von Beton eingesetzt. Parallel zur Analyse der technischen Machbarkeit des Recyclings wurde auch die Umweltverträglichkeit untersucht, wozu Säuleneluate erzeugt und analysiert wurden.

Zusammenfassend hat dieses Forschungsprojekt gezeigt, dass die entwickelten Bauprodukte die relevanten bau- und umwelttechnischen Vorschriften einhalten. Durch eine weitere Optimierung der Aufbereitungsstrategien für HMV-Aschen ist zu erwarten, dass die Materialwerte HMVA-1 der ErsatzbaustoffV dauerhaft eingehalten werden können, wodurch ressourceneffiziente Bauprodukte aus industriellen Nebenprodukten hergestellt werden können. Auch die Recyclingfähigkeit wurde nachgewiesen. Zudem zeigten die diffusionsgesteuerten Auslaugungen an Pflastersteinen eine sehr geringe Schadstoffmobilität, sodass eine Schadstoffanreicherung im Sinne des § 7 KrWG nicht zu befürchten ist.

Die Ergebnisse des Projektes weisen somit die Nutzbarkeit aufbereiteter HMV-Aschen und Schlacken nach und können Wegbereiter für den zukünftigen Einsatz der Materialien in Bauprodukten sein. Zudem können die Ergebnisse wertvolle und belastbare Aussagen zu rechtlichen & regulatorischen Fragestellungen liefern. Die Schaffung klarer rechtlicher

Rahmenbedingungen zur Nutzung und Anwendung vorhandener, hochqualitativer mineralischer Stoffströme sollte in jedem Fall höchste Priorität haben, um die Ressourceneffizienz signifikant zu steigern. Letztlich spielt die Ressourceneffizienz eine wichtige Schlüsselrolle beim Erreichen der ehrgeizigen Klimaziele Deutschlands und Europas.

2 Vergleich erreichter Ergebnisse mit ursprünglicher Planung

In Abbildung 62 ist der schematische Ablauf des Projekts BAUSEP dargestellt. Die im Rahmen der Antragstellung entwickelte Planung konnte während der Projektlaufzeit im Wesentlichen unverändert beibehalten werden. Jedoch wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts um sechs Monate beantragt. Dieser Schritt diente einerseits der Förderung der Teilnahme der Verbundpartner an der Abschlusskonferenz des BMBF in Goslar während der Projektlaufzeit. Andererseits war die Bereitstellung, Aufbereitung und Sortierung der HMV-Aschen für die industrielle Produktion von Pflastersteinen verzögert, weshalb die Verlängerung der Projektdauer zur Fertigstellung geplanter Arbeiten notwendig wurde.

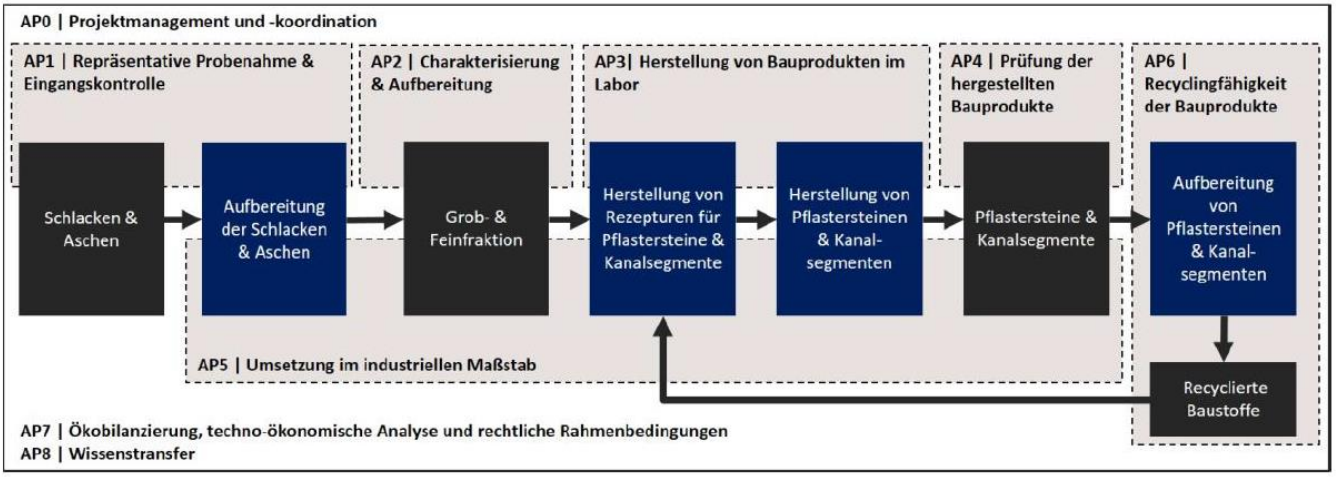

Abbildung 62: schematischer Ablauf des Projektes BAUSEP

Unter Berücksichtigung des aktuellen Wissens über potenzielle Probleme beim Einsatz von HMV-Aschen und Eisenhüttenschlacken in zementären Baustoffen, insbesondere hinsichtlich überhöhter Gehalte an Salzen und/oder Metallen sowie den Vorgaben der Ersatzbaustoffverordnung, wurde im Projekt ein Schwerpunkt auf die gezielte Aufbereitung von HMV-Aschen gelegt. Die Entwicklung von Rezepturen mit einer hohen Substitutionsrate primärer Gesteinskörnung im Korngrößenbereich von 2-8 mm und deren Übertragbarkeit in die industrielle Produktion stellte das zentrale Ziel dar. Zur Bewertung der erreichten Ressourceneffizienz wurden im Projekt sowohl die Ökobilanz als auch die Recyclingfähigkeit der hergestellten Pflastersteine unter umweltrelevanten Gesichtspunkten untersucht.

Das geplante Ziel zur Erschließung neuer Rohstoffmöglichkeiten wurde voll erfüllt. Neben der Rezepturentwicklung im Labor konnte deren industrielle Anwendung gezeigt werden. Darüber hinaus konnte der Nachweis erbracht werden, dass die Anwendung der betrachteten sekundären Rohstoffe in keiner Weise mit gültigen Regularien bezüglich Umweltverträglichkeit kollidiert.

Dabei ist insbesondere die Entwicklung eines Aufbereitungskonzeptes für HMV-Aschen zur Säuberung und Abtrennung von Fraktionen, welche im Bereich der Baustoffe als Störstoffe wirken, hervorzuheben.

Im Rahmen der Ökobilanzierung wurde deutlich, dass die Substitution primärer Gesteinskörnung durch Aschen und Schlacken einen deutlichen positiven Einfluss auf die Ressourceneffizienz von Bauprodukten hat. Es wurde jedoch auch deutlich, dass der Einfluss im Hinblick auf CO_2-Einsparungen nicht messbar ist. Diesbezüglich erscheinen Forschungs- und Entwicklungsarbeiten nötig mit dem Ziel Portlandzement als etabliertes Bindemittel ganz oder anteilig zu ersetzen.

Durch den Nachweis der Recyclingfähigkeit der hergestellten Produkte konnte zudem die Nachhaltigkeit im Sinne einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft aufgezeigt werden. In Tabelle 7 sind die Ziele des Vorhabens zusammenfassend dargestellt und bewertet.

Tabelle 7: Übersicht der Ziele des Vorhabens BAUSEP

Ziel	Zielbeschreibung	Qualität
1	Aufbereitung von MV-Aschen und Schlacken, um mineralische Fraktionen frei von metallischen Bestandteilen zu erhalten.	erfüllt
2	Untersuchung der Einsatzmöglichkeiten der aufbereiteten Fraktionen in geregelten und nicht-geregelten Bauprodukten.	erfüllt
3	Durchführung betontechnologischer Laborversuche, fokussiert auf die Produktentwicklung.	erfüllt
4	Skalierung der im Labormaßstab gewonnenen Erkenntnisse auf den industriellen Maßstab.	erfüllt
5	Herstellung und Prüfung der Bauteile „Pflasterstein“ und „Schachtbauteil“ gemäß gültiger Normen.	erfüllt
6	Prüfung der Recyclingfähigkeit der Bauteile nach geeigneter Lagerung.	erfüllt
7	Analyse der Rückführung der neu entwickelten Bauprodukte in hochwertige Produktkreisläufe.	erfüllt
8	Durchführung einer Ökobilanzierung und techno-ökonomischen Analyse zur Abbildung der Nachhaltigkeit.	erfüllt

3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeiten

3.1 IBP

Am IBP waren zur Bearbeitung der Aufgaben Laboranten, Techniker und ein Wissenschaftler abgestellt. Dabei wurde stets versucht den Personalaufwand so minimal wie möglich zu halten. Der Techniker war im Wesentlichen mit der Durchführung der Versuche zur elektrodynamischen Fragmentierung und der Siebanalyse betraut. Der Laborant war verantwortlich für notwendige Analysen und die Herstellung sowie Prüfung der Probekörper gemäß Rezepturen. Zudem erfolgte durch die Labormitarbeiter die Versuche zur Recyclingfähigkeit der einzelnen Betonpflastersteine. Die Wissenschaftler waren im Wesentlichen für die Interpretation der Ergebnisse sowie die Versuchsplanung verantwortlich. Zudem war ein Wissenschaftler für die Datenerfassung und die Erstellung der Ökobilanzierung verantwortlich. Darüber hinaus war für die interne und externe Koordination mit den damit verbundenen Pflichten (Teilnahme an Projekttreffen, Clusterworkshops und Statusseminaren) ein Wissenschaftler eingebunden. Alle Arbeiten waren zu jeder Zeit notwendig, um den Prozessfortschritt nicht zu gefährden und wurden im gesetzten Kostenrahmen ausgeführt.

3.2 bvw

bvw hat für die gesamten Aufgaben vom Rohstoffbezug über die Labortätigkeiten bis hin zur Fertigung im industriellen Maßstab einen Laboranten, einen Techniker, einen Maschinen- und Anlagenführer und einen leitenden Angestellten eingesetzt. Der leitende Angestellte hat das Projekt im Hause bvw und extern mit den anderen Projektpartnern koordiniert, der Techniker hat die komplette Umsetzung im gewerblichen Bereich begleitet und verantwortet, der Laborant hat die Rezepturen ermittelt, die Probekörper erstellt, die Laborprüfungen an Probekörpern und an den gefertigten Produkten vorgenommen und der Maschinen- und Anlagenführer hat die Herstellung im industriellen Maßstab durchgeführt.

3.3 CUTEC

Für die Durchführung der Projektarbeiten am CUTEC Forschungszentrum wurden ein leitender Projektingenieuer (Teilzeit, 10 PM insgesamt), ein technischer Mitarbeiter (Teilzeit, 6 ½ PM) und eine Laborantin (Teilzeit, 6 PM) eingeplant. Der Projektingenieur war im Wesentlichen für die Planung und Auswertung der Versuche zuständig. Der technische Mitarbeiter war für die Durchführung der Aufbereitungsversuche im Technikum vorgesehen und die Laborantin für die Durchführung von Laborversuchen und der begleitenden Analysen. Aufgrund von Personalverlusten konnte kein technischer Mitarbeiter wie geplant für das Projekt eingesetzt werden, die vorgesehenen Arbeiten mussten durch den Projektingenieur zusätzlich übernommen werden. Insgesamt gestalteten sich die Arbeiten zur Aufbereitung der Hausmüllverbrennungsaschen umfangreicher als ursprünglich angenommen, vor allem hinsichtlich der höheren Anforderungen durch die Grenzwerte der neuen Ersatzbaustoffverordnung; aber auch durch die Notwendigkeit der zusätzlichen

Glasabtrennung, was in dieser Form während der Planungsphase noch nicht bekannt war. Die Arbeiten konnten allerdings erfolgreich innerhalb der Projektlaufzeit abgeschlossen werden.

3.4 KM

Die von der KM GmbH durchgeführten Leistungen beinhalteten vor allem die Bewertung der Ergebnisse im Abgleich mit den einschlägigen Regelungen des Bauwesens. Der Schwerpunkt lag dabei in der Überprüfung der Ergebnisse hinsichtlich Schadlosigkeit. Dabei wurden innerhalb der Laufzeit des Projektes die Beteiligten auf Neuerungen/Probleme in der Regelwerksetzung hingewiesen und versucht aktuelle Erkenntnisse in den Kontext einschlägiger Vorgaben zu übertragen. An dem Forschungsvorhaben waren neben dem Leiter der Forschungsabteilung auch ein wissenschaftlicher Mitarbeiter mit der Begleitung des Forschungsprojektes betraut. Es wurde die Rückkopplung zum Leiter der Forschungsabteilung der KM dadurch immer sichergestellt. Der Aufwand für die geleisteten Arbeiten war erforderlich, um die Aufgaben der KM GmbH in diesem Forschungsprojekt, unter Einhaltung der festgelegten Forschungsmittel, sicherzustellen.

3.5 LMU

Die chemische und mineralogische Charakterisierung der einzelnen Proben, sowie detaillierte Untersuchungen zu den Oxidationsstufen von Kupfer, haben dazu beigetragen evtl. auftretende Probleme beim Einsatz in Bauprodukten im Vorfeld zu klären. Zu den nach dem Watech-Verfahren aufbereiteten Hausmüllverbrennungsaschen, die in den Baustoffen Sand und Kies ersetzen sollen, gab es bisher keinerlei Analysen und Charakterisierungen. Die Analytik zu diesen Proben war daher entsprechend umfangreich.

3.6 SRH

Alle Projektarbeiten haben sich an den im Antrag beschriebenen Zielvorgaben orientiert und wurden im Projektverlauf auf Zielgenauigkeit und Sinnhaftigkeit geprüft. Die SRH wurde in allen Projektphasen durch die HiiCCE GmbH (ehemals JOMA Umweltberatungsgesellschaft mbH) wie im Antrag geplant unterstützt. HiiCCE bzw. JOMA war bereits in mehreren von der SRH durchgeführten Forschungsvorhaben zum Thema HMVA beteiligt und verfügt über umfassendes und projektrelevantes Wissen.

3.7 tkMSS

Die von thyssenkrupp MillServices & Systems durchgeführten Arbeiten bezogen sich vor allem auf die Probenahme und Aufbereitung von Materialien aus der Eisen- und Stahlindustrie für die Kooperationspartner und die fachliche Unterstützung bei der Herstellung von Betonwaren. Ohne die Auswahl geeigneter und repräsentativer Materialien wäre eine realistische Bewertung des Potentials der unterschiedlichen Eisenhüttenschlacken nicht möglich gewesen. An dem Forschungsvorhaben waren der Leiter Forschung & Entwicklung, der Leiter Labor/Technikum und zwei Baustoffprüfer beteiligt. Anteilsweise waren zusätzlich Mitarbeiter des

Schlackenmanagements (Aufbereitung / Produktion) verschiedener Standorte mit in das Vorhaben eingebunden.

Der Aufwand für die geleisteten Arbeiten war notwendig, um die Aufgaben im Projekt zu erfüllen und wurde ohne Überschreitung der geplanten Kosten durchgeführt.

4 Nutzen der Ergebnisse, Verwertungsplanung

4.1 IBP

Das Projekt BAUSEP wurde ausgehend von Ergebnissen aus dem Projekt „ELEXSA“ (Fördermaßnahme r^4, FKZ: 033R172A), in welchen die Abtrennung und Extraktion von metallischen Fraktionen aus HMV-Aschen und Schlacken der Eisen- und Stahlerzeugung im Fokus stand, gestartet. Ziel war die Verwertung mineralischer Fraktionen aus aufbereiteten Aschen und Schlacken. Basierend auf den erzielten Ergebnissen konnten bereits während der Projektlaufzeit von BAUSEP weitere Projekte angebahnt werden, welche im Sinne der Ressourceneffizienz aber auch im Hinblick einer Reduzierung des CO_2-Fußabdrucks von Bauprodukten neue Anwendungen entwickeln. Im Laufe des Projektes konnten die Ergebnisse sowie laufende Arbeiten in der Ausbildung eines Baustoffprüfers innerhalb der Abteilung genutzt werden. Zudem wurde im Laufe des Projektes ein Labormitarbeiter eingestellt und in das laufende Projekt eingebunden. Im Nachgang zum Projekt soll eine abschließende Veröffentlichung erstellt werden, um die Strahlkraft der Ergebnisse zu erhöhen. Langfristiges Ziel ist es, die Verwendung sekundärer Rohstoffe, insbesondere HMV-Aschen, auch in rechtlichem Hinblick zu ermöglichen. Dazu sollen die Ergebnisse auf Fachtagungen vorgestellt werden. In jedem Fall sollen die Ergebnisse zum weiteren Ausbau von Expertise genutzt werden. Die entstandenen Kontakte zu den Projektpartnern sollen genutzt werden, um zukünftig weitere Fragestellungen zum Einsatz sekundärer Rohstoffe in unterschiedlichen Bauanwendungen zu untersuchen bzw. zu klären.

4.2 bvw

bvw plant die sinkende Verfügbarkeit der natürlichen Ressourcen durch den Einsatz von Aschen und Schlacken in der industriellen Fertigung zu kompensieren. Durch diesen Einsatz in unseren Produkten sehen wir u.a. auch in Zukunft die Möglichkeit der Teilnahme an öffentlichen Ausschreibungen. Bis dahin ist es aber noch ein weiter Weg. Hier verweisen wir auf die Ausführungen der SRH. Die Thematik Abfalleigenschaft muss in Deutschland geklärt werden. In anderen Ländern, z.B. die Niederlande, wird der Einsatz von HMV-Aschen in der Fertigung schon praktiziert.

4.3 CUTEC

Das Projekt BAUSEP knüpft inhaltlich an das vorangegangene Projekt ELEXSA (Fördermaßnahme r⁴, FKZ 033R172) an. Im Zuge der Bearbeitung gelang es den Wissensstand der Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsaschen zu erweitern. Dieses Wissen soll in der Bearbeitung zukünftiger Forschungsprojekte im Bereich der Reststoffverarbeitung angewendet werden. Weiterhin sollen die Erkenntnisse im Rahmen der Lehre, beispielsweise in den Vorlesungen „Landfill Mining“ oder „Einführung in die Abfallwirtschaft“ des Institutes für Aufbereitung, Recycling und Kreislaufwirtschaftssysteme (ab 01.01.2025 als Department Bestandteil des Institute of Geotechnology and Mineral Resources), genutzt werden.

4.4 KM

Durch die zunehmend restriktiven Anforderungen an mineralische Ersatzbaustoffe wird es immer schwieriger die europäisch gesetzten Vorgaben der Verwertung solcher Baustoffe nachhaltig sicherzustellen. Möglich wird dies zukünftig nur durch optimierte, weitergehende Behandlungsmaßnahmen, wie dieses Projekt vor allem am Beispiel HMV-Asche deutlich gezeigt hat. Es wurden neue Erkenntnisse gewonnen, wie solche mineralischen Ersatzbaustoffe, durch sinnvolle Aufbereitung, auch zukünftig einer Verwertung sicher zugeführt werden können, unter nachhaltiger Einhaltung der Schadlosigkeit. Durch die in diesem Projekt entwickelte Aufbereitungstechniken konnte die HMV-Asche deutlich schadstoffentfrachtet werden. Diese Entfrachtung liegt auf einem sehr hohen Niveau, sodass die HMV-Asche in der Qualität der Umweltverträglichkeit erheblich verbessert werden konnte. So hält die so behandelte HMV-Asche sogar überwiegend die Anforderungen an die HMV-Asche-Qualität HMVA-1 gemäß ErsatzbaustoffV ein, was auch hinsichtlich Akzeptanz dieses mineralischen Ersatzbaustoffes sehr förderlich ist. Also einen erheblichen Nutzen für die Praxis nach sich zieht. Es konnte sogar die Eignung als Gesteinskörnung in Bauprodukten nachgewiesen. Ein deutlicher Schritt in Richtung Ressourceneffizienz und effektiver Ressourcennutzung. Es ist geplant, diese neuen Erkenntnisse auch in das bisherige Regelwerk einzubringen/zu verwerten.

4.5 LMU

Der Ersatz von natürlichen Ressourcen durch sekundäre Rohstoffe, die bei der Müllverbrennung und bei der Verhüttung anfallen, setzt voraus, dass die sekundären Rohstoffe eingehend charakterisiert werden, um einen Gefahreneintrag in das Bauteil zu vermeiden.

4.6 SRH:

Wie die Praxis zeigt, stellt sich die Vermarktung aufbereiteter HMVA an Bauherren oder auch die Öffentliche Hand sehr schwer dar. Erforderlich ist – dies stützen auch die Untersuchungsergebnisse – ein gesetzlich verankertes, vorzeitiges Ende der Abfalleigenschaft (Produktstatus) für güteüberwachte Ersatzbaustoffe.

Grundsätzlich werden die Grenzwerte nach EBV für HMVA-2 im Rahmen BAUSEP Versuchsreihen eingehalten. Im Vergleich zur bisher von SRH betriebenen konventionellen HMVA-Aufbereitung wird der Materialwert HMVA-2 abgesichert, aber grundsätzlich keine besserer Materialwert erreicht. Die umweltrelevanten Daten des Materialwert HMVA-1 werden punktuell in Richtung HMVA-2 überschritten. In Frage steht damit die weitere praxisnahe Entwicklung entsprechender Aufbereitungsverfahren und Grundlagenforschung der Aufreinigung durch entsprechende Waschverfahren, damit regelhaft hohe Güteklassen der Verwertung erreicht werden können, z.B. Verfahren EOP-WATECH.

Im Rahmen der Versuche zeigte sich zusätzlich, dass sich mit HMVA-Qualitäten nach Aufreinigung und Behandlung im Waschverfahren regelhafte z.B. Pflastersteinprodukte herstellen ließen, die die höchsten Materialwerte nach EBV einhalten. Ein Vorhandensein von Vorgaben für diesen Verwendungszweck für HMVA, könnte einen Schub hinsichtlich der

Entwicklung und Anwendung entsprechender Aufbereitungsverfahren auch großtechnischer Art bewirken. Ausdrücklich wird hier auch auf die Ausführungen in Abschnitt 1.7.4 der KM GmbH für Straßenbau und Umwelttechnik verwiesen.

4.7 tkMSS

Für die geplanten Verfahrenswege konnten aus Sicht von tkMSS sehr gute Ergebnisse erzielt werden. Bei der Erzeugung von Betonprodukten wurde gezeigt, dass natürliche Gesteinskörnungen, wie Sand und Kies, durch Eisenhüttenschlacken ersetzt werden können.

Insgesamt lassen sich im Hinblick auf die Vermarktung in Deutschland gute wirtschaftliche Erfolgsaussichten ableiten, wenn zukünftig und dauerhaft Schlacken in Betonwaren eingesetzt werden.

Durch den Wissensgewinn können künftige Anfragen aus der Betonindustrie gezielter beantwortet werden und für tkMSS ergeben sich neue und zusätzliche Absatzwege sowie potenzielle Kunden in der Bauindustrie für Schlacken aus der Stahlindustrie.

5 Bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens durch Dritte

Parallel zum Projekt „BAUSEP“ wurde im Rahmen des ReMin Förderprogramms das Projekt ASHCON unter Koordination der TH Köln durchgeführt. Im Projekt ASHCON stand die Aufbereitung von HMV-Aschen mittels elektrodynamischer Fragmentierung und einer anschließenden Verwertung der mineralischen Fraktionen in Betonprodukten im Fokus. Während der gesamten Projektlaufzeit waren die Wissenschaftler beider Projekte in engem Austausch. Auch im Projekt ASHCON konnte primäre Gesteinskörnung durch aufbereitete HMV-Asche teilweise vollständig ersetzt werden.

Die Fa. H.U.R. Hamburg GmbH konnte den Aufbereitungsprozess für HMV-Asche (siehe EOP-WATECH-Verbundvorhaben) weiterentwickeln und strebt eine Aufskalierung des Prozesses in industriell relevante Maßstäbe an. Dabei soll die erhaltene Mineralikfraktion, welche zukünftig aus dem Prozess gewonnen wird, die Qualitätsanforderungen HMVA 1 erreichen. Die dort verwirklichten und angedachten Prozessschritte sind in vielen Punkten vergleichbar mit den im Projekt BAUSEP durchgeführten Aufbereitungsschritten und ermöglichen aus Sicht der Autoren eine hochqualitative Aufbereitung von HMV-Aschen.

6 Erfolgte und geplante Veröffentlichungen

- DOHLEN, M. (2024): Verwendung von Eisenhüttenschlacken als zirkuläre Rohstoffe. In: Wasser und Abfall (Heft 1-2). S. 14 - 20.
- DOHLEN, M. (2021): Eisenhüttenschlacken – Rohstoff für eine funktionierende Circular Economy. Magazin für Nanotechnologie, Mikrosystemtechnik, Neue Werkstoffe, Photonik und Quantentechnologien 2021 (2). S. 28 - 29.
- SHAMS, T., DITTRICH, S.: (2023) „Application of slags for the production of resource-efficient paving stones“, 21st ibausil International Conference on Building Materials, Vol. 6 Iss. 6, pp. 1015-1017, DOI: https://doi.org/10.1002/cepa.2887