

Abschlussbericht

HMV-Öko-Beton: Ökologische Optimierung von Betonprodukten durch Nutzung mineralischer Fraktionen von Hausmüllverbrennungs-Rostasche

Aktenzeichen:	36064/01
Projektlaufzeit:	09/2021-08/2023
Berichtszeitraum:	09/2021-08/2023
Autor*innen:	Iveta Vateva, Marcel Laabs, David Laner, Bernhard Middendorf
Projektpartner:	Dirk Röth, Dirk Humburg, Susanne Fröhlich, Stefan Kimm-Friedenberg
Ort und Datum:	Kassel, 31.12.2023

Projektkonsortium



FG Ressourcenmanagement
und Abfalltechnik (RM&AT)
FG Werkstoffe des Bauwesens
und Bauchemie (WdBB)



assoziierter Partner



Gefördert durch



www.dbu.de

06/02		Projektkennblatt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt			
Az	36064/01	Referat	31	Fördersumme	243.930 Euro
Antragstitel		HMV-Öko-Beton: Ökologische Optimierung von Betonprodukten durch Nutzung mineralischer Fraktionen von Hausmüllverbrennungs-Rostasche			
Stichworte		Hausmüllverbrennungssasche, Aufbereitung, Verwertung, Pflastersteine			
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
2 Jahre	01.09.2021	31.08.2023			
Zwischenberichte	31.08.2022				
Bewilligungsempfänger	Universität Kassel Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik 34125 Kassel			Tel	+49 561 804-3983
				Fax	+49 561 804-2745
				Projektleitung Prof. Dr. David Laner	
		Bearbeiter			
Kooperationspartner	Universität Kassel, Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie, 34125 Kassel BAUREKA Baustoff-Recycling GmbH, 34134 Kassel KIMM GmbH & Co. KG, 34590 Wabern				
Zielsetzung und Anlass des Vorhabens					
<p>Beton als einer der meistgenutzten Baustoffe weltweit und insbesondere sein Bestandteil Zement sind in ihrer Herstellung rohstoff- und energieintensiv und dadurch mit erheblichen Umweltauswirkungen verbunden.</p> <p>In Deutschland fallen jährlich ca. 6 Mio. t Hausmüllverbrennungs-Rostaschen (HMV-Aschen) als fester Rückstand nach der Abfallverbrennung an. Während ihrer Aufbereitung werden die enthaltenen Metalle abgetrennt und verwertet. Die verbleibenden vorwiegend mineralischen Reststoffe (ca. 90%) werden zum größten Teil entweder als Baustoff auf Deponien eingesetzt oder direkt beseitigt. Aufgrund ihrer physikalischen und chemisch-mineralogischen Eigenschaften eignet sich die HMV-Asche auch als Einsatzstoff in Beton. Die in der HMV-Asche enthaltenen löslichen Salze und Schwermetalle stellen jedoch ein Hindernis für diesen Verwertungsweg dar.</p> <p>Das Ziel des Projekts HMV-Öko-Beton war es, Hausmüllverbrennungs-Rostaschen als rezyklierte Gesteinskörnung und Zementersatzstoff für die Herstellung von Betonfertigprodukten einzusetzen, um dadurch hochwertige, qualitätsgesicherte und ökologisch optimale Verwertungswege für HMV-Aschen zu erschließen.</p>					
Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden					
<p>HMV-Aschen aus dem Müllheizkraftwerk Kassel wurden für unterschiedliche Betriebszustände gewonnen und roh sowie gealtert charakterisiert. Zur Charakterisierung der Proben gehört die Bestimmung der Korngrößenverteilung mittels vorhandener Siebmaschinen und die Bestimmung der Materialzusammensetzung durch manuelle Sortierung. Lösliche Salze und Schwermetalle sowie relevante Feststoffgehalte an Metallen, die für die Nutzung als Gesteinskörnung bzw. Bindemittlersatz relevant sind, wurden analysiert. Zur Herstellung hochwertiger mineralischer Kornfraktionen wurden verschiedene trockene und nasse Aufbereitungstechniken im Technikumsmaßstab simuliert und bilanziert. Aufbauend darauf wurden auch Aufbereitungsprozesse im Pilotmaßstab mit einer mobilen Anlage auf dem Gelände der Firma BAUREKA durchgeführt. Die gewonnenen mineralischen Fraktionen wurden in Arbeitspaket 2 chemisch-mineralogisch charakterisiert (Phasenanalyse und Korngrößencharakterisierung). Die Feinfraktion wurde zementfein aufgemahlen und ihre Reaktionspotentiale wurden bestimmt. Weiterhin wurden geeignete Betonrezepte entwickelt, Betonprobekörper hergestellt und auf ihre mechanischen und Dauerhaftigkeitseigenschaften untersucht. Im dritten Arbeitspaket wurden die Betone im halbtechnischen Maßstab optimiert und Pflastersteine wurden hergestellt. Diese wurden auf mechanische Eigenschaften und Dauerhaftigkeit untersucht.</p>					
Deutsche Bundesstiftung Umwelt • An der Bornau 2 • 49090 Osnabrück • Tel 0541/9633-0 • Fax 0541/9633-190 • http://www.dbu.de					

Im vierten Arbeitspaket wurden Elutionsversuche zur Bestimmung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen in den erzeugten Pflastersteinen durchgeführt. Mit den gewonnenen Daten aus dem gesamten Projekt wurden Stoff- und Energiebilanzen anhand von Material- und Stoffflussanalysen für die betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungspfade erstellt. Darauf basierend wurde die gesamte Verwertungskette anhand von Ökobilanzen bewertet, um Umweltauswirkungen zu quantifizieren und den effektiven Umweltnutzen der Erzeugung von HMV-Öko-Beton im Vergleich zu etablierten Verwertungspfaden für HMV-Asche zu erfassen.

Ergebnisse und Diskussion

Im Rahmen des Projekts HMV-Öko-Beton wurden ausgewählte Kornfraktionen der HMV-Asche aufbereitet und deren Eigenschaften so optimiert, dass eine Nutzung als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung und Zement in Betonprodukten ermöglicht wurde. Als geeignete Aufbereitungsschritte für die Qualitätsverbesserung der HMV-Aschen wurden die Wäsche und weitergehende Metallsortierung der mittleren Fraktion und die sequentielle Mahlung und Siebung der Feinfraktion identifiziert. Trotz weitergehender Aufbereitung werden die Grenzwerte der EBV nicht eingehalten. Die Metalle in den Zielfractionen konnten durch die weitergehenden Aufbereitung um 77% bzw. 79% in der feinen bzw. mittleren Fraktion reduziert werden. Somit betrug die Metallkonzentration 0,3% in der feinen und 1,6% in der mittleren Fraktion.

Aufgrund der Eigenschaften der HMV-Asche-Fractionen und den Erkenntnissen aus den bautechnischen und bauchemischen Laboranalysen wurden zweischichtige Betonpflastersteine als geeignete Produkte für den Einsatz der aufbereiteten HMV-Asche-Fractionen identifiziert. Die Nutzung der gemahlene Feinfraktion als Zementersatz ist trotz der erfolgten Abreicherung mit Restgehalten an metallischem Aluminium konfrontiert, die im Beton eine erhöhte Porosität und damit einhergehend eine verminderte Druckfestigkeit verursachen.

Im Rahmen der Großversuche wurden die Labor- und Technikmischungen mittels Rezepturoptimierung auf ein Mischvolumen von 1,5 m³ hochskaliert. Dabei wurde bis zu 22 M.-% des Zements durch fein gemahlene HMVA und die komplette natürliche Gesteinskörnung durch die beiden HMV-Asche-Fractionen (2–8 mm und 0–2 mm) substituiert. Die mit HMV-Asche hergestellten Pflastersteine wurden nach DIN EN 1338 geprüft. Dabei wurden bestimmte normative Vorgaben in allen Fällen eingehalten, wie z.B. der Abriebwiderstand. Die Vorgabe zur Spaltzugfestigkeit wird von einer Mischung eingehalten, bei der einerseits die 2–8 mm-Fraktion durch die entsprechende HMV-Asche ersetzt wurde und andererseits auch 11 M.-% des Zementes ersetzt wurden. Diese Mischung erfüllte aber nicht die Vorgaben für den CDF-Test und damit der Frostbeständigkeit. Die Frostbeständigkeit nach Norm wurde hingegen bei der Mischung nachgewiesen, bei der die 2–8 mm-Fraktion durch die entsprechende HMV-Asche ersetzt wurde; trotzdem bestehen noch Optimierungsmöglichkeiten.

Aus stoffflussanalytischer und ökologischer Sicht ist die regionale Aufbereitung und Verwertung der Zielfractionen 0-2 mm und 2-8 mm in Betonpflastersteinen gegenüber der aktuellen Verwertungspraxis zu bevorzugen, da dadurch Recyclingniveaus erhöht und Umweltauswirkungen reduziert werden können. Der ökologische Fußabdruck der Pflastersteine sinkt, je mehr primäre Rohstoffe durch sekundäre Rohstoffe ersetzt werden. Die meisten Einsparungen werden durch den Einsatz von gemahlener Feinasche als Zementersatz erzielt, aber auch die weitergehende Metallsortierung leistet einen relevanten Beitrag zu den erzielten Einsparungen. Die Eluatuntersuchungen der gebrochenen HMV-Pflastersteine zeigten, dass die untersuchten Parameter für die Pflastersteine mit Zementersatz und Ersatz der groben Gesteinskörnung gelöste Konzentrationen aufweisen, die deutlich unter den Grenzwerten für Recyclingbaustoffe liegen. Diese Pflastersteine können daher auch nach ihrem Nutzungsende als Recyclingbaustoffe eingesetzt und im Kreislauf geführt werden.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Zu Beginn des Projekts wurde eine Pressemitteilung durch die Universität Kassel herausgegeben, in der das Vorhaben der Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Diese Mitteilung ist auf großes Interesse gestoßen und hat viele Rückmeldungen ergeben.

Im Rahmen des Projekts wurden die Ergebnisse auf folgende Konferenzen und Tagungen vorgestellt:

- 11. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft (DGAW) in Dresden im März 2022

- Recy & DepoTech in Leoben, Österreich im November 2022
- 12. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft (DGAW) in Hamburg im März 2023
- 8. International Slag Valorisation Symposium in Mechelen, Belgien im April 2023
- Tagung der Verbände ITAD, IGAM und vgb in Düsseldorf im Mai 2023
- Sardinia-Symposium in Sardinien im Oktober 2023
- 2. Hessische Ressourcenschutzkonferenz in Frankfurt (Main) im November 2023

Derzeit sind zwei Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften in Vorbereitung. Eine betrifft die Aufbereitung der HMV-Aschen und insbesondere der Feinfraktion zur Nutzung in Beton und die andere adressiert die bautechnischen Eigenschaften der aufbereiteten HMV-Aschen für die Nutzung im Beton.

Fazit

Im Projekt HMV-Öko-Beton wurden Aufbereitungsschritte für bestimmte Kornfraktionen von HMV-Aschen entwickelt, um ihre gezielte Nutzung als teilweises Bindemittelsubstitut und Gesteinskörnungersatz in Pflastersteinen zu ermöglichen. Dabei wurden bestimmte normative Vorgaben generell eingehalten (z.B. Abriebwiderstand). Die Pflastersteine mit 100%iger Substitution der mittleren Gesteinskörnung halten auch die Vorgaben für die Spaltzugfestigkeit ein. Die Pflastersteine mit 11% Zementersatz zusätzlich zum vollständigen Ersatz der mittleren Gesteinskörnung erreichten die Anforderungen hinsichtlich Spaltzugfestigkeit knapp nicht. Hier besteht jedoch auch weiteres Optimierungspotenzial, dass durch gezielte Konditionsschritte der Feinfraktion und verbesserte Rezepturen in Zukunft ausgeschöpft werden kann. Die Verwertung der HMV-Asche in Pflastersteinen über eine regionale Aufbereitungskette ist ökologisch vorteilhaft gegenüber der etablierten Verwertung von HMV-Asche. In Bezug auf Treibhausgasemissionen ergeben sich die größten CO₂-Einsparungen durch die Substitution von Zement durch die aufbereitete und gemahlene Feinfraktion und die zusätzliche Metallrückgewinnung aus der Asche aufgrund der weitergehenden Sortierung.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	13
1 Einleitung	15
1.1 Hintergrund.....	15
1.2 Projektziel und Fragestellungen.....	16
2 Material und Methoden	18
2.1 Charakterisierung und Aufbereitung von HMV-Asche	19
2.1.1 Probenahme und Charakterisierung	19
2.1.2 Aufbereitungsversuche im Technikumsmaßstab	20
2.1.3 Aufbereitungsversuche im Pilotmaßstab	23
2.2 Bautechnische und bauchemische Charakterisierung der mineralischen Restfraktionen	25
2.3 Herstellung von Betonprodukten.....	26
2.4 Schadstoffpotential, Materialflussanalyse und Ökobilanzierung	28
2.4.1 Elutionsversuche zur Bestimmung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen	28
2.4.2 Material- und Energiebilanzierung.....	29
2.4.3 Ökobilanzierung.....	30
3 Projektergebnisse	32
3.1 Charakterisierung und Aufbereitung	32
3.1.1 Charakterisierung der HMV-Aschen.....	32
3.1.2 Aufbereitung im Technikumsmaßstab	36
3.1.3 Aufbereitung im Pilotmaßstab	38
3.2 Bautechnische und bauchemische Charakterisierung.....	41
3.2.1 Baustoffcharakterisierung inkl. Reaktionspotentiale und Aktivierungsmöglichkeiten.....	41
3.2.2 Reaktivität.....	47
3.2.3 Titration.....	51
3.2.4 Festkörperuntersuchungen an Probekörper	52
3.2.5 Entwicklung geeigneter Betonrezepte und Zuordnung zu Anwendungen.....	54
3.3 Herstellung von Betonpflastersteinen.....	59
3.3.1 Technikumsmaßstab.....	59
3.3.2 Großmaßstab.....	65
3.4 Schadstoffaustragspotential, Materialflussanalysen und Ökobilanzierung	70
3.4.1 Elutionsversuche zur Bestimmung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen	70
3.4.2 Material- und Energiebilanzierung.....	73
3.4.3 Ökobilanzierung.....	80

4	Projektdissemination zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes.....	84
5	Fazit und Ausblick.....	85
6	Quellenverzeichnis.....	88

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Schematische Darstellung der Inhalte des Projektes HMV-Öko-Beton	18
Abbildung 2:	Zeitplan und Abfolge der Arbeitsschritte des Forschungsvorhabens HMV-Öko-Beton (inkl. Meilensteine (M) und Aufstellung der Personenmonate je Partner); x: geplante Projekttreffen, P: geplante Publikationen	18
Abbildung 3:	Schematische Darstellung der Probenahme; oben: Draufsicht; unten: Vorderansicht.....	20
Abbildung 4:	Setzversuche; links: selbstgebaute Setzmaschine; rechts: Setztisch bei der BAM.....	21
Abbildung 5:	Selfrag-Anlage (a); unbehandelte Probe (b); behandelte Probe (c).....	22
Abbildung 6:	Schematische Darstellung des sequentiellen Mahlens und Siebens	22
Abbildung 7:	Anlagenschema der Aufbereitung im Großmaßstab.....	23
Abbildung 8:	Vereinfachtes Schema der gesamten Aufbereitung von HMV-Asche für ihre Nutzung in Betonprodukten.....	24
Abbildung 9:	Flussdiagramm für das Projekt für die betontechnologischen Untersuchungen. Die Pflastersteine wurden dabei sowohl auf Technikums- als auch auf Großversuchsebene hergestellt	27
Abbildung 10:	Übersicht der untersuchten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten	29
Abbildung 11:	Kumulative Korngrößenverteilung der untersuchten frischen HMV-Asche ...	32
Abbildung 12:	Materialzusammensetzung der rohen HMV-Asche in Abhängigkeit der Korngröße.....	33
Abbildung 13:	Konzentration an metallischem Aluminium für die Korngrößen unter 8 mm .	33
Abbildung 14:	Konzentration an Salzen im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg	34
Abbildung 15:	Konzentration an Cu und Mo im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg	34
Abbildung 16:	Konzentration an Sb und V im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg	35
Abbildung 17:	Konzentration an Pb und Zn im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg	35
Abbildung 18:	Konzentration an As und Cd im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg	36
Abbildung 19:	Konzentration an Cr im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg	36
Abbildung 20:	Gemahlene Feinfraktion (a) und davon abgeseibte Metalle (b)	37
Abbildung 21:	Verteilung des metallischen Aluminiums nach jeder Mahlstufe	38
Abbildung 22:	Korngrößenverteilung und Materialzusammensetzung der gealterten nicht aufbereiteten HMV-Asche	38
Abbildung 23:	Korngrößenverteilung und Metallkonzentration in der Feinfraktion nach konventioneller und weitergehender Aufbereitung	39
Abbildung 24:	Korngrößenverteilung und Metallkonzentration in der mittleren Fraktion nach konventioneller und weitergehender Aufbereitung.....	39
Abbildung 25:	Veränderung der löslichen Salze und Schwermetalle Cu und Sb in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche	40
Abbildung 26:	Veränderung der löslichen Schwermetalle Cr, Mo, V und Zn in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche	40
Abbildung 27:	Veränderung der Konzentration des metallischen Aluminiums in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche	41

Abbildung 28:	Exemplarische Diffraktogramme zur sicheren Identifizierung der magnetischen Phasen. Die Fraktionen stammen aus der 0,5–1 mm-Fraktion. Es wurden die nicht-magnetische, die magnetische und die originale Probe (v.o.n.u.) analysiert. Hem = Hämatit, Mag = Magnetit.....	42
Abbildung 29:	Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen der aufbereiteten <2 mm-Fraktion.....	43
Abbildung 30:	Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen der aufbereiteten 2–8 mm-Fraktion.....	43
Abbildung 31:	Diffraktogramme von vier feinen Korngrößenfraktionen: die <63 µm-Fraktion der 0–2 mm-Fraktion; die <63 µm-Fraktion der 2–8 mm-Fraktion; die im Labormaßstab gemahlene 0–2 mm-Fraktion; sowie die industriell gemahlene 0–2 mm-Fraktion (v.o.n.u.). Gekennzeichnet sind die Peaks der Hauptphasen. Tob = Tobermorit, Ett = Ettringit, Gp = Gips. Qz = Quarz, Cal = Calcit, Anh = Anhydrit, Fsp = Feldspat, Sil = Silikate, Zem = Klinkerphasen, Hem = Hämatit, Mag = Magnetit.....	45
Abbildung 32:	Ausgewertetes Röntgendiffraktogramm der Probe HMVA-G. Gemessenes Diffraktogramm in schwarz, berechnetes in rot und die Differenz der beiden als Kurve unten in grau dargestellt.....	46
Abbildung 33:	Partikelgrößenverteilung ermittelt durch Lasergranulometrie	47
Abbildung 34:	Kumulative Wärmemenge des CEM II-Zementes (schwarz), sowie die registrierte Wärmemenge, wenn der Zement durch HMV-Asche substituiert wird (restliche Farben) bei einem w/b-Wert von 0,50, gemessen mit einem Zementkalorimeter. Die Wärmemenge, die grob das Reaktionspotential anzeigt, ist bei bis zu 20% Ersatz des Zementes mit feiner HMV-Asche kaum unterschiedlich zur reinen Zement-Wasser-Mischung.	48
Abbildung 35:	Kumulative Wärmemenge, gemessen mit isothermen Kalorimeter von CEM I (blau) und CEM I/HMVA-Mischungen mit jeweils 10% (orange), 20% (grau), 30% (rot) und 40% HMVA als Zementersatz (grün).....	49
Abbildung 36:	Kumulative Wärmemengen, gemessen mit isothermen Kalorimeter. Gemessen wurden eine CEM I/HMVA (80/20) Mischung (blau) und eine CEM I/W12 (80/20) Mischung (orange).....	50
Abbildung 37:	Verlauf des Ca(OH) ₂ -Verbrauchs von HMVA und Trassmehl als Maß für die Reaktivität.....	51
Abbildung 38:	Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen der Normprismen zur Bestimmung des puzzolanischen Potentials als Zementersatz	52
Abbildung 39:	Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen der Normprismen zur Bestimmung des puzzolanischen Potentials als Zementersatz	53
Abbildung 40:	Prismen mit 40% des Zementes ersetzt durch HMVA (oben) und Quarzmehl W12 (unten). Bei dem HMVA-Prisma sind deutliche Risse zu erkennen. Maße: 16x4x4 cm.	53
Abbildung 41:	Sieblinien der beiden HMVA-Fraktionen 0–2 mm (schwarz) und 2–8 mm (grau).....	55
Abbildung 42:	Sieblinien des Normsand (orange), der originalen 0–2 mm-Fraktion (schwarz, durchgehend) und der abgesiebten HMVA 0–2 mm-Fraktion (schwarz, gestrichelt).....	55
Abbildung 43:	Unterschied von Normprismen mit HMV-Asche, wenn das Wasser zuerst der Asche zugegeben wird. a) Ansicht beider Prismen direkt nach dem Ausschalen, b) im Lichtmikroskop nach Festigkeitsprüfung. Das Prisma, bei	

	dem das Wasser der HMV-Asche zuerst hinzugegeben wurde, ist jeweils links	56
Abbildung 44:	Druckfestigkeiten (links) und Biegezugfestigkeiten (rechts) von Normprismen und Prismen, bei denen der Normsand und zunehmend auch der Zement durch HMVA ersetzt wurde.	56
Abbildung 45:	Schwindverläufe der Normprismen mit unterschiedlichen HMVA-Anteilen ...	57
Abbildung 46:	Schnittbilder der μ -CT-Aufnahmen eines Prismas mit 100% HMVA als Sandersatz und 40% HMVA als Zementersatz (links) und eines Normprismas (rechts). Gut zu sehen sind Partikel mit hoher Dichte (vermutlich Metalle). Bildbreite ca. 4 mm	58
Abbildung 47:	Rekonstruierte Bereiche der μ -CT-Aufnahmen des Prismas mit 100% HMVA als Sandersatz und 40% HMVA als Zementersatz. Links in blau die Luftporen und rechts in rot Bereiche mit hoher Dichte.....	58
Abbildung 48:	Sieblinien aus der Betonnormung (blau, grün, orange) sowie einer idealen, 60/40-Mischung der beiden HMVA-Fraktionen.....	59
Abbildung 49:	Herstellung von Pflastersteinen im Technikumsmaßstab. Links: "Stempelkleber" durch eine zu feuchte Konsistenz. Rechts: erdfeuchte Konsistenz für eine optimale Herstellung.	60
Abbildung 50:	Pflastersteine der Mischung VI direkt nach Herstellung	61
Abbildung 51:	Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) der Technikumsmischung III ...	61
Abbildung 52:	Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) der Technikumsmischung VI...	61
Abbildung 53:	Querschnitte der Mischungen III (oben links), IV (oben rechts), V (unten links) und VI (unten rechts)	62
Abbildung 54:	Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen der Technikumsmischungen .	63
Abbildung 55:	Für die CDF-Prüfung ausgewählte und nummerierte Pflastersteine der Technikumsversuche	63
Abbildung 56:	Ergebnisse der CDF-Prüfungen (links) und eine Probe der Mischung VI, welche die Prüfung nicht bestanden hat (rechts).....	64
Abbildung 57:	Pflastersteine der Großversuche direkt nach Herstellung	66
Abbildung 58:	Querschnitte der Mischungen aus den Großversuchen	66
Abbildung 59:	Metallstück bei der für den Abriebwiderstand nach Böhme vorbereiteten Probe der Mischung "gelb".....	67
Abbildung 60:	Ergebnisse der Prüfung des Abriebwiderstandes nach Böhme der Mischungen der Großversuche.....	67
Abbildung 61:	Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen der Pflastersteine der Großversuche	68
Abbildung 62:	Ergebnisse der CDF-Prüfungen der Pflastersteine der Großversuche	69
Abbildung 63:	Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Sulfat	71
Abbildung 64:	Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Chlorid	72
Abbildung 65:	Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Molybdän	72
Abbildung 66:	Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Chrom.....	73
Abbildung 67:	Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Güterebene; Darstellung in M.-% (Grubschat 2023).....	74
Abbildung 68:	Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Stoffebene Fe-Metalle; in M.-% (Grubschat 2023).....	75
Abbildung 69:	Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Stoffebene NE-Metalle; in M.-% (Grubschat 2023).....	75
Abbildung 70:	Aufbereitungs- und Verwertungsweg M1 (Grubschat 2023).....	76
Abbildung 71:	Aufbereitungs- und Verwertungsweg M2 (Grubschat 2023).....	77

Abbildung 72: Aufbereitungs- und Verwertungsweg M4 (Grubschat 2023).....	78
Abbildung 73: Energieverbrauch der Aufbereitungs- und Verwertungsrouten M1.....	79
Abbildung 74: Energieverbrauch der Aufbereitungs- und Verwertungsrouten M2.....	79
Abbildung 75: Energieverbrauch der Aufbereitungs- und Verwertungsrouten M4.....	80
Abbildung 76: Treibhausgaspotential der aktuellen und der drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten für HMV-Aschen, bezogen auf eine Tonne Rohasche	81
Abbildung 77: Treibhausgaspotential der aktuellen und der drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten für HMV-Aschen nach einer Transportoptimierung (regionales Szenario), bezogen auf eine Tonne Rohasche	82
Abbildung 78: Treibhausgaspotential eines typischen Pflastersteins und der drei HMV-Pflastersteine nach Transportoptimierung (regionales Szenario), bezogen auf einen Pflasterstein	83

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Zusammensetzung der Pflastersteine (Angaben beziehen sich auf die Mischungsmenge für die Produktion in der Pflastersteinmaschine) für die Untersuchung des Schadstoffaustragspotentials	28
Tabelle 2:	Energieverbrauchsdaten.....	29
Tabelle 3:	Transportentfernungen	30
Tabelle 4:	Aktuelle Verwertungswege der HMV-Asche (Quelle: (ITAD 2023)).....	31
Tabelle 5:	Phasengehalte von drei verschiedenen Fraktionen der im Technikumsmaßstab aufbereiteten Proben (< 63 µm, 63–250 µm und die < 4 mm-Fraktion, gemahlen auf < 250 µm). Bestimmung mittels Röntgenpulverdiffraktometrie. Alle Angaben in M.-%.....	44
Tabelle 6:	Mittels XRD und Rietveld-Verfeinerung ermittelte Phasengehalte vier verschiedener, zementfeiner Proben. Alle Angaben in M.-%.....	46
Tabelle 7:	Statistische Kennwerte der Messungen mit dem Lasergranulometer. Alle Angaben in µm.....	48
Tabelle 8:	Mittels Wärmekalorimetrie gemessene Kennwerte der reinen Zemente und der Zement/HMVA-Mischungen	49
Tabelle 9:	Gemessene und kumulierte Wärmemengen nach 7d des reinen Zementes und der Zement/HMVA-Mischungen mit verschiedenen Aktivatoren.....	51
Tabelle 10:	Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie an Bruchstücken der Prismen zur Feststellung des puzzolanischen Potentials.	54
Tabelle 11:	Rezepturen der im Technikumsmaßstab hergestellten Pflastersteine für ein Volumen von 1000 l. Die Verdichtungshilfe ist basierend auf dem Zementgewicht. Angaben bis auf w/z-Wert in kg. Angegeben sind nur die Rezepturen für den Kernbeton.....	65
Tabelle 12:	Rohdichte und Kennwerte der Porositätsmessungen des Kernbetons der Großversuche.....	70
Tabelle 13:	Rezepturen der im Großversuch hergestellten Pflastersteine für ein Volumen von ca. 1000 l. Die Verdichtungshilfe ist basierend auf dem Zementgewicht. Angaben in kg. Angegeben sind nur die Rezepturen für den Kernbeton.	70

Abkürzungsverzeichnis

AKR	Alkali-Kieselsäure-Reaktion
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
DGAW	Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e.V.
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
Fe	Eisen(metalle)
HMV	Hausmüllverbrennung
HMV-Pflasterstein	Pflasterstein mit einem Anteil an HMV-Asche
IBAA	aufbereitete mineralische Fraktion der HMV-Asche (engl.: incineration bottom ash aggregate)
IC	Ionenchromatographie
ICP-MS	Massenspektrometrie mit induktiv gekoppeltem Plasma
IGAM	Interessengemeinschaft der Aufbereiter und Verwerter von Müllverbrennungsschlacken
ITAD	Interessengemeinschaft der thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.
MHKW	Müllheizkraftwerk
NE	Nichteisenmetalle
RC	Recyclingbaustoff
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
RM&AT	Fachgebiet Ressourcenmanagement und Abfalltechnik der Uni Kassel
vgbe	Internationaler Fachverband für die Erzeugung und Speicherung von Strom und Wärme
W/F	Wasser-/ Feststoffverhältnis
WdBB	Fachgebiet Werkstoffe des Bauwesens und Bauchemie der Uni Kassel
w/z-Wert	Wasser/Zement-Wert
XRD	Röntgendiffraktometrie (engl.: x-ray diffraction)

Zusammenfassung

Das Ziel des Projekts HMV-Öko-Beton war es, aufbereitete Hausmüllverbrennungs-Rostasche als rezyklierte Gesteinskörnung und Zementersatzstoff für die Herstellung von Betonfertigprodukten einzusetzen, um dadurch hochwertige, qualitätsgesicherte und ökologisch optimale Verwertungswege für HMV-Aschen zu erschließen. Dazu wurde HMV-Asche des Müllheizkraftwerkes (MHKW) Kassel für unterschiedliche Betriebszustände roh sowie gealtert charakterisiert und im Labor-, Technikums- und Pilotmaßstab anhand unterschiedlicher Verfahren aufbereitet. Chemisch-mineralogische und bautechnische Eigenschaften wurden für die erzeugten Fraktionen bestimmt und für die gemahlene Feinfraktion wurden unterschiedliche Reaktionspotenziale untersucht. Für die erzeugten HMV-Asche-Fraktionen wurden geeignete Betonrezepte entwickelt, Betonprobekörper hergestellt und diese wurden auf ihre mechanischen und Dauerhaftigkeitseigenschaften untersucht. Schließlich wurden die Betone im halbtechnischen Maßstab optimiert und Fertigbetonprodukte sowohl im Technikums- als auch im Vollmaßstab hergestellt. Die Betonprodukte wurden anschließend in Bezug auf mechanische Eigenschaften, Dauerhaftigkeit und die Mobilisierbarkeit von Schadstoffen durch Elution untersucht. Für die betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungspfade wurden Energie- und Materialflussanalysen erstellt, die als Grundlage für die ökobilanzielle Bewertung der entwickelten HMV-Öko-Betonprodukte dienten.

Für die Kornfraktionen 0-2 mm und 2-8 mm konnten geeignete Aufbereitungspfade, insbesondere das sequenzielle Mahlen und Sieben der Feinfraktion und die weitergehende Metallabtrennung und Wäsche der Mittelfraktion, identifiziert werden, die einen Einsatz in Beton ermöglichen. Dadurch konnten Restgehalte an metallischem Aluminium stark reduziert und die Reaktivität der Feinfraktion verbessert werden. Die Ergebnisse der Phasenanalyse, der Wärmekalorimetrie und der Titrations deuteten jedoch auch darauf hin, dass das vorhandene puzzolanische Potential durch zusätzliche Aufbereitungsschritte noch besser ausgeschöpft werden könnte. Außerdem stellten die Restgehalte an metallischem Aluminium weiterhin eine Herausforderung dar, da damit im Beton eine erhöhte Porosität und dadurch bedingt eine verminderte Druckfestigkeit einhergeht. Vor diesem Hintergrund wurden zweischichtige Betonpflastersteine als geeignete Produkte für den Einsatz der aufbereiteten HMV-Asche-Fraktionen identifiziert und im Rahmen von Technikums- und Werksversuchen entsprechende Probekörper hergestellt. Dabei wurde bis zu 22 M.-% des Zements durch fein gemahlene HMVA und die komplette natürliche Gesteinskörnung durch die beiden HMV-Asche-Fraktionen (2-8 mm und 0-2 mm) substituiert. Die Substitution erfolgte dabei stets für den Kernbeton, die Beton-Vorsatzschicht blieb unverändert. So konnte die primäre Gesteinskörnung der Korngröße 2-8 mm vollständig in Betonpflastersteinen ersetzt und gleichzeitig die Produkthanforderungen an Pflastersteine eingehalten werden. Für eine Mischung, bei der die 2-8 mm-Fraktion vollständig und Zement im Ausmaß von 11 M.-% ersetzt wurden, konnte zwar die Vorgabe zur Spaltzugfestigkeit eingehalten werden, aber nicht die Vorgaben des CDF-Tests und damit der Frostbeständigkeit. Es bestehen aber auch hier weitere Optimierungspotenziale durch Vornässung der HMV-Asche-Fraktion oder den Einsatz von Zusatzmitteln zur Reduktion des w/z-Wertes.

Aus stoffflussanalytischer und ökologischer Sicht ist die erweiterte Aufbereitung und Verwertung der Zielfractionen 0-2 mm und 2-8 mm in Betonpflastersteinen gegenüber der aktuellen Verwertungspraxis in einem regionalen Szenario zu bevorzugen, da dadurch Recyclingniveaus erhöht, Deponievolumina geschont und Umweltauswirkungen reduziert werden können. Die Untersuchungen der Eluate der gebrochenen HMV-Betonpflastersteine zeigten, dass durch den teilweisen Ersatz von Zement und den vollständigen Ersatz gröberer Gesteinskörnung in den Pflastersteinen keine Überschreitung der Grenzwerte für das Recycling zu erwarten ist. In Bezug auf Treibhausgasemissionen ergab sich für einen HMV-Öko-Beton-Pflasterstein eine Reduktion des CO₂-Fußabdrucks um 13 – 37% (je nach Rezeptur) gegenüber einem herkömmlichen Betonpflasterstein. Die wesentlichen CO₂-Einsparungen wurden dabei durch den Einsatz von gemahlener Feinasche als teilweiser Zementersatz sowie die zusätzliche Metallrückgewinnung im Rahmen der weitergehenden Aufbereitung erzielt.

1 Einleitung

1.1 Hintergrund

Beton, welcher aus Zement, Gesteinskörnung, Wasser und in der Regel aus Betonzusatzstoffen und -mitteln besteht, ist der meistgenutzte Baustoff weltweit. Die jährliche Welt-Produktion von Beton wird derzeit auf 21 – 31 Milliarden t pro Jahr geschätzt. In der EU wurden im Jahr 2016 dafür 2,375 Milliarden t Gesteinskörnung verwendet (Basten 2018). Zudem ist die Zementindustrie weltweit für ca. 8% der anthropogenen CO₂-Emissionen verantwortlich (Poth 2020). Zum einen liegt das an der enormen Menge an Zement, die weltweit benötigt wird (ca. 4,5 Mrd. t im Jahr 2018); zum anderen aber auch an den hohen spezifischen CO₂-Emissionen, die bei der Herstellung von Portlandzementklinker freigesetzt werden (ca. 0,85 t CO₂ / t Klinker). Die Zementindustrie stößt jährlich ca. 2,5 Mrd. t CO₂ aus, das ist ca. 3,7-mal mehr als die Luftfahrt. Mit zunehmender Weltbevölkerung wird auch der Bedarf an Baustoffen weiter steigen und sich dadurch die Situation noch verschärfen, wofür Zement- als auch Gesteinskörnungssubstitute identifiziert werden müssen, was Gegenstand des vorliegenden Forschungsprojekts ist.

In der modernen Kreislaufwirtschaft liegt der Fokus auf der Vermeidung und Verwertung von Abfällen. Die Verbrennung von Abfällen in Verbrennungsanlagen bei gleichzeitiger Nutzung der entstehenden Wärme ist Stand der Technik und nimmt weiterhin eine zentrale Rolle bei der Verwertung von Abfällen unter Sicherstellung sauberer Stoffkreisläufe ein. Bei der Abfallverbrennung entstehen Flug- und Rostaschen im Ausmaß von 20-35% des Inputs, wobei ca. 90% der Asche in Form von Rostasche anfällt (ITAD 2020). Im Jahr 2020 wurden in Deutschland ca. 25 Mio. t Abfälle verbrannt (Statistisches Bundesamt (Destatis) 2022) und die Menge an Rostaschen aus der Abfallverbrennung (= HMV-Asche) lag bei ca. 6 Mio. t (ITAD 2023). Im Zuge der anschließenden Aufbereitung der HMV-Asche werden vor allem Eisen (Fe) und Nichteisenmetalle (NE) abgetrennt und einer stofflichen Verwertung zugeführt. Der verbleibende, überwiegend mineralische Anteil wurde 2020 zu 81% als Ersatzbaustoff verwertet (mehr als die Hälfte davon als Ausgleichsschichten, Abdeckungen o.ä. auf Deponien) sowie zu 19% auf Deponien beseitigt. Vor der Aufbereitung wird die HMV-Asche in der Regel gelagert, wobei unterschiedliche Reaktionen ablaufen können, die zu höherer Volumenstabilität und Reaktionsträgheit der HMV-Asche führen. Bestimmte Schwermetalle werden in die entstehenden anorganisch-mineralischen Phasen chemisch eingebunden, was eine reduzierte Elution dieser anorganisch-mineralischen Restfraktion zur Folge hat. HMV-Asche eignet sich aufgrund ihrer chemisch-mineralogischen Zusammensetzung und ihrer physikalischen Eigenschaften als Einsatzstoff in Beton und kommt sowohl als rezyklierte Gesteinskörnung als auch als Bindemittelsubstitut in Betracht (Joseph et al. 2018). Jedoch ist der Einsatz von HMV-Asche in Beton nicht unkritisch (Müller und Rübner 2006). Daher bedarf es dafür einer weitergehenden Aufbereitung, um wasserlösliche Salze wie Sulfate und Chloride, Feinmetalle (v.a. metallisches Aluminium und Zink), sowie sehr porenreiche glasige Partikel aus der mineralischen Restfraktion weitgehend abzutrennen. Durch noch enthaltenes metallisches Aluminium kann es bei Kontakt mit alkalischer Porenlösung im erhärteten Beton zum Quellen und zu Abplatzungen durch die Bildung von Al-Hydroxiden und u. U. Wasserstoff kommen. Außerdem können sich durch die enthaltenen Glaspartikel im Kontakt mit

Alkalilösungen Alkalisilikathydratgele (AKR) bilden, die das Betongefüge langfristig schädigen können. Ein hoher Gehalt an Chloriden kann eine Beton-/ Bewehrungskorrosion hervorrufen. Hohe Sulfatgehalte können betontechnologische Einschränkungen für die HMV-Asche-Verwertung in Betonen bewirken. Zudem sinkt durch den Einsatz aufbereiteter HMV-Asche das Porenvolumen und die Druckfestigkeit des Betons. Obwohl bereits Lösungsansätze für diese Herausforderungen untersucht wurden (van der Wegen et al. 2013; Quicker et al. 2018; Holm und Simon 2017), gibt es in Deutschland bisher keine wirtschaftlich-technischen Verwertungsrouten für HMV-Asche in Beton.

Bisher lag der Fokus von Forschungsprojekten weitgehend auf der intensivierten Abtrennung von Metallen (v.a. NE) und den erzielbaren Metallausbeuten aus HMV-Aschen (Holm 2016; Rüßmann et al. 2015; Šyc et al. 2020). Wohingegen die in Deutschland üblichen Kombinationen aus nasser Entschlackung und anschließender mechanischer Aufbereitung nach dem Stand der Technik bereits zu guten Ergebnissen bezüglich der Metallrückgewinnung geführt haben und durch kürzere Alterungsphasen und nasse Verfahren weiter optimiert werden, gibt es bisher nur wenige Untersuchungen, die auf eine Optimierung der Produktqualität mineralischer Restfraktionen und ihrer Verwertung abzielen (Hyks und Hjelmar 2018). Ausnahmen stellen jüngere Forschungsprojekte in Deutschland dar, die sich unter anderem mit der Nutzung der Feinfraktion aus der HMV-Asche als Rohstoff für die Zementproduktion befassten (Deike et al. 2019; Lübben et al. 2018; Lübben 2019). Obwohl diese Untersuchungen entsprechende Nutzungspotentiale bestätigen, ist die Verwertung in Beton, insbesondere in Bezug auf die Feinfraktion, mit großen Herausforderungen an die Aufbereitungstechnik (z.B. weitgehende Reduktion der Metallgehalte im Fein und Feinstkornbereich) und die betontechnologischen Einsatzmöglichkeiten verbunden. Um den vorwiegend mineralischen Reststoff aus der HMV-Asche-Aufbereitung optimal zu nutzen, bedarf es daher der Entwicklung innovativer Verwertungswege, die auf bestehenden Erkenntnissen aufbauen und aktuelle Entwicklungen reflektieren.

1.2 Projektziel und Fragestellungen

Das Ziel des Projekts HMV-Öko-Beton ist es, Hausmüllverbrennungs-Rostaschen (HMV-Aschen) als rezyklierte Gesteinskörnung und Zementersatzstoff für die Herstellung von Betonfertigprodukten oder Betonwaren einzusetzen, um dadurch hochwertige, qualitätsgesicherte und ökologisch optimale Verwertungswege für HMV-Aschen zu erschließen.

Im Rahmen des beantragten Vorhabens werden folgende Fragestellungen bearbeitet, um HMV-Asche möglichst weitgehend und ökologisch optimal ressourcenschonend in Beton einzusetzen:

- Welchen Einfluss haben die Bedingungen der Abfallverbrennung (z.B. Abfallinput, Feuerraumtemperatur, Verweildauer) und Schlackenalterung auf die Nutzbarkeit von HMV-Asche in Beton (insbesondere hinsichtlich Reaktivität der Feinfraktion)?
- Für welche Korngrößenfraktionen können in Verbindung mit welchen Aufbereitungsprozessen (Waschverfahren, Metallabtrennung, Abtrennung von Glaspartikeln) Qualitäten erzielt werden, die einen Einsatz als Recyclinggesteinskörnung

zulassen? Können für einzelne Teilfraktionen auch die Grenzwerte für HMVA-1 laut der Ersatzbaustoffverordnung (BMUV 09.07.2021) erfüllt werden?

- Wie sind Konditionierung und Aufbereitung der feinen HMV-Asche (v.a. im Bereich < 0,2 mm, welche als Bindemittelsubstitut im Fokus steht) zu modifizieren, um Metalle und Salze weitgehend abzureichern?
- Welche Mengen an nicht verwertbaren Fraktionen fallen an und wie können diese in Bezug auf Qualität und Ausbringen optimiert werden?
- Welche Maßnahmen sind geeignet, um die Abbindeigenschaften der aufbereiteten HMV-Asche-Feinfraktion zu verbessern, sodass diese zur Herstellung von Betonen mit unterschiedlichen Anforderungen (wie z.B. Erstarrungsverhalten, Konsistenz, Festigkeitsentwicklung) genutzt werden kann?
- Was sind geeignete Rezepturen zum Einsatz der aufbereiteten Fraktionen in Beton, sodass bautechnische, umwelttechnische und normative Anforderungen erfüllt werden?
- Welche Betonanwendungen können mit den entwickelten Rezepturen bedient werden, sodass die Produktanforderungen erfüllt werden?
- Welche Aufbereitungs- und Nutzungsoptionen für HMV-Asche in Beton sind aus stoffflussanalytischer und ökologischer Sicht zu bevorzugen?

2.1 Charakterisierung und Aufbereitung von HMV-Asche

2.1.1 Probenahme und Charakterisierung

Im Rahmen der Bearbeitung von Arbeitspaket 1 (AP 1) wurden die HMV-Aschen des MHKW Kassel im Oktober 2021 repräsentativ beprobt und grundlegend charakterisiert.

Die Probennahme wurde unter Berücksichtigung der Probennahmethorie durchgeführt (Gy 1992). Die Probenahmestelle war die Vibrationsrinne, die die HMV-Asche nach dem Nassentschlacker zum Haufwerk transportiert. Es wurden zwei Gesamtproben entnommen. Eine Gesamtprobe bestand aus drei Mischproben mit jeweils acht Inkrementen (je ca. 20 l). Diese Gesamtprobe wurde vollständig im Technikum RM&AT aufbereitet. Eine zweite Gesamtprobe, bestehend aus zwei Mischproben mit je vier Inkrementen, wurde vor Ort nass gesiebt, um die Feinfraktion < 2 mm abzutrennen. Insgesamt wurden 440 kg HMV-Asche entnommen.

Für die Charakterisierung wurden die Korngrößenverteilung, die Materialzusammensetzung, der Gehalt an metallischem Aluminium, die Feststoffgehalte und die Konzentrationen im Eluat in Abhängigkeit von der Korngröße bestimmt. Die Untersuchungen erfolgten überwiegend im Technikum von RM&AT und teilweise in einem externen Labor. Die Korngrößenverteilung wurde mittels Siebanalyse bestimmt. Für die Materialzusammensetzung wurden die einzelnen Kornfraktionen manuell sortiert. Die Fraktionen Fe-Metalle, NE-Metalle, Glas, unverbrannte Bestandteile und Mineralik wurden unterschieden. Zur Freilegung der Metalle wurden ein Backenbrecher und eine Planetenkugelmühle eingesetzt. Für die Kornfraktionen < 8 mm wurde zusätzlich das metallische Aluminium mittels der Wasserstoffgasmethode bestimmt. Diese Methode basiert auf der Reaktion von metallischem Aluminium mit Lauge, bei der Wasserstoff entsteht (vgl. Gl. 1). Es ist anzumerken, dass dabei neben Aluminium auch Zink reagiert und sich die Wasserstoffgasmenge somit auf beide Metalle bezieht. In weiterer Folge wird jedoch angenommen, dass der dominante Anteil aufgrund der Präsenz von metallischem Aluminium entsteht (durch frühere Untersuchungen belegt, z.B. (Vateva und Laner 2020)) und daher die Wasserstoffgasspende auf äquivalente Gehalte an metallischem Aluminium umgerechnet. Für die Bestimmung wurde eine 30%ige NaOH-Lösung verwendet. Etwa 30 g der HMV-Asche-Probe wurden der Lösung zugegeben. Das dabei gebildete Volumen an Wasserstoff wurde gemessen. Mittels Gl. 2 wurde die Konzentration an metallischem Aluminium in der Probe berechnet.



$$Al [\%] = \frac{p \cdot \Delta V \cdot M_{Al} \cdot n_{Al}}{R \cdot T \cdot M_{H_2} \cdot n_{H_2} \cdot m_{BA}} \quad (2)$$

Für die Bestimmung der Feststoffgehalte wurden die Proben auf eine Feinheit von < 500 µm aufgemahlen und mit einem mobilen Röntgenfluoreszenz-Gerät (RFA) analysiert. Für die Bestimmung der löslichen Substanzen wurden Eluate mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg (DIN 19529) hergestellt. Die filtrierte Eluate wurden in einem externen Labor untersucht. Die Chloride und Sulfate wurden mittels Ionenchromatografie (IC) (DIN EN ISO DIN EN ISO 10304-1), die Cyanide mittels Fließanalytik (DIN EN ISO 14403-1), die Elemente

Sb, As, Pb, Cd, Cr, Cu, Mo, Ni, V und Zn mittels induktiv gekoppelter Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) (DIN EN ISO 17294-2) bestimmt.

Weiterhin wurden im November 2021 Proben bei unterschiedlichen Verbrennungsbedingungen im MKW Kassel genommen, um den Einfluss variierender Verbrennungsbedingungen auf die Schlackeneigenschaften (insbesondere die mineralogische Zusammensetzung) zu untersuchen.

Im Juni 2022 wurde gealterte HMV-Asche beprobt. Die HMV-Asche wurde nach dem Austrag zu dem Projektpartner BAUREKA transportiert und dort etwa ein Jahr gelagert. Die inkrementelle Probenahme fand vor Ort statt. Dafür wurde etwa 150 t der HMV-Asche auf einer Fläche von ca. 10 m x 15 m mit einer Höhe von ca. 30 cm ausgebreitet (Abbildung 3). Anschließend wurden zufällig über die Fläche verteilt gleich große Inkremente (Fläche 30 cm x 30 cm) entnommen. Insgesamt wurden drei Mischproben mit einer durchschnittlichen Probenmasse von 790 kg mit jeweils 16 Inkrementen entnommen. Eine Probenteilung mittels Kegeln und Vierteln wurde vor Ort durchgeführt. Die gesamte Probenmasse nach dem Teilen betrug etwa 300 kg. Die Charakterisierung erfolgte wie oben beschrieben.

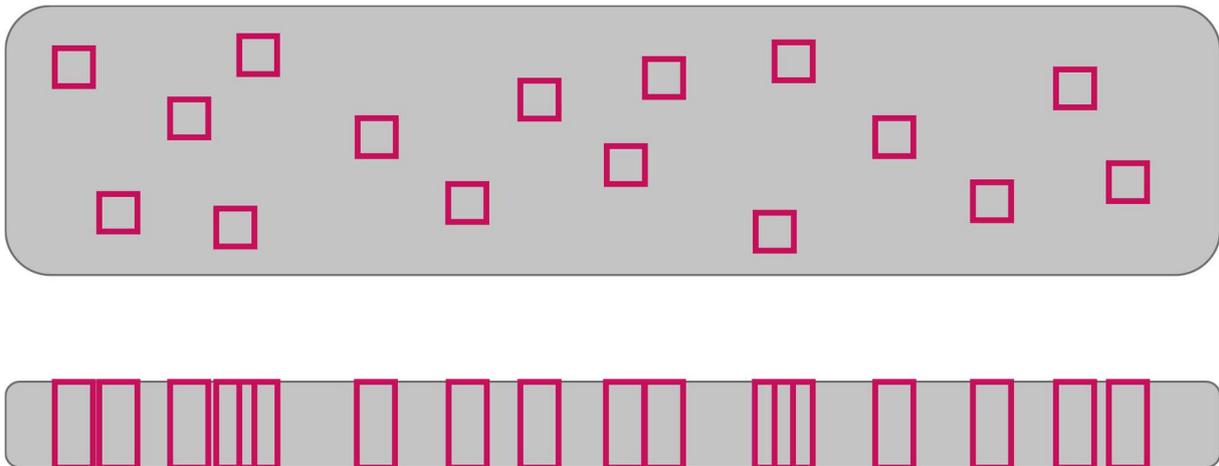


Abbildung 3: Schematische Darstellung der Probenahme; oben: Draufsicht; unten: Vorderansicht

Durch die oben beschriebenen Arbeitsschritte wurden Proben für die Aufbereitungsversuche im Technikumsmaßstab gewonnen und charakterisiert.

2.1.2 Aufbereitungsversuche im Technikumsmaßstab

Mit den gewonnenen Proben wurden im Technikumsmaßstab unterschiedliche trockene und nasse Aufbereitungsschritte durchgeführt. Es wurden rein trockene, rein nasse Aufbereitungsschritte und eine Kombination aus trockenen und nassen Aufbereitungsschritten angewendet. Dafür wurden trockene und nasse Siebung, trockene und nasse Mahlung, sowie Sortierung mittels eines Magneten verwendet.

Im Rahmen des Projekts wurde eine Setzmaschine mit dem Ziel der Abreicherung der Metalle aus der mineralischen Fraktion gebaut (Abbildung 4). Die Fraktion 2-4 mm wurde für die Versuche verwendet, weil sich aus früheren Untersuchungen gezeigt hat, dass sie die höchsten Konzentrationen an metallischem Aluminium aufweist. Weiterhin sind konventionelle Wirbelstromabscheider bei geringen Korngrößen weniger effektiv. Am 27. Januar 2022 fand ein Aufbereitungsversuch mit dem Setztisch der BAM in Berlin statt, um zu testen inwieweit

durch Dichtentrennprozesse eine Abtrennung von metallischem Aluminium aus Fraktion 0-2 mm erfolgversprechend erscheint.



Abbildung 4: Setzversuche; links: selbstgebaute Setzmaschine; rechts: Setztisch bei der BAM

Im Rahmen des AP 1 wurden zudem auch Versuche mit der Selfrag-Anlage zur elektrodynamischen Fragmentierung an der HS Pforzheim durchgeführt. Das Verfahren basiert auf dem Prinzip, dass sehr kurze elektrische Impulse im Wasser feste Stoffe in ihre Bestandteile entlang der Phasengrenze fragmentieren (Seifert et al. 2013). Das Ziel der Versuche war, in der Mineralmatrix eingeschlossene Metalle freizulegen, damit sie besser von Trennaggregaten erfasst und separiert werden können und zusätzlich die löslichen Salz- und Schwermetalle zu reduzieren. Ein Vorteil gegenüber der herkömmlichen Zerkleinerung besteht in der geringeren Zerkleinerungswirkung. Zwei Einflussgrößen wurden bei den Versuchen variiert; die Spannung und das W/F-Verhältnis. Für diese Versuche wurde die Fraktion 2-8 mm verwendet, um die Metalle nach ihrer potentiellen Freilegung in einem weiteren Sortierschritt effektiver abtrennen zu können. Auf dieser Weise sollte die Qualität der Mineralik verbessert werden, um sie als Gesteinskörnungersatz im Beton einsetzen zu können.

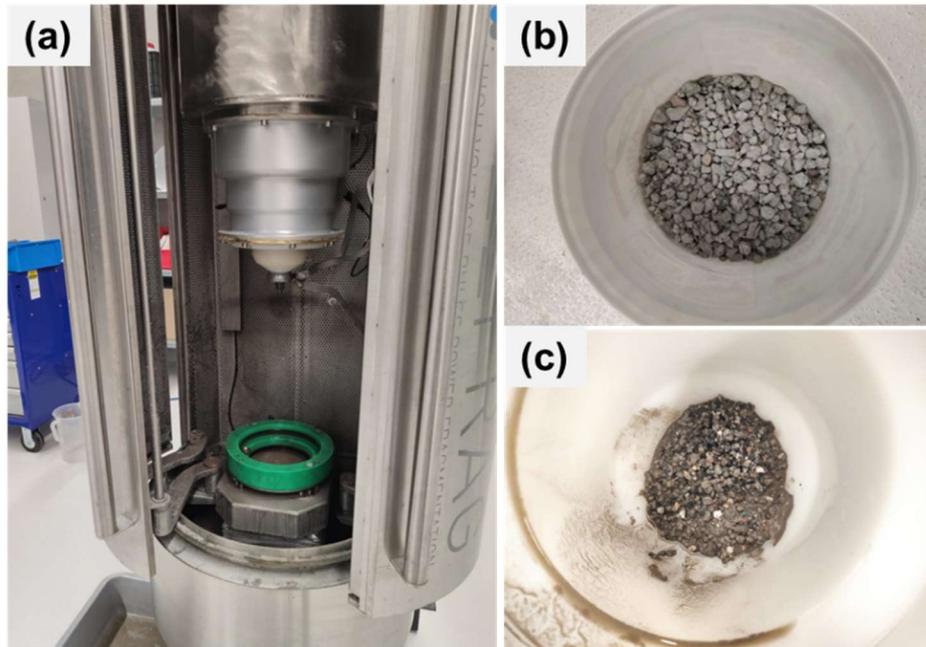


Abbildung 5: Selbstmahl-Anlage (a); unbehandelte Probe (b); behandelte Probe (c)

Um eine Reduktion der restlichen Metalle zu erreichen und gleichzeitig die Korngröße der HMV-Aschen zu reduzieren, wurde das sequentielle Mahlen und Sieben angewendet (Abbildung 6). Das Verfahren besteht darin, die HMV-Asche zu mahlen und anschließend mit einem Sieb (Sieblochmaschenweite von $125\ \mu\text{m}$) zu sieben. Die abgeseibte Probe $> 125\ \mu\text{m}$ wurde dann wieder gemahlen. Der Prozess wurde so lange wiederholt, bis alle mineralischen Partikel eine Endkorngröße von $< 125\ \mu\text{m}$ hatten. Beim Sieben konnten Metalle abgetrennt werden, die durch den Mahlprozess plattgedrückt wurden. Dafür wurde die Probe $0-2\ \text{mm}$ verwendet, die potentiell als Bindemittlersatz in Betonprodukten Einsatz finden kann.

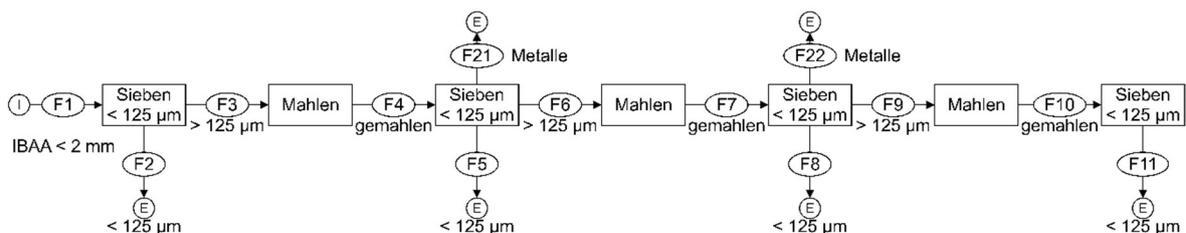


Abbildung 6: Schematische Darstellung des sequentiellen Mahlens und Siebens

Für die Nutzung als Sandersatz (feine Gesteinskörnungen) kann die Feinfraktion $< 2\ \text{mm}$ verwendet werden. Nach Abtrennung des Überkorns ($> 2\ \text{mm}$) ähnelt die Sieblinie der HMV-ASCHE der Sieblinie von CEN-Normsand nach DIN EN 196-1. Um die löslichen Salze und Schwermetalle zu reduzieren, kann das Material gewaschen werden. Zu diesem Zweck wurde zunächst die Feinfraktion $< 63\ \mu\text{m}$ mittels Trockensiebung entfernt. Diese geht beim Waschen entweder verloren oder enthält die meisten ausgewaschenen Schadstoffe. Die Fraktion $> 63\ \mu\text{m}$ wurde dann auf einem Siebturm ($0,063; 1; 2\ \text{mm}$) gewaschen. Das Waschen wurde mit einem W/F-Verhältnis von $18\ \text{l/kg}$ durchgeführt. Nach der Trocknung bei 105°C wurde die Sieblinie bestimmt, um Veränderungen nach dem Waschen feststellen zu können.

2.1.3 Aufbereitungsversuche im Pilotmaßstab

Im Juni 2022 wurde ein Aufbereitungsversuch im Vollmaßstab mit einer mobilen Aufbereitungsanlage mit einer weitergehenden Metallabtrennung, insbesondere im Feinkornbereich, auf dem Gelände der Firma BAUREKA (Projektpartner) durchgeführt (Abbildung 7). Ziel war es, die erweiterte Anlage zu bilanzieren und ausreichend Gesteinskörnung für die Herstellung von Betonprodukten im Großmaßstab zu gewinnen. Input des Aufbereitungsversuchs war die gealterte HMV-Asche (150 t), deren Probenahme in 2.1.1 beschrieben wurde. Die Beprobung der aufbereiteten Fraktionen fand während des Aufbereitungsprozesses statt. Die Outputströme der mineralischen Fraktion (IBAA) und Nichteisenmetalle (NE) für die Korngrößenfraktionen 0-2 mm, 2-8 mm, 8-12 mm, 12-22 mm und 22-40 mm wurden beprobet. Die restlichen Outputströme waren im Rahmen dieses Projekts nicht von Interesse. Von den genannten Outputströmen wurden jeweils drei Proben vom fallenden Strom am Ende des jeweiligen Förderbands entnommen. Die Probenmassen variierten zwischen 10 bis 30 kg.

Die gewonnenen Proben (sowohl Input als auch Outputs) wurden wie in 2.1.1 beschrieben umfassend charakterisiert (Korngrößenverteilung, Materialzusammensetzung, Feststoffgehalte und Eluatgehalte).

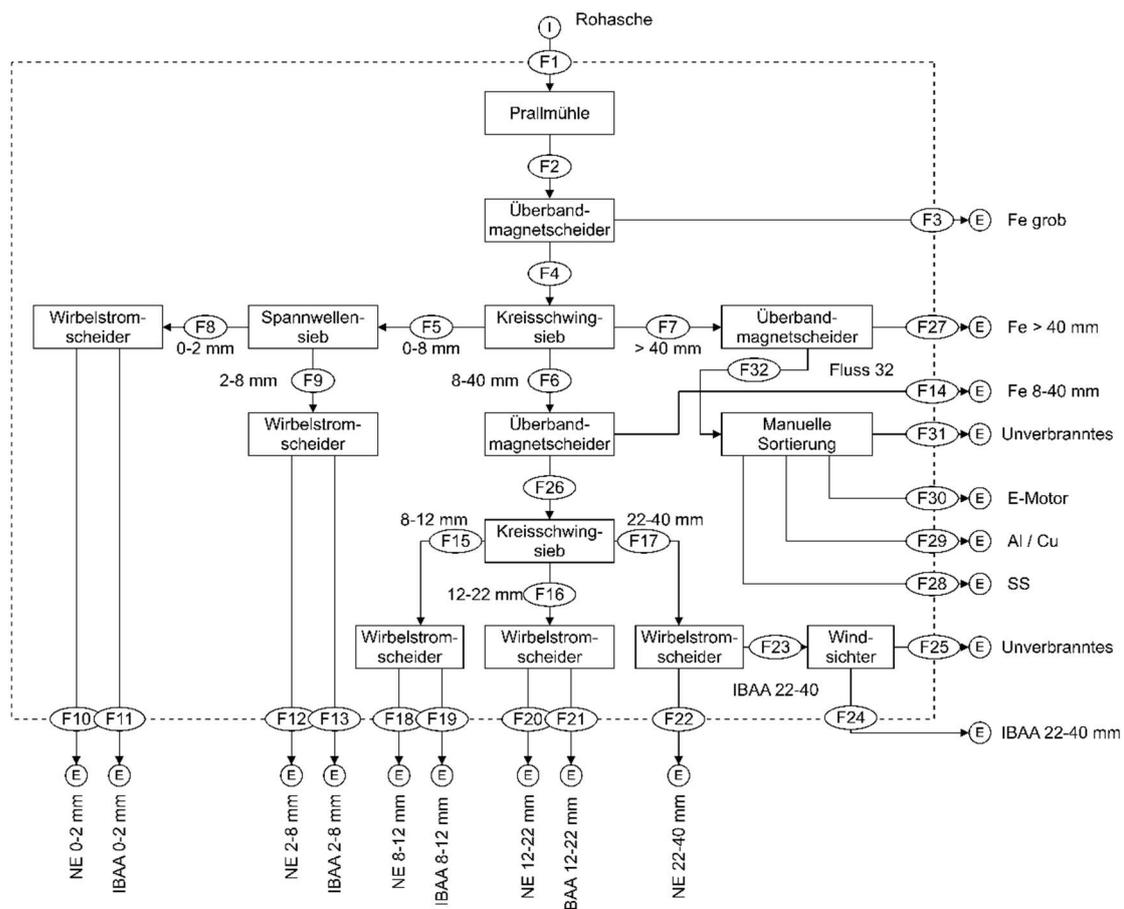


Abbildung 7: Anlagenschema der Aufbereitung im Großmaßstab

Basierend auf den Erkenntnissen aus den Aufbereitungsversuchen im Technikums- und Pilotmaßstab wurden geeignete Aufbereitungsschritte identifiziert, um die Nutzung definierter

Kornfraktionen in Beton zu ermöglichen. Abbildung 8 zeigt vereinfachend den optimierten Aufbereitungspfad mit konventioneller Aufbereitung (in Anlehnung an Abbildung 7) und spezifischer weitergehender Aufbereitung der feinen (0-2 mm) und mittleren (2-8 mm) Kornfraktionen. Die mittlere Fraktion wurde nach der konventionellen Aufbereitung gewaschen und im Anschluss daran einer Metallnachsartierung zugeführt. Für die Feinfraktion wurden zwei mögliche Verwertungswege im Beton in Erwägung gezogen. Zum einen eignet sich die Feinfraktion, um Sand zu substituieren. Für diesen Zweck wurde eine Wäsche betrachtet, um die Sieblinie anzupassen und lösliche Schadstoffe abzureichern. Dieser Aufbereitungsschritt konnte aufgrund der geringen Korngröße nur im Technikumsmaßstab durchgeführt werden. Zum anderen wurde angestrebt, Bindemittel in Betonprodukten durch feine HMV-Aschenfraktion teilweise zu ersetzen. Dafür würde diese Fraktion sowohl im Klein- als auch im Großmaßstab gemahlen. Durch eine anschließende Siebung konnten Restmetalle, die sich nicht zerkleinern ließen, entfernt werden. Für die Nutzung in Betonprodukten wurden im Projekt Fraktionen bis 8 mm Korngröße betrachtet, weshalb gröbere Fraktionen über 8 mm aus der konventionellen Aufbereitung zwar als Grundlage für die Bilanzierung charakterisiert, aber nicht weiter aufbereitet wurden.

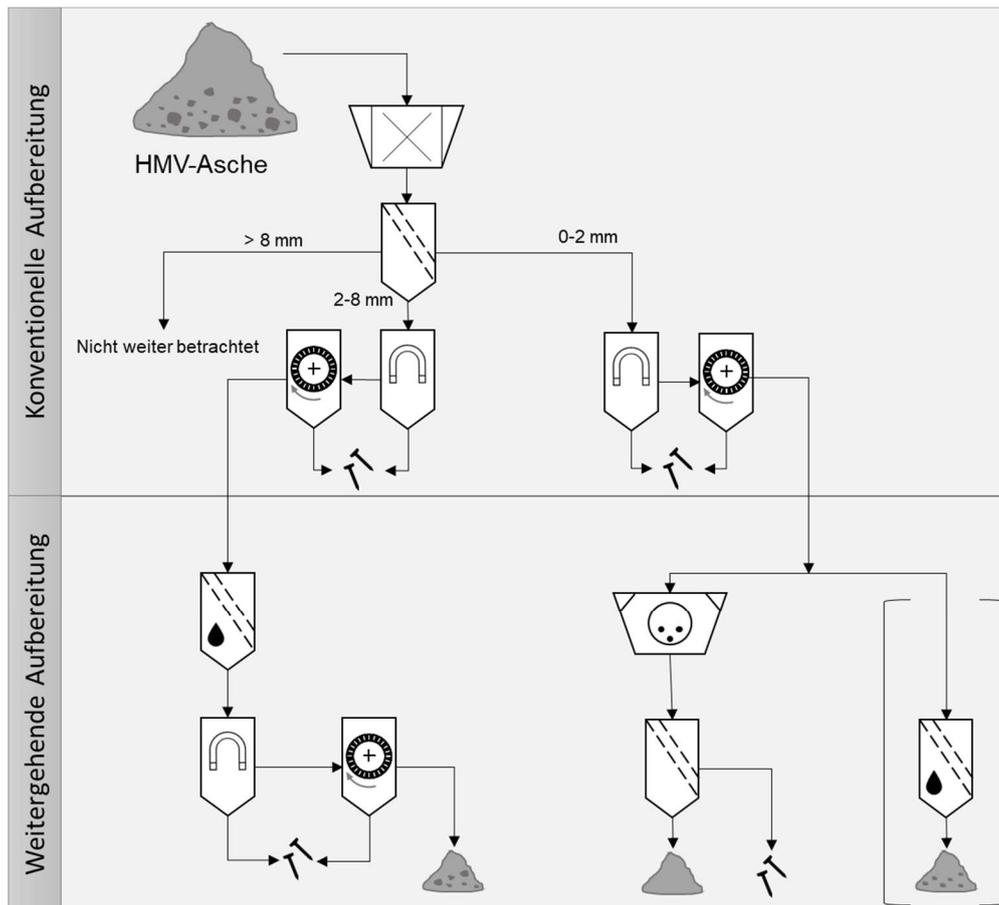


Abbildung 8: Vereinfachtes Schema der gesamten Aufbereitung von HMV-Asche für ihre Nutzung in Betonprodukten

2.2 Bautechnische und bauchemische Charakterisierung der mineralischen Restfraktionen

Mit der abgeschlossenen Aufbereitungskampagne im Großmaßstab wurden wie zuvor die beiden anfallenden, aufbereiteten mineralischen Fraktionen (0-2 mm und 2-8 mm) hinsichtlich der Korngrößenverteilung, des Phasengehalts und des hydraulischen Reaktionspotentials analysiert und – sofern zutreffend – mit den Ergebnissen der im Technikumsmaßstab aufbereiteten Fraktionen verglichen.

Nach der Siebanalyse konnte eine Anpassung der Sieblinie durchgeführt werden, um eine optimale Korngrößenverteilung zu erreichen, damit betontechnologische Anforderungen bei gleichzeitig niedrigem Wasserbedarf erfüllt werden können.

Die Phasengehalte wurden an einzelnen, abgeseibten Fraktionen bestimmt. Mittels Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD) wurden die kristallinen Bestandteile qualitativ und quantitativ bestimmt. Dazu wurden grobe Kornfraktionen auf eine Korngröße $< 400 \mu\text{m}$ vorzerkleinert und anschließend mittels der McCrone Mikronisiermühle auf eine endgültige Partikelgröße von ca. $1\text{--}10 \mu\text{m}$ mittels Nassmahlung durch zylindrische Mahlkörper (Yttrium-stabilisiertes Zirkoniumdioxid) in Ethanol gemahlen. Bei der Phasenanalyse gab es jedoch einige Unsicherheiten, da in den Proben sowohl Phasen enthalten sind, die unverändert aus dem Verbrennungsprozess gekommen sind, als auch Phasen, die durch die Verbrennungsbedingungen umgewandelt wurden. Zur genaueren Unterscheidung der Eisenoxide wurden einzelne Fraktionen der unaufbereiteten 0-2 mm-Fraktion zusätzlich magnetisch separiert und analysiert.

Da nicht nur die Gesteinskörnung, sondern auch Zement als Bindemittel substituiert werden sollte, wurde die Reaktivität der gemahlene 0-2 mm Fraktion mit verschiedenen Verfahren bestimmt. Dabei wurde im Labormaßstab zunächst die entsprechende Fraktion mittels einer Planetenkugelmühle auf eine Korngröße $< 125 \mu\text{m}$ gemahlen. Im weiteren Verlauf des Projekts wurde dann eine größere Menge im industriellen Maßstab für die Verwendung in der Fertigteilproduktion auf Zementfeinheit gemahlen (HMVA-G). Zusätzlich wurde die Reaktivität mittels isothermer Wärmekalorimetrie – welche die bei der Zementhydratation entstehende Wärmemenge registriert – sowie durch nasschemische Titration bestimmt. Für Letzteres wurden die fein aufgemahlene HMV-Asche, sowie Trassmehl als Referenz-Puzzolan jeweils mit Calciumhydroxid und Wasser zu einer pastösen Masse vermischt und in luftdichte Behälter gegeben. An unterschiedlich lang gealterten Proben (1, 3, 7, 14 und 28 Tagen) wurde dann eine charakteristische Teilprobe von der Probe entnommen und mit aufgekochtem destillierten Wasser sowie einem pH-Indikator (Phenolphthalein) versetzt. Die Titration erfolgte mit 1 N Salzsäure bis zum Umschlagspunkt. Mit Hilfe der verbrauchten Menge an Salzsäure wurde so der Gehalt an noch vorhandenem Calciumhydroxid bestimmt. Bei der Reaktion wird freigesetztes Calciumhydroxid durch den puzzolanischen Stoff verbraucht. Die so bestimmte Konzentration nimmt somit bei einem Puzzolan mit der Zeit und mit fortschreitender Hydratation ab. Als weitere Untersuchung zur Feststellung der Reaktivität wurden Normprismen nach DIN EN 196-1 hergestellt und der Zement zu gleichen Teilen in 10%-Schritten (bis zu 40%) einerseits durch die feine HMV-Asche und andererseits durch ebenso feines Quarzmehl (W12 von den Quarzwerken Frechen) ersetzt. Die Prismen wurden

anschließend auf Druck- und Biegezugfestigkeit geprüft. Augenscheinlich ungeschädigte Bruchstücke wurden dann mittels eines Hg-Druckporosimeters (*mercury intrusion porosimetry*; MIP) auf Porenart und -verteilung geprüft.

Die kalorimetrischen Messungen wurden mit einem Wasser/Bindemittel-Wert (w/b-Wert) von 0,5 durchgeführt, wobei verschiedene Substitutionsgrade getestet wurden und stets eine Referenzmessung mit reinem Zement simultan durchgeführt wurde.

Bei alternativen Bindemitteln und Geopolymeren ist es üblich, diese mit alkalischen Stoffen zu aktivieren und das Reaktionspotential zu steigern. Diese Art der Aktivierung wurde auch mit der aufgemahlene HMV-Asche getestet. Dazu wurden in Kalorimeter-Messungen Referenzmessungen mit reinem Zement, sowie verschiedenen Mischungen und verschiedenen Aktivatoren durchgeführt. Als Aktivatoren wurden kaliumhaltiges Wasserglas, Kaliumhydroxid in verschiedenen Molaritäten, sowie gängige Betonzusatzmittel (z.B. Beschleuniger) hinzugegeben.

2.3 Herstellung von Betonprodukten

Aufbauend auf den vorhergehenden Analysen wurden erste Betonrezepturen für werkstofftechnische Untersuchungen entwickelt und diese Labormaßstab hergestellt. In dem Projekt wurden verschiedene potentielle Anwendungsmöglichkeiten von HMV-Aschen in Betonprodukten erörtert. Aufgrund der Einschränkungen bezüglich der Wahl der Ausgangsstoffe bei Betonen nach DIN EN 206/DIN 1045-2 wurde der Fokus auf die Anwendbarkeit der HMV-Aschen in Betonwaren gelegt. Bei Betonwaren wie Pflaster- oder Bordsteine, gibt es keine normativen Einschränkungen bezüglich der Art und Menge der Ausgangsstoffe, so dass nach aktueller Normung bereits heute HMV-Aschen eingesetzt werden dürfen.

In dem Projekt wurde die Herstellung von Pflastersteinen nach DIN EN 1338 mit HMV-Asche präferiert. Pflastersteine können einschichtig oder zweischichtig hergestellt werden. Die zweischichtige Herstellungsweise wird aus ökonomischen wie auch ökologischen Gründen bevorzugt. Die Pflastersteine bestehen dabei aus einer Kernbetonschicht, die maßgeblich für die Festigkeit des Pflastersteins verantwortlich ist und einen dünnen Vorsatzbetonschicht, die für die Optik der Pflasterfläche und die Dauerhaftigkeit der Steine entscheidend ist. In dem Projekt wurde die HMV-Asche in die Kernbetonrezeptur als Ersatz für die Gesteinskörnung wie auch für den Zement eingesetzt. Der Kernbeton macht mit über 75% die Hauptmasse eines Pflastersteins aus. Die Vorsatzschicht blieb unverändert. Die Vorgehensweise inklusive der erfolgten Analysen und Untersuchungen ist in Abbildung 9 skizziert. Die Nutzung von HMV-Asche in Betonpflastersteinen birgt auch in Bezug auf den Absatzmarkt ein großes Potential, da in den letzten fünf Jahren jährlich ca. 115 Mio. m² Betonsteinpflaster in Deutschland verlegt wurden (Statista 2022).

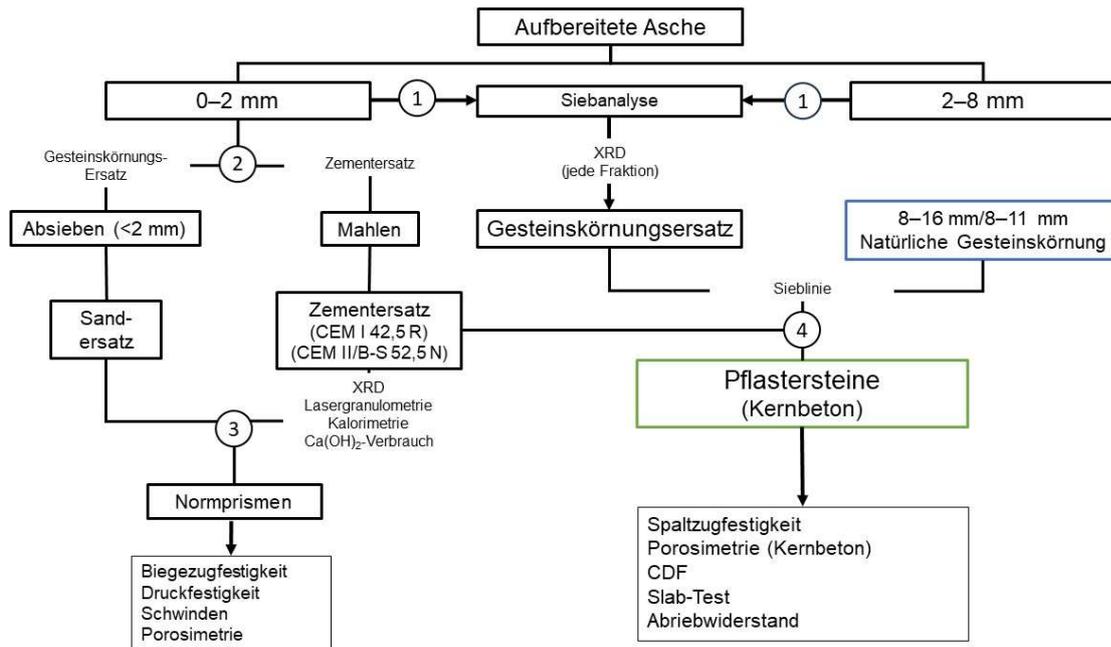


Abbildung 9: Flussdiagramm für das Projekt für die betontechnologischen Untersuchungen. Die Pflastersteine wurden dabei sowohl auf Technikums- als auch auf Großversuchsebene hergestellt

Im kleineren Maßstab wurden zunächst Normprismen hergestellt, bei denen systematisch die Gesteinskörnung (Normsand) durch (abgesiebte) HMV-Asche, sowie der Zement in mehreren Stufen durch aufgemahlene HMV-Asche ersetzt wurde. Aufgrund der wasserabsorbierenden Eigenschaften der HMV-Asche musste im Vergleich zur Herstellung nach Norm der Wassergehalt leicht erhöht werden, um eine Verarbeitungskonsistenz nach Norm zu erzielen. Der Fokus der Untersuchungen lag auf der Bestimmung der Druck- und Biegezugfestigkeiten. Des Weiteren wurde die Porosität mittels MIP, sowie die Formänderung an Schwindprismen bestimmt. Zusätzlich wurde an einem Bruchstück eines Normprismas, bei dem 100% Normsand und 40% des Zementes durch HMV-Asche ersetzt wurde, eine μ -CT-Messung durchgeführt. Durch diese Messung konnten dreidimensional Dichtekontraste abgebildet werden, die Aufschluss über die Verteilung von Luftporen und Metallen innerhalb der Probe gaben. Ein Normprisma mit Zement und Normsand diente dabei als Referenz-Probekörper.

Auf Basis der Ergebnisse konnten dann in Anlehnung an die Referenzrezepturen des Betonwarenherstellers Rezepturen entwickelt werden, die zusätzlich neben der 0-2 mm-Fraktion ebenfalls die 2-8 mm-Fraktion beinhalten. Die im Labormaßstab entwickelten Rezepturen weichen von den späteren Rezepturen ab, die für die Herstellung von Pflastersteinen verwendet wurden. Auf die entsprechenden Gründe wird in den entsprechenden Kapiteln eingegangen. Hauptsächlich beruhte dies auf der notwendigen Anpassung der Verarbeitungskonsistenz zwischen Labor und Werk. Für eine ausreichende Verdichtung durch Vibration musste der Beton im Labor deutlich weicher eingestellt werden als im Werk des Pflastersteinherstellers. Die Verdichtung im Werk erfolgt mit einem Rüttelpressverfahren, wobei Betone mit erdfeuchter Konsistenz verwendet werden. Die hergestellten Probekörper wurden hinsichtlich ihrer betontechnologischen Eigenschaften mit Referenzmischungen aus Normalbeton verglichen und die Rezepturen für die

Anwendungszwecke angepasst. Angefertigte Probekörper wurden als Rückstellproben für die spätere Analyse und Auswertung der Dauerhaftigkeit zurückgestellt.

Zunächst wurden im Technikumsmaßstab ein- und zweischichtige (Kernbeton und Vorsatzschicht) Pflastersteine hergestellt, mit dem Ziel die Rezeptur zu optimieren, vorerst ohne den Zement zu substituieren. In den Werksversuchen wurden dann zweischichtige Pflastersteine hergestellt, bei denen in verschiedenen Anteilen die HMV-Asche als Gesteinskörnungs- aber auch als Zementersatz eingesetzt wurde. Vor den Großversuchen wurde die 2-8 mm-Fraktion auf einer Kieswaschanlage im Kieswerk der Firma Kimm gewaschen und anschließend nachträglich aufbereitet und weitestgehend von Metallen befreit.

Da als Anwendungszweck für den Einsatz der HMV-Aschen Pflastersteine ausgewählt wurden, erfolgte die Bewertung der Eigenschaften nach den in der DIN EN 1338 vorgeschriebenen Prüfverfahren. Dazu zählen die Spaltzugfestigkeit, der Abrasionswiderstand (mechanischer Verschleiß) nach Böhme, sowie die Frostbeständigkeit (bestimmt mittels Slab- und CDF-Test (capillary suction of de-icing solution and freeze thaw test)), womit auch gleichzeitig die Wasseraufnahme bestimmt wird. Der CDF-Test ist nicht Bestandteil der DIN EN 1338, wird aber bauordnungsrechtlich in Hessen gefordert, so dass er auch in diesem Projekt angewendet wurde. In der Regel stellt der CDF-Test eine größere Belastung als der Slab-Test dar, weshalb vorrangig die Ergebnisse der CDF-Tests vorgestellt werden. An Kernbeton-Reststücken wurden bei allen sechs Serien analog zu den Normprismen für die Testung der Puzzolanität Porositätsmessungen durchgeführt.

2.4 Schadstoffpotential, Materialflussanalyse und Ökobilanzierung

2.4.1 Elutionsversuche zur Bestimmung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen

Im vierten Arbeitspaket (AP 4) wurden Elutionsversuche zur Beurteilung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen in den Pflastersteinen durchgeführt. Drei Pflastersteinmischungen und eine Referenzmischung wurden zunächst mit einem Backenbrecher zerkleinert und anschließend gesiebt, um drei Kornfraktionen (0-2 mm, 2-8 mm, 8-32 mm) zu generieren. Tabelle 1 zeigt die Zusammensetzung der untersuchten Pflastersteinmischungen. Die drei Kornfraktionen wurden mit einem W/F-Verhältnis von 2 l/kg nach DIN 19529 eluiert. Die Eluatanalyse erfolgte in einem externen Labor.

Tabelle 1: Zusammensetzung der Pflastersteine (Angaben beziehen sich auf die Mischungsmenge für die Produktion in der Pflastersteinmaschine) für die Untersuchung des Schadstoffaustragspotentials

Bestandteil	Einheit	Ref	M1 <i>rot</i>	M2 <i>schwarz</i>	M4 <i>gelb</i>
Zement	kg	180	180	160	160
Gemahlene HMV-ASCHE	kg	0	0	20	20
Sand 0/2 mm	kg	885	885	885	0
HMV-ASCHE 0/2 mm	kg	0	0	0	776,4
Kies 2/8 mm	kg	673	0	0	0
HMV-ASCHE 2/8 mm	kg	0	673	673	722
Wasser	l	125	76	80	130

2.4.2 Material- und Energiebilanzierung

Des Weiteren wurden Stoff- und Energiebilanzen für die untersuchten Aufbereitungs- und Verwertungsschritte basierend auf den Untersuchungsergebnissen erstellt. Hierfür wurden Materialflussmodelle nach der Methode der Material- und Stoffflussanalyse (MFA) (Brunner und Rechberger 2017) mithilfe der Software STAN (<https://www.stan2web.net/>) erstellt. Bilanziert wurden drei unterschiedliche Aufbereitungs- und Verwertungsrouten für die HMV-Asche (Abbildung 10).

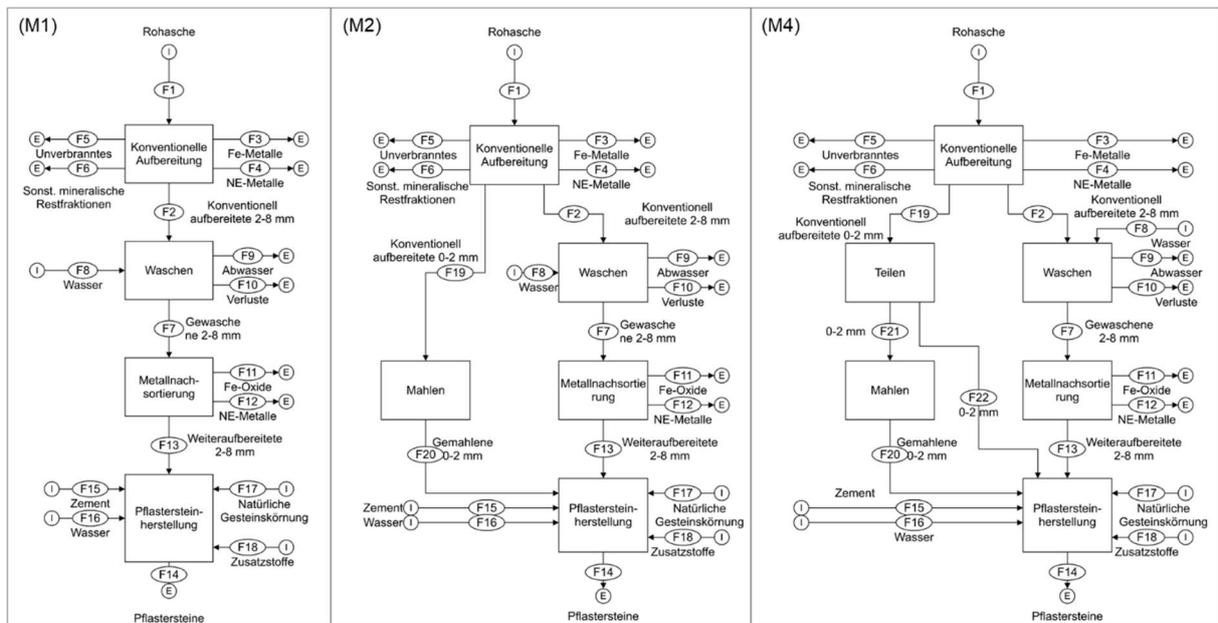


Abbildung 10: Übersicht der untersuchten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten

Die Energiebilanzen basieren auf dem Energieverbrauch der Anlagen zum einen (Aufbereitungsanlagen, Herstellung der Pflastersteine) und zum anderen auf den Energieverbrauch verursacht durch den Transport der Materialien. Die zugrundeliegenden Daten sind in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt und ergaben sich aus den genutzten Anlagen im Rahmen des Projektes.

Tabelle 2: Energieverbrauchsdaten

Schritt	Durchsatz	Stromverbr auch	Dieselverb rauch
	t/h	kWh/t	l/t
Konventionelle Aufbereitung	114,45	-	1,16
Waschen der 2-8 mm Fraktion	30,00	0,67	0,04
Mahlen im Großmaßstab	0,13	30	-
Nachsartieren der 2-8 mm Fraktion	10,00	-	0,92
Pflastersteinherstellung	5,14	3,8	-

Tabelle 3: Transportentfernungen

Nr.	Transportweg	Einfache Strecke	Status quo	M1 rot	M2 schwarz	M4 gelb
		km				
1	MHKW Kassel → konventionelle Aufbereitung	16,2	x	x	x	x
2	Konv. Aufbereitung → Pflastersteinherstellung	34,4				x
3	Konv. Aufbereitung → Nachsortierung	304		x	x	x
4	Konv. Aufbereitung → Mahlung	329			x	x
5	Nachsortierung → Pflastersteinherstellung	322		x	x	x
6	Mahlung → Pflastersteinherstellung	348			x	x
7	Konv. Aufbereitung → Verwertung Ersatzbaustoff	7,2	x			
8	Konv. Aufbereitung → Deponieersatzbaustoff, Beseitigung	32,3	x			

2.4.3 Ökobilanzierung

Die Material- und Energiebilanzen der Verwertungsketten (Kapitel 2.4.2) stellen in weiterer Folge die Grundlage für die ökologische Bewertung im Rahmen der Ökobilanzierung dar. Für die drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten (Abbildung 10) sowie für ein Status-Quo-Szenario wurde eine grobe Ökobilanz in Anlehnung an (DIN EN ISO 14044) erstellt. Als funktionale Einheit wurde im Rahmen der Ökobilanz die Aufbereitung und Verwertung von einer Tonne Hausmüllverbrennungsrohmasche gewählt. Die Ökobilanz wird unter Berücksichtigung vor- und nachgelagerter Prozesse (z.B. Strombereitstellung, Sand- und Kieserzeugung, Zementproduktion usw.) erstellt, wobei das Vordergrundsystem der Darstellung in Abbildung 10 entspricht und vom Austrag der Rohmasche am MHKW Kassel bis zur Herstellung von Produkten bzw. bis zur Emission in die Umwelt reicht. Zur Berücksichtigung von Ko-Produktion (z.B. Bindemittlersatz, Ersatzgesteinskörnung, Sekundärmetallprodukte aus Schrott aus der Sortierung usw.) wurde ein subtraktiver Systemerweiterungsansatz genutzt, indem die vermiedene alternative Produktion für die Ko-Produkte als Gutschrift in der Bilanzierung berücksichtigt wurde (ILCD Handbook 2010).

Im Rahmen der Wirkungsabschätzung wurden unterschiedliche Wirkungskategorien nach der ReCiPe-Methode berücksichtigt: Treibhausgaspotential (GWP100), terrestrisches Versauerungspotential (TAP), Ökotoxizität (Ecotoxicity) und Humantoxizität (HTPc, HTPnc). Darüber hinaus wurde der kumulierte Energiebedarf (CED) ausgewertet. Abgesehen von den im Rahmen des Projekts generierten und erhobenen Daten zum Vordergrundsystem wurden Datensätze zu weiteren Prozessen im Hintergrundsystem aus der Datenbank Ecoinvent v.3.9.1 genutzt.

Das Status-quo-Szenario berücksichtigt die konventionelle Aufbereitung von HMV-Asche (entsprechend der mobilen Aufbereitung bei der BAUREKA) und die anschließende Verwertung in Anlehnung an den Angaben von ITAD e.V. (Tabelle 4). Für die weiteren Szenarien (M1, M2 und M4) werden die aufbereiteten Fraktionen 2-8 mm und / oder 0-2 mm

in Pflastersteinen verwertet und nicht verwertbare Fraktionen wie in Tabelle 4 angegeben, verwertet oder beseitigt.

Tabelle 4: Aktuelle Verwertungswege der HMV-Asche (Quelle: (ITAD 2023))

Verwertungsweg	Anteil
Ersatzbaustoff (z.B. im Straßenbau)	16,9%
Deponieersatzbaustoff	64,3%
Beseitigung	18,8%

Die für die weitergehende Aufbereitung genutzten Anlagen lagen über 300 km weit weg und wurden nur aufgrund des Pilotcharakters der durchgeführten Aufbereitungsschritte ausgewählt (s. Tabelle 3). Im Rahmen einer potenziellen Umsetzung der Verfahrenskette würden diese Aufbereitungsschritte aber ebenfalls in der Region stattfinden. Aus diesem Grund wurden die drei Aufbereitungs- und Verwertungsszenarien (M1, M2 und M4) hinsichtlich des Transports optimiert betrachtet. Es wurde im Rahmen eines entsprechenden regionalen Szenarios angenommen, dass die weitergehende Aufbereitung beim Projektpartner BAUREKA und die Mahlung der Feinfraktion beim Projektpartner KIMM stattfinden könnte. Die Transportentfernungen aus Tabelle 3 ändern sich dadurch für die Nummern 3 und 6 auf 0 km und für die Nummern 4 und 5 auf 34,4 km.

Schließlich erfolgt neben der Bewertung der Verwertungskette auch eine Bilanzierung aus produktperspektive für einen erzeugten Betonpflasterstein. Für diese Betrachtung wird die funktionale Einheit entsprechend auf die Bereitstellung eines Betonpflastersteins (mit ausgewählten Rezepturen) angepasst.

3 Projektergebnisse

3.1 Charakterisierung und Aufbereitung

3.1.1 Charakterisierung der HMV-Aschen

Die Ergebnisse der Charakterisierung der HMV-Asche (AP 1) werden im Folgenden zusammenfassend vorgestellt.

Die Korngrößenverteilung der untersuchten HMV-Asche ist in Abbildung 11 dargestellt. Die Feinfraktion < 2 mm der HMV-Asche beträgt 17,8%. Der Anteil der Feinstfraktion < 0,25 mm beträgt 3,4%. Die Kornfraktion 2 - 8 mm, die potentiell als Gesteinskörnung in Betonprodukten nutzbar ist, liegt bei 24,2%. Die restliche Grobfraktion > 8 mm beträgt 58%.

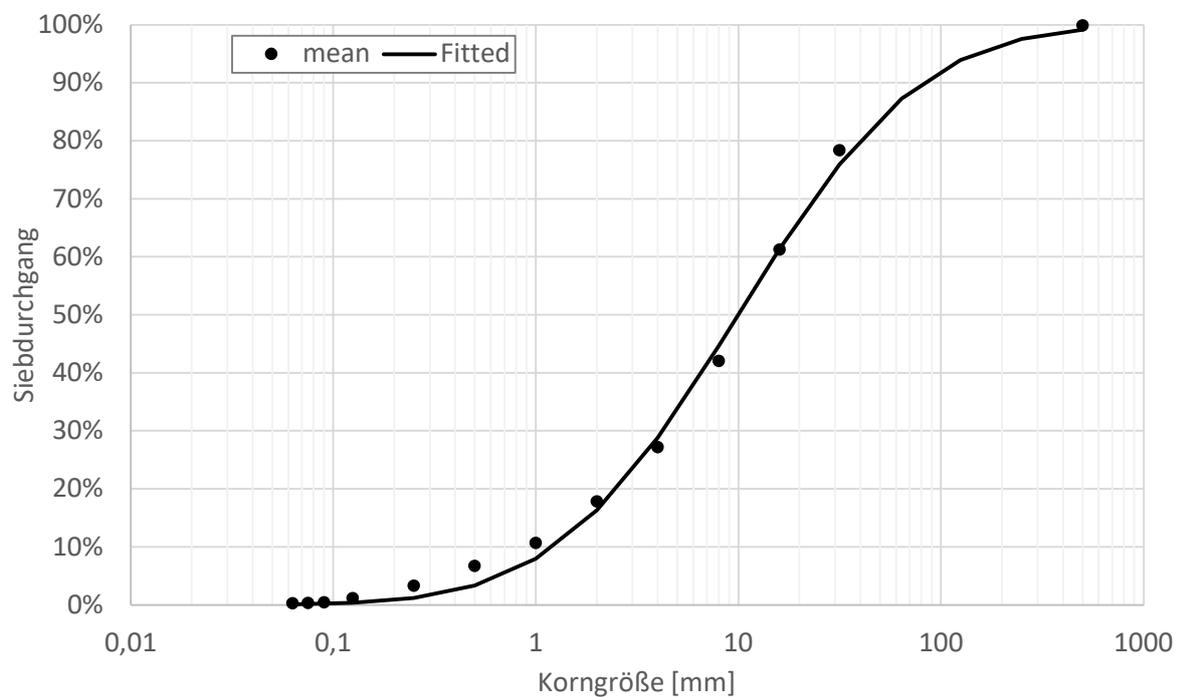


Abbildung 11: Kumulative Korngrößenverteilung der untersuchten frischen HMV-Asche

Die manuelle Sortierung der frischen HMV-Asche hat ergeben, dass die HMV-Asche über 2 mm aus 12,6% Fe-Metallen, 2,0% NE-Metallen, 8,7% Glas, 0,3% unverbrannten Bestandteilen und 76,3% mineralischen Bestandteilen besteht. Die Verteilung dieser Bestandteile in den unterschiedlichen Korngrößen ist in Abbildung 12 dargestellt. Die Materialzusammensetzung der Kornfraktion < 2 mm ist nicht bekannt, da in diesem Korngrößenbereich eine manuelle Sortierung nicht möglich ist.

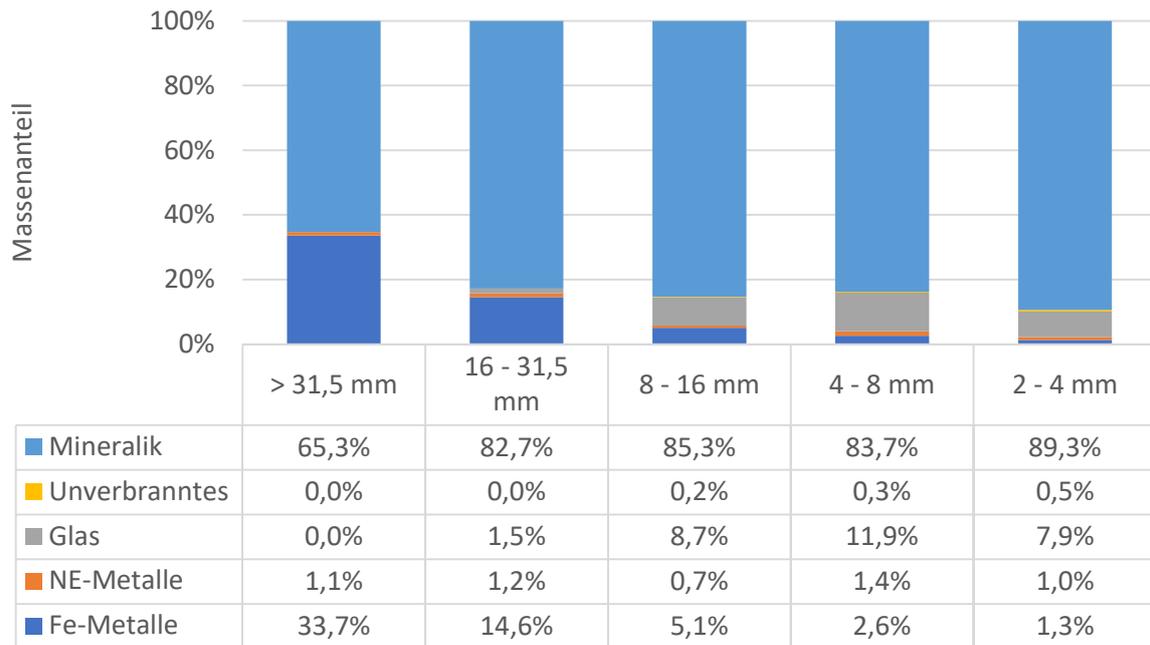


Abbildung 12: Materialzusammensetzung der rohen HMV-Asche in Abhängigkeit der Korngröße

Bei der Bestimmung der Feststoffgehalte der HMV-Asche aus dem MHKW Kassel wurden als Hauptelemente Ca, Si, Fe und Al festgestellt. Die Konzentrationen an Si, Fe und Al steigen mit zunehmender Korngröße, während die Konzentration an Ca mit zunehmender Korngröße abnimmt.

Das metallische Al im Korngrößenbereich < 8 mm beträgt im Schnitt 2,7%. Die höchsten Konzentrationen wurden in den Kornfraktionen 1-2 mm und 2-4 mm festgestellt (vgl. Abbildung 13). Bei Nutzung der HMV-Asche in Betonprodukten reagiert das darin enthaltene metallische Al im alkalischen Milieu und bildet dabei Wasserstoffgas (Gl. 1). Dieses kann zu Volumenvergrößerung und Abplatzung im Beton führen (Müller und Rübner 2006). Aus diesem Grund gilt es das metallische Aluminium aus der HMV-Asche weitestgehend zu entfernen.

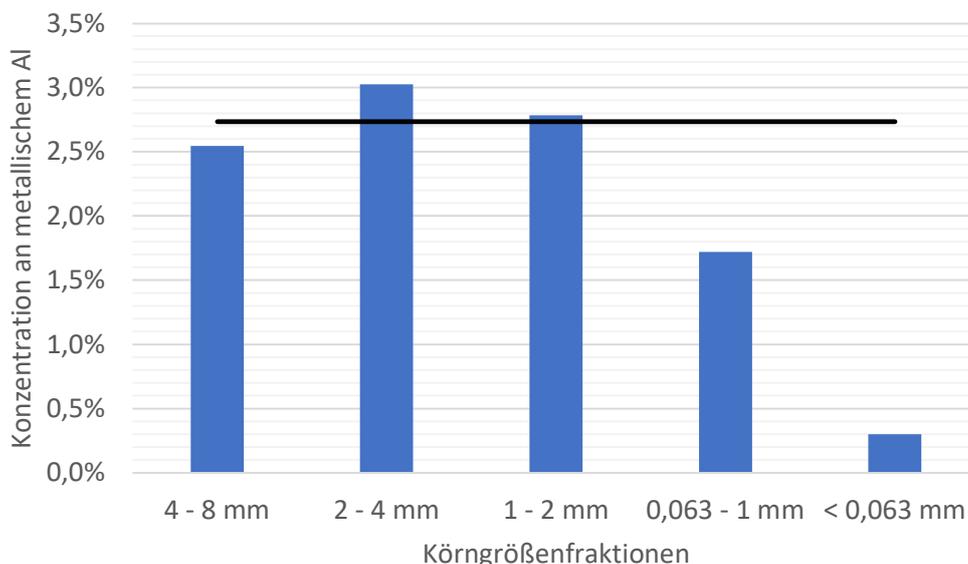


Abbildung 13: Konzentration an metallischem Aluminium für die Korngrößen unter 8 mm

Die Konzentrationen an Chlorid, Sulfat, Cu, Mo, Sb, V, Pb, Zn, As, Cd und Cr im Eluat in Abhängigkeit von der Korngröße sind in Abbildung 14 bis Abbildung 19 sowie die Grenzwerte nach der Ersatzbaustoffverordnung (BMUV 09.07.2021) dargestellt. Die Ersatzbaustoffverordnung regelt die Verwertung von HMV-Asche in technischen Bauwerken durch Grenzwerte für zwei Materialklassen (HMVA-1 und HMVA-2) und ist am 01.08.2023 in Kraft getreten. Die Grenzwerte für Chlorid und Sulfat werden für die Materialklasse HMVA-2 für alle Korngrößen eingehalten. Chrom und Kupfer halten den Grenzwert HMVA-2 bis auf die Feinstfraktion < 0,25 mm ebenfalls ein. Antimon und Vanadium stellen in im Fall der untersuchten HMV-Asche kein Hindernis für ihre Verwertung dar. Molybdän im Eluat überschreitet jedoch den Grenzwert in allen untersuchten Korngrößen.

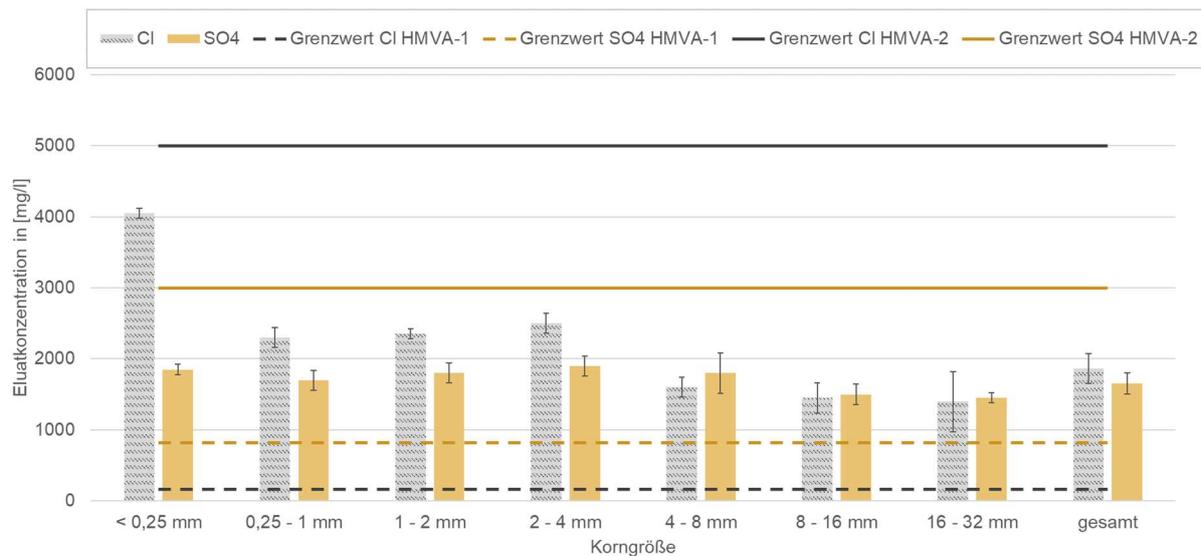


Abbildung 14: Konzentration an Salzen im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg

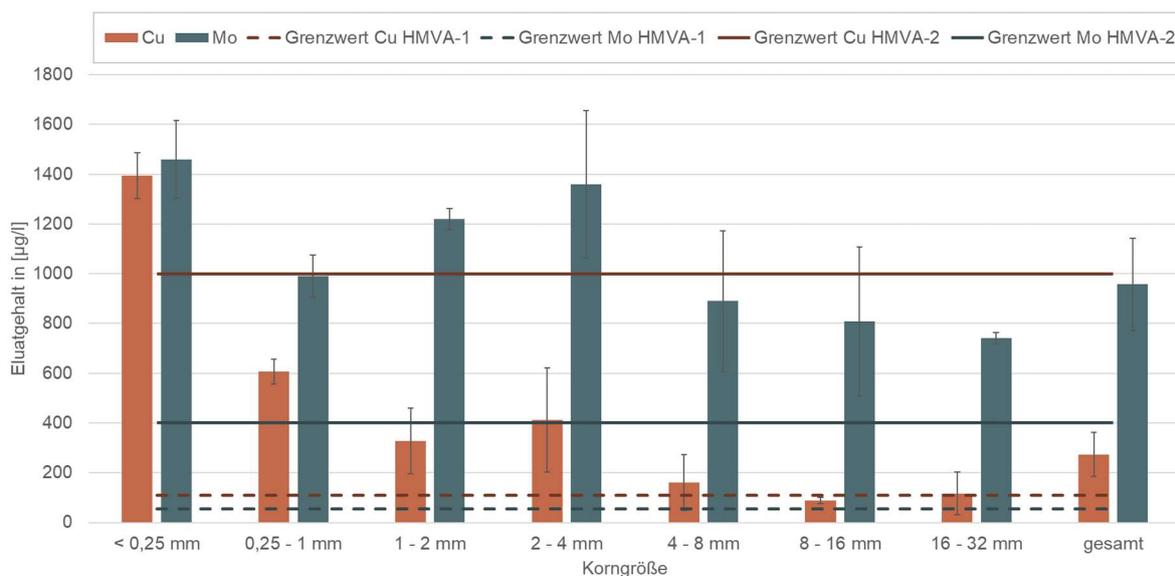


Abbildung 15: Konzentration an Cu und Mo im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg

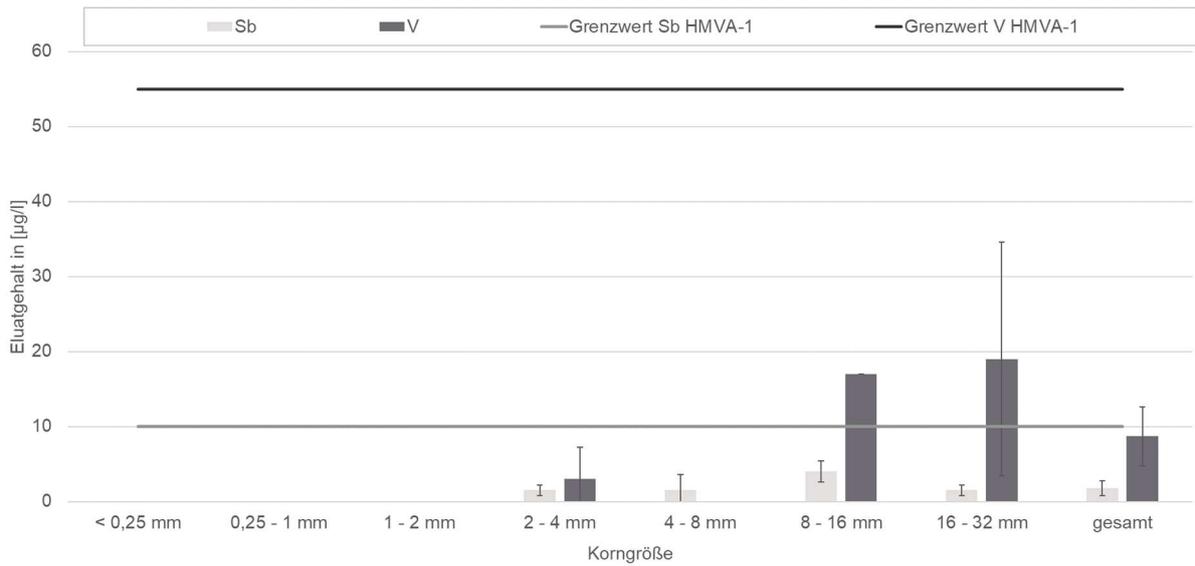


Abbildung 16: Konzentration an Sb und V im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg

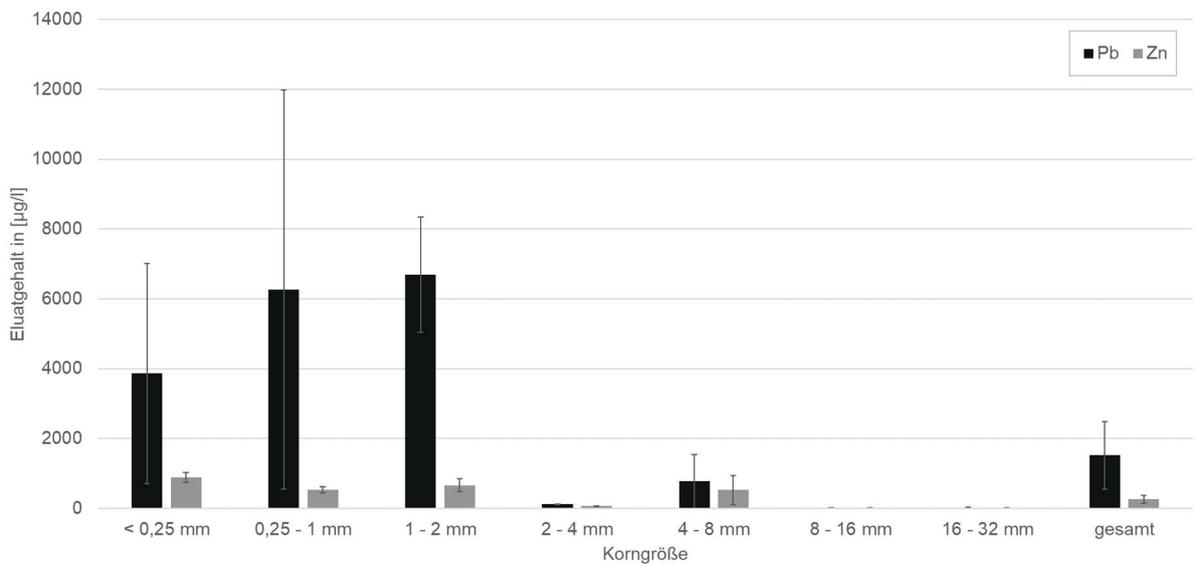


Abbildung 17: Konzentration an Pb und Zn im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg

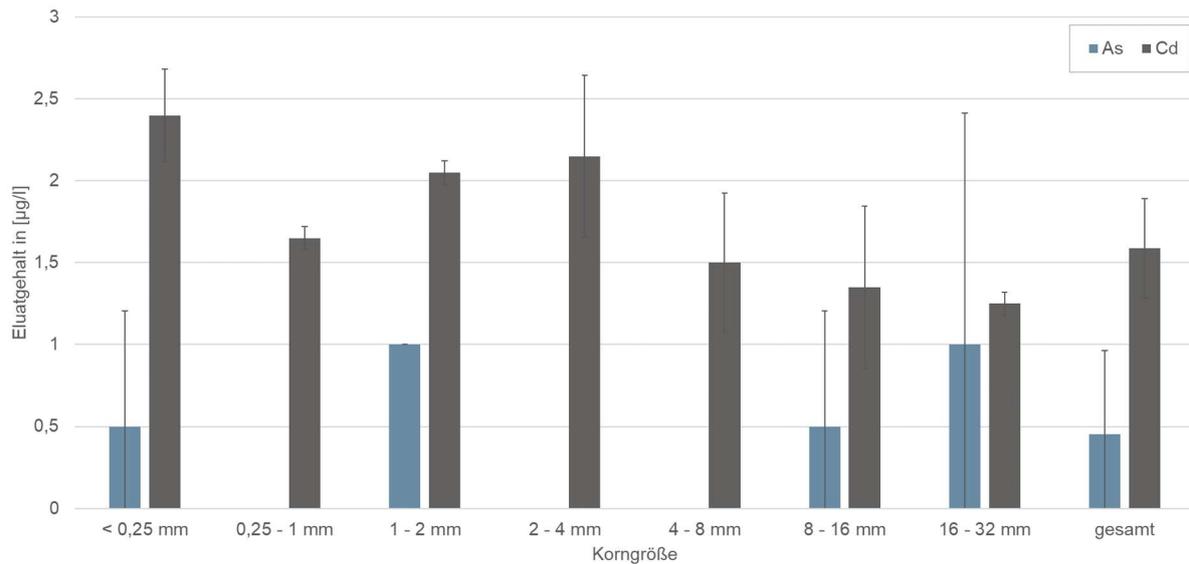


Abbildung 18: Konzentration an As und Cd im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg

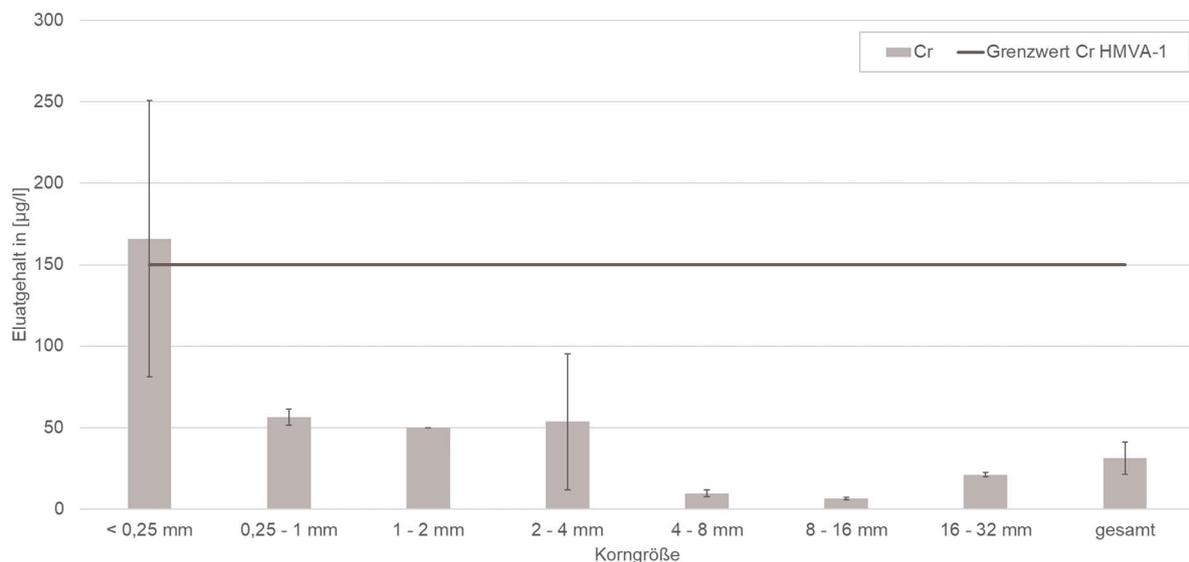


Abbildung 19: Konzentration an Cr im Eluat, hergestellt mit einem WF-Verhältnis von 2 l/kg

Die HMV-Asche wurde auch nach Veränderung der Verbrennungsbedingungen des MHKW Kassel betrachtet. Variable Größen waren die Sauerstoffkonzentration der Verbrennungsluft und die Aufenthaltsdauer auf dem Verbrennungsrost. Die Proben wurden vom MHKW Kassel zur Verfügung gestellt. Die Charakterisierung der Proben ließ jedoch keine signifikanten Unterschiede zu der HMV-Asche aus den normalen Verbrennungsbedingungen erkennen.

Die Ergebnisse der Charakterisierung der gealterten HMV-Asche werden in Kapitel 3.1.3 dargestellt.

3.1.2 Aufbereitung im Technikumsmaßstab

Mit der selbst gebauten Setzmaschine konnte eine leichte Abreicherung des Aluminiums in der 2 – 4 mm Fraktion erreicht werden. Jedoch bildete sich keine scharf definierte Grenze zwischen den Schichten des Leicht- und Schwerguts aus, was wiederum einen effektiven Austrag der ab- und angereicherten Fraktionen verhindert. Im Gegensatz zu den Versuchen

mit der selbstgebauten Setzmaschine konnte das Schwer- und Leichtgut mit dem Setztisch problemlos voneinander unterschieden und ausgetragen werden (Abbildung 4 rechts). Während die Schwermetalle in der Schwerfraktion angereichert wurden, war eine Abtrennung des metallischen Aluminiums von der mineralischen Fraktion mit diesem Aggregat jedoch nicht möglich. Deshalb wurde der Setztisch für zusätzliche Schritte zur Al-Separation nicht weiter in Betracht gezogen.

Mit der Selfrag-Anlage konnte keine signifikante Freilegung der Metalle gegenüber der Ausgangsprobe erreicht werden. Es wurde beobachtet, dass je höher die Spannung, desto höher war die elektrische Leitfähigkeit des Wassermediums. Dies deutet darauf hin, dass eine Lösung der Salze stattgefunden hat. Mit der Spannung wurden aber auch die HMV-Asche-Proben stärker zerkleinert, was einen Nachteil für den Einsatz als sekundäre Gesteinskörnung darstellt.

Mit dem sequentiellen Mahlen und Sieben lässt sich die Korngröße der HMV-Asche reduzieren und gleichzeitig können zusätzlich Metalle, insbesondere Aluminium, aus der gemahlene Asche entfernt werden (Abbildung 20).

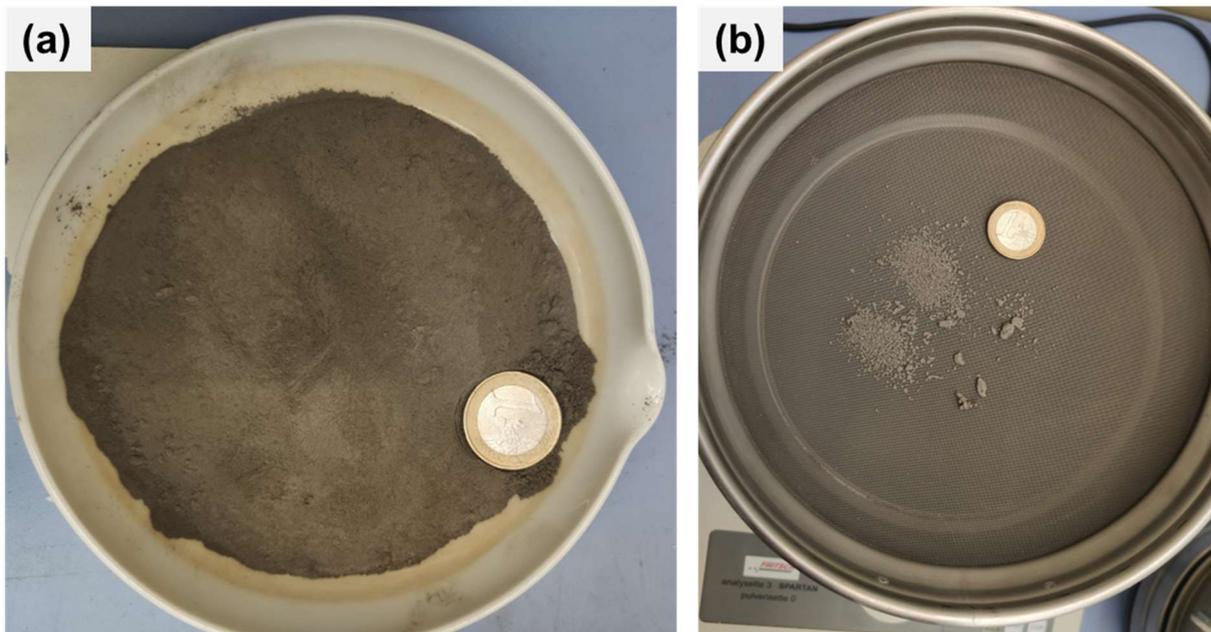


Abbildung 20: Gemahlene Feinfraktion (a) und davon abgesiebte Metalle (b)

In der gemahlene ($< 125 \mu\text{m}$) HMV-Asche konnten durch die Wasserstoffgasmethode noch geringe Restgehalte an metallischem Aluminium von 0,3% festgestellt werden. Abbildung 21 zeigt deutlich, dass das metallische Al nach jeder Mahlstufe ungleichmäßig verteilt ist. Trotz der homogenen Korngröße ist die gemahlene HMV-Asche hinsichtlich des metallischen Aluminiums heterogen. Möglicherweise werden feine in der Mineralmatrix eingeschlossene Al-Partikel durch die stufenweise Mahlung freigelegt und somit reaktionsfähig gemacht.

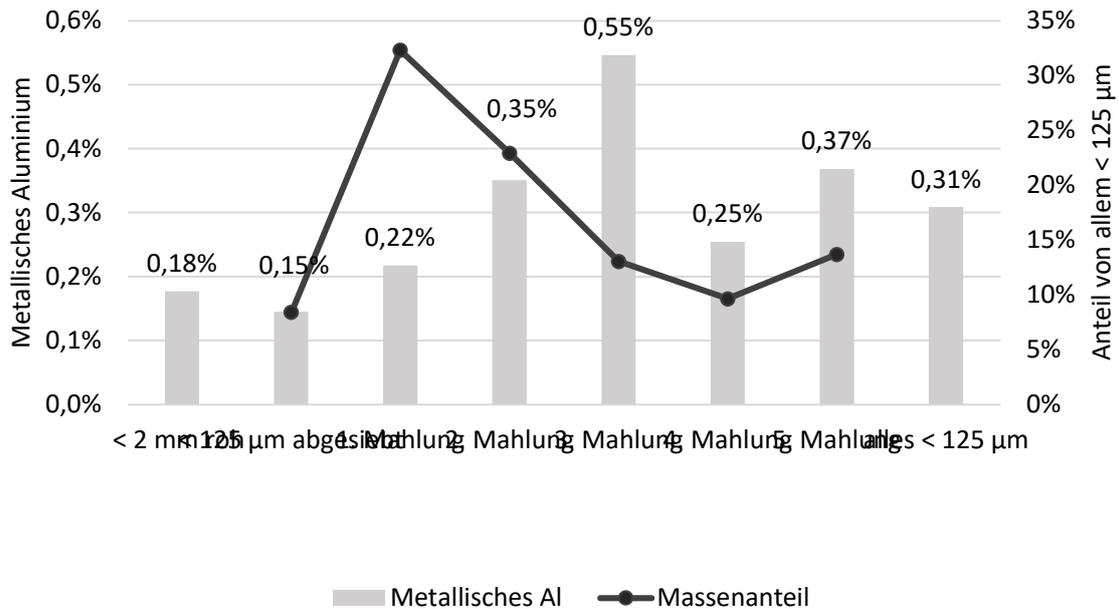


Abbildung 21: Verteilung des metallischen Aluminiums nach jeder Mahlstufe

3.1.3 Aufbereitung im Pilotmaßstab

Im Rahmen des Aufbereitungsversuchs mit der erweiterten mobilen Anlage im Vollmaßstab wurde der Input sowie die Outputströme beprobt und charakterisiert. In den Abbildungen 17 bis 19 sind die Korngrößenverteilung und die Metallkonzentrationen in der gealterten, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche dargestellt.

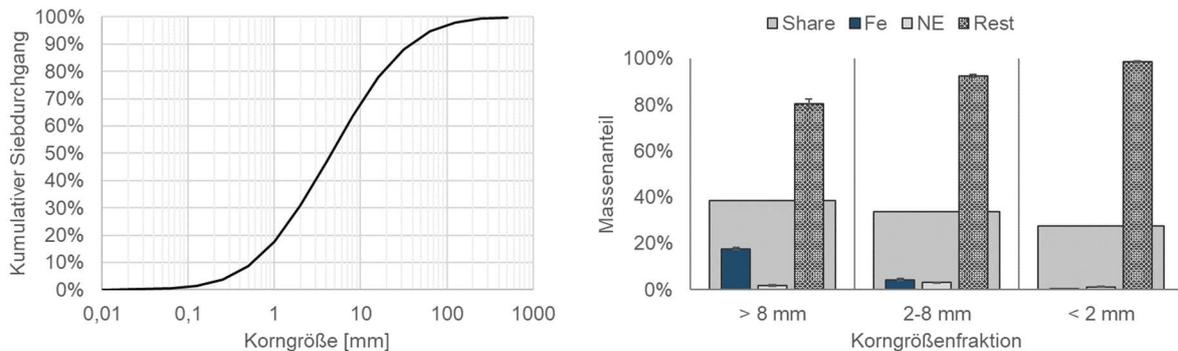


Abbildung 22: Korngrößenverteilung und Materialzusammensetzung der gealterten nicht aufbereiteten HMV-Asche

Die konventionell aufbereitete Feinfraktion ist deutlich feiner als Sand, der z.B. in Pflastersteinen eingesetzt wird (Abbildung 23). Durch die größere innere Oberfläche ergibt sich einen erhöhten Wasseranspruch bei Nutzung dieser feineren Fraktion als Sandersatz in Betonprodukten, was niedrigere Festigkeiten zur Folge hat. Abbildung 23 zeigt, dass nach Mahlung der Feinfraktion ihre Korngrößenverteilung der von Zement ähnelt. Eine Veränderung der Korngrößenverteilung durch Waschen konnte nicht festgestellt werden. Nach der konventionellen Aufbereitung befinden sich 0,6% Fe-Metalle und 1,3% NE-Metalle in der Feinfraktion. Durch das sequentielle Mahlen und Sieben konnten alle Fe-Metalle entfernt

werden. Die NE-Metalle konnten um 76% reduziert werden. Die verbleibenden 0,3% NE-Metalle bestehen hauptsächlich aus Aluminium.

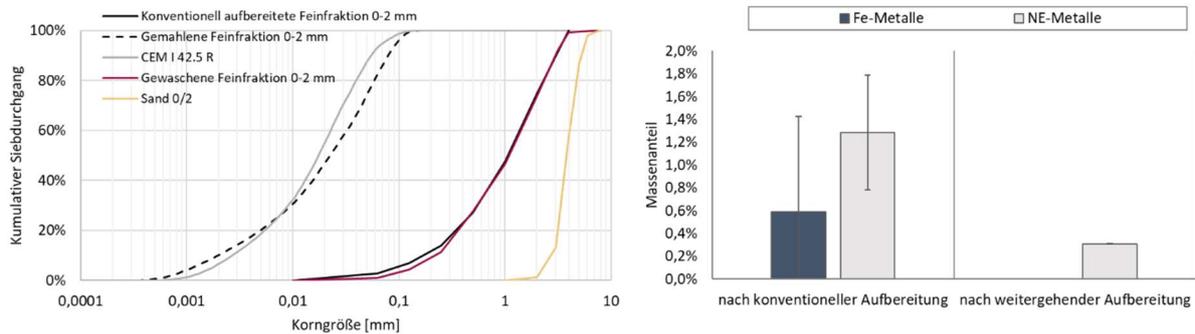


Abbildung 23: Korngrößenverteilung und Metallkonzentration in der Feinfraktion nach konventioneller und weitergehender Aufbereitung

Nach dem Waschen und Nachsortieren der Metalle ist die mittlere Fraktion 2-8 mm etwas feinkörniger gegenüber der konventionellen Aufbereitung (Abbildung 24). Das liegt v.a. an der zusätzlichen Metallabtrennung. Durch die Metallnachsortierung in der mittleren Fraktion konnten die Fe-Metalle um knapp 97% und die NE-Metalle um 54% reduziert werden. An dieser Stelle ist zu erwähnen, dass die Sortieraggregate so eingestellt wurden, dass eine möglichst hohe Qualität der mineralischen Fraktion erreicht werden konnte. Dadurch wurden auch Verbundpartikel mit hohem mineralischen Anteil verstärkt in der Metallfraktion ausgetragen, wodurch diese relativ hohe Fremdstoffgehalte aufweist und somit ihre Qualität sinkt. Dementsprechend ist eine Aufbereitung bzw. Aufreinigung der Metallfraktion notwendig bevor Metalle wieder eingeschmolzen werden können.

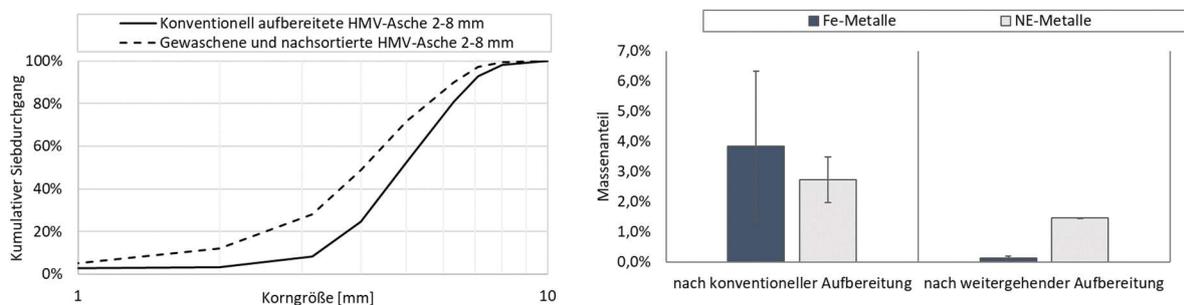


Abbildung 24: Korngrößenverteilung und Metallkonzentration in der mittleren Fraktion nach konventioneller und weitergehender Aufbereitung

In Abbildung 25 und Abbildung 26 sind die Eluatkonzentrationen der löslichen Salze und Schwermetalle in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche dargestellt. Daraus ist erkennbar, dass die Konzentration der meisten löslichen Parameter durch die konventionelle Aufbereitung reduziert werden konnte. Nichtsdestotrotz wäre eine Verwertung im Sinne der Ersatzbaustoffverordnung (EBV) aufgrund der Überschreitung der Grenzwerte für z.B. Chrom und Molybdän (Abbildung 26) nicht möglich. Die EBV lässt in der Anlage 6 eine gewisse Überschreitung der Grenzwerte zu. Für die Metalle (z.B. Mo und Cr) beträgt die zulässige Überschreitung 50%. Das bedeutet, dass die gröberen Fraktionen über 8 mm nach Berücksichtigung dieser zulässigen Überschreitung verwertet werden dürften, z.B. als Unterbau oder hydraulisch gebundene Tragschicht unter gebundenen Deckschichten.

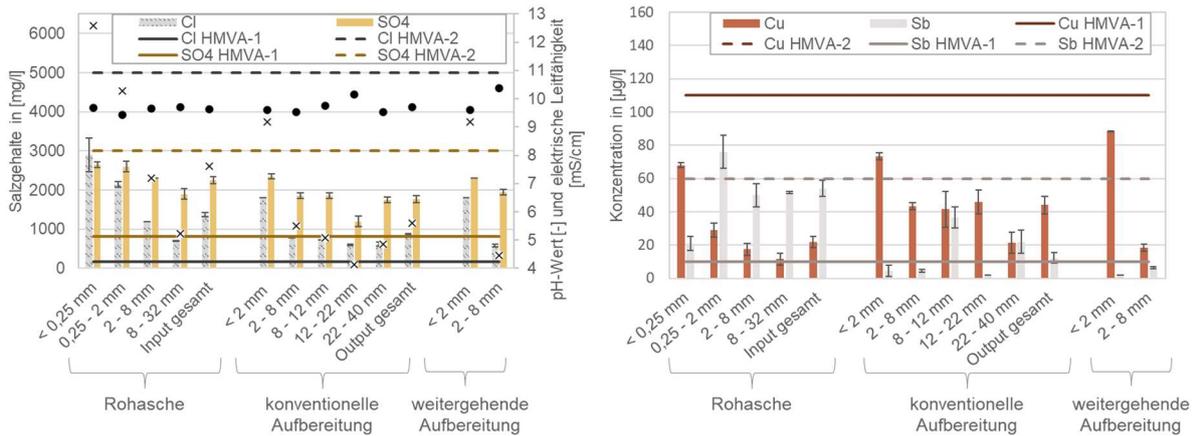


Abbildung 25: Veränderung der löslichen Salze und Schwermetalle Cu und Sb in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche

Cr lässt sich durch die weitergehende Aufbereitung signifikant reduzieren, während die beobachtete Reduktion des löslichen Mo deutlich niedriger ist. Die Löslichkeit von Elementen wie Cu, Sb oder V ist unkritisch in Bezug auf die Verwertung der HMV-Aschen im Sinne der EBV.

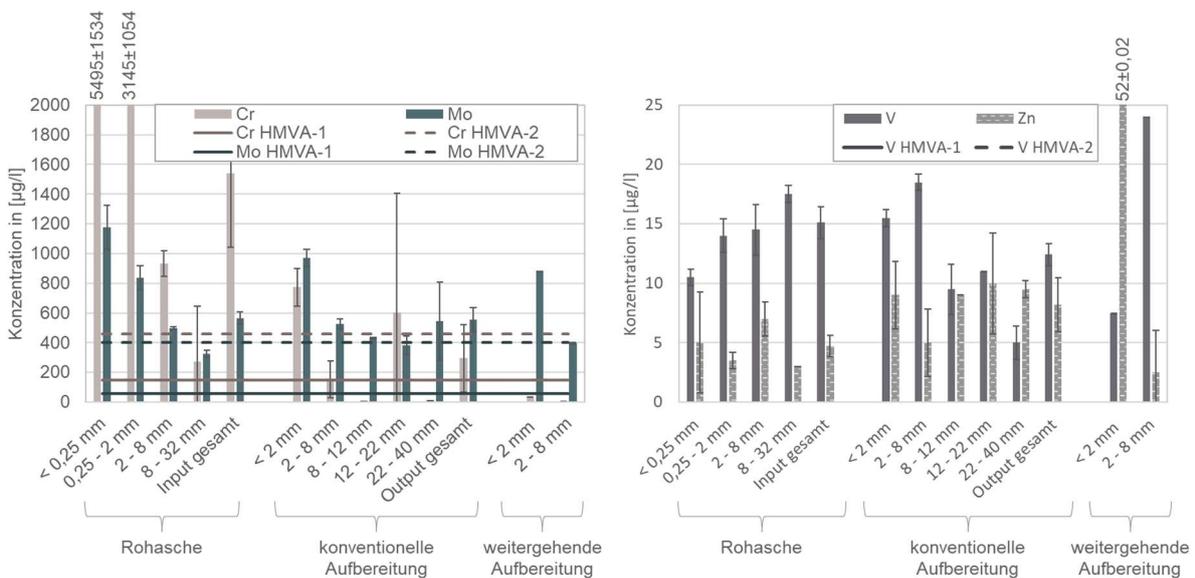


Abbildung 26: Veränderung der löslichen Schwermetalle Cr, Mo, V und Zn in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche

Nach der konventionellen Aufbereitung verbleibt ein signifikanter Anteil des metallischen Al in der mineralischen Restfraktion, der ein Potential für Rückgewinnung und Verbesserung der Qualität der mineralischen Fraktion birgt (Abbildung 27). Durch die Nachsortierung der Metalle aus der mittleren Fraktion kann das metallische Al um knapp 60% auf etwa 1% reduziert werden. In der Feinfraktion ist diese Reduktion noch größer (um knapp 70%) auf 0,3%.

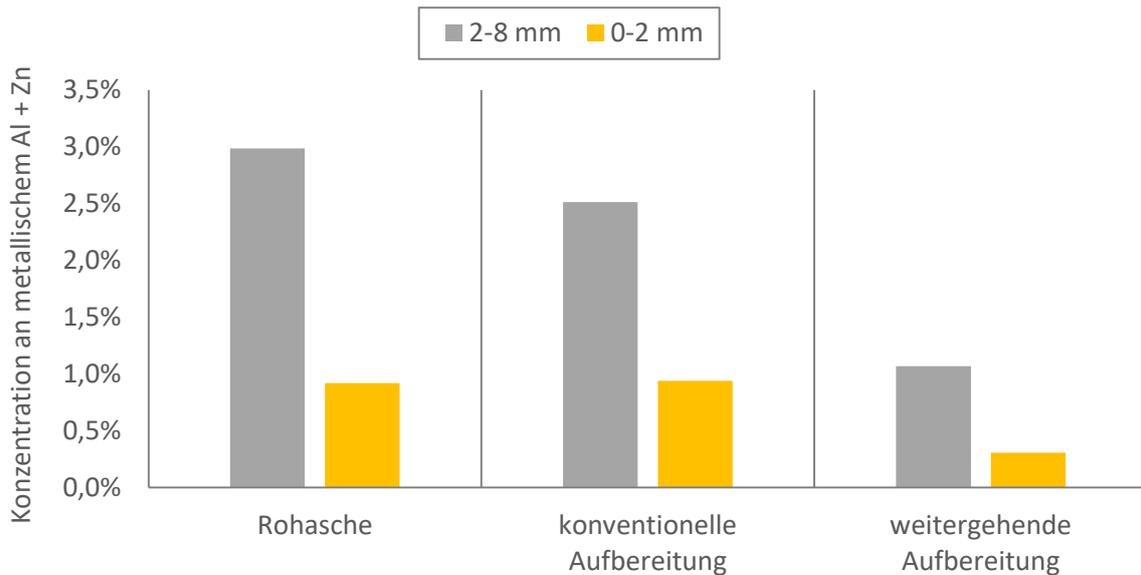


Abbildung 27: Veränderung der Konzentration des metallischen Aluminiums in der rohen, konventionell und weitergehend aufbereiteten HMV-Asche

3.2 Bautechnische und bauchemische Charakterisierung

3.2.1 Baustoffcharakterisierung inkl. Reaktionspotentiale und Aktivierungsmöglichkeiten

Für die betontechnologische Anwendung und Rezepturerstellung, sowie -optimierung wurden die Sieblinien der beiden Fraktionen ermittelt. Auf diese Ergebnisse wird im nächsten Kapitel genauer eingegangen. Zwecks chemisch-mineralogischer Analyse wurden die einzelnen, abgeseibten Fraktionen der aufbereiteten HMV-Asche mittels Röntgenpulverdiffraktometrie analysiert, mit dem Ziel Trends der An- oder Abreicherung bestimmter unterschiedlich harter Phasen in den einzelnen Korngrößenfraktionen identifizieren zu können. Die magnetische Separation wurde gezielt eingesetzt, um die magnetischen Phasen genauer charakterisieren zu können, da sowohl residuale Phasen vorhanden sein können als auch beim Verbrennungsprozess neu entstehende Phasen. Somit konnte bestätigt werden, dass sowohl Hämatit mit vollständig oxidiertem Eisen als auch Magnetit mit teilweise divalentem Eisen innerhalb der Proben vorhanden sind. Der Anteil der magnetischen Fraktion, die abgetrennt werden konnte, sank tendenziell mit abnehmender Korngröße. In Abbildung 28 sind exemplarisch drei Diffraktogramme mit den identifizierten eisenhaltigen Phasen abgebildet. In der nicht-magnetischen Fraktion ist u.a. auch eine Anreicherung von Quarz zu sehen.

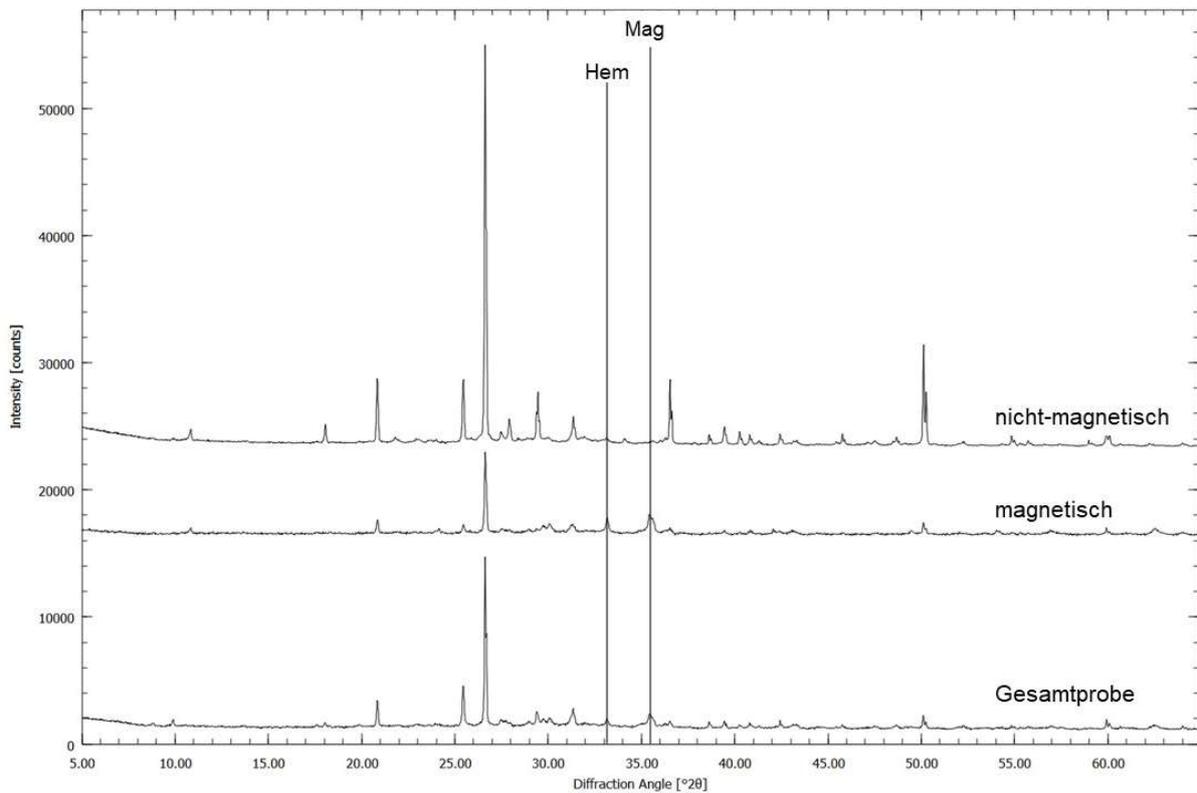


Abbildung 28: Exemplarische Diffraktogramme zur sicheren Identifizierung der magnetischen Phasen. Die Fraktionen stammen aus der 0,5–1 mm-Fraktion. Es wurden die nicht-magnetische, die magnetische und die originale Probe (v.o.n.u.) analysiert. Hem = Hämatit, Mag = Magnetit.

Somit konnte die quantitative Analyse der abgeseibten Fraktionen genauer erfolgen. Es wurden alle Fraktionen der 0–2 mm- und 2–8 mm-Fraktion qualitativ und quantitativ hinsichtlich des Phasenbestands analysiert. Die Phasenanalyse der beiden aufbereiteten mineralischen HMV-Asche-Fractionen (0–2 mm und 2–8 mm) wurde jeweils an den abgeseibten Teilfraktionen – welche während der Siebanalyse anfallen – vorgenommen. Durch die Voruntersuchungen der unaufbereiteten Proben der ersten Probenahmekampagne konnte die Auswahl der Eisenoxide eingeschränkt werden. Abbildung 29 zeigt die Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen, anhand derer die qualitative und quantitative Phasenanalyse vorgenommen wurden. Die Hauptphasen entsprechen größtenteils denjenigen der unaufbereiteten Probe aus der ersten Probenahmekampagne (Oxide, Silikate, Sulfate, Carbonate). Zusätzlich wurden niedrigkristalline Hydroxide (erkennbar an breiten Reflexen im Diffraktogramm) identifiziert, die sich vermutlich aufgrund der langen Außenlagerung der Asche beim Aufbereiter bildeten. Vermehrt finden sich in diesen Proben auch Gips, sowie Bassanit als wasserhaltige Sulfate und Tobermorit als eine typische CSH-Phase. Möglicherweise lassen sich Klinkerphasen in den feineren Korngrößenfraktionen finden. Die Identifikation dieser ist nicht eindeutig, da diese viele Reflexe aufweisen, die oft von anderen Mineralen überlagert werden. Meistens ist dabei Belit zu finden.

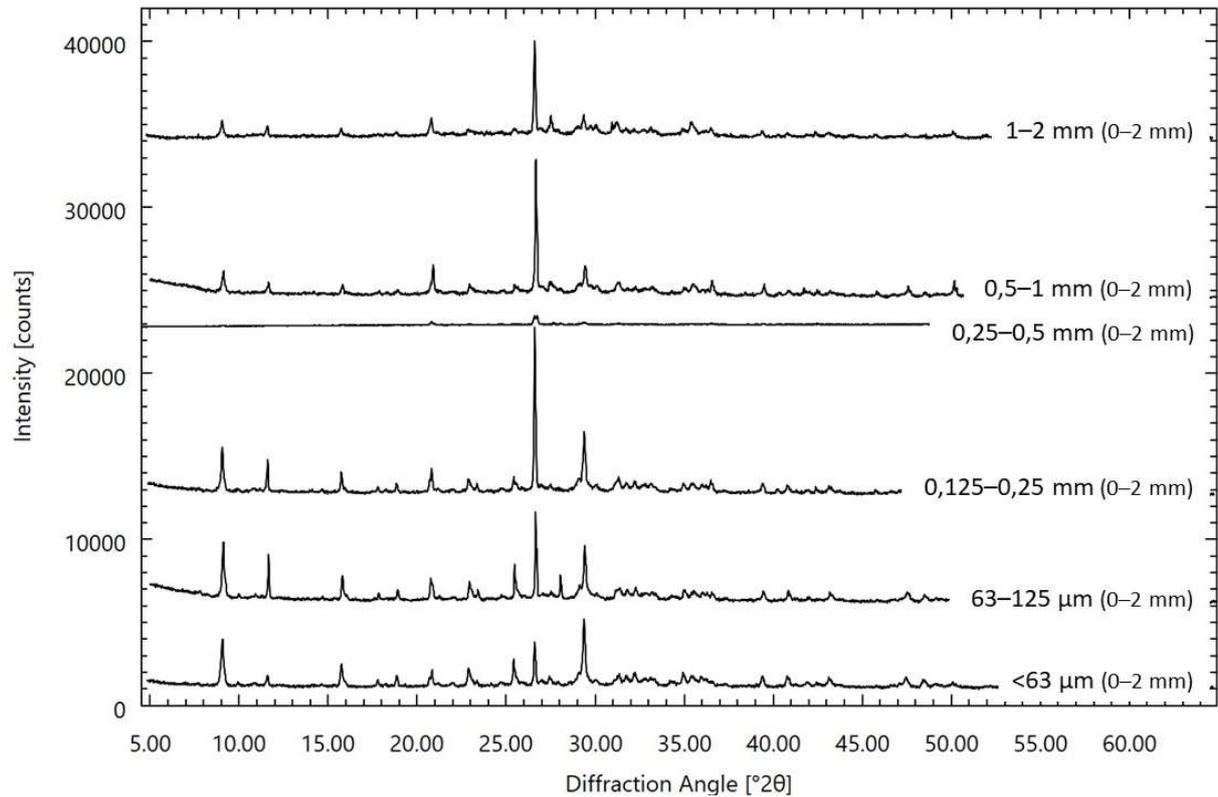


Abbildung 29: Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen der aufbereiteten <2 mm-Fraktion

In Abbildung 30 sind die XRD-Messungen der gleichen, abgeseibten Fraktionen der aufbereiteten 2–8 mm-Fraktion zu sehen.

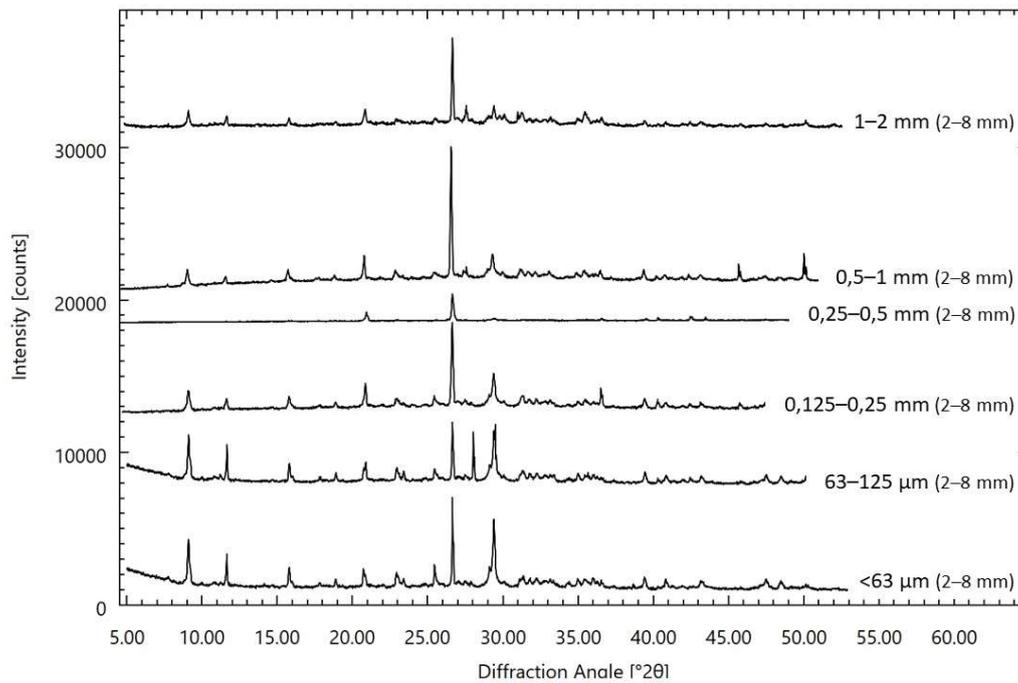


Abbildung 30: Diffraktogramme der einzelnen Fraktionen der aufbereiteten 2–8 mm-Fraktion

Im Vergleich mit den Ergebnissen der Phasenanalyse der im Technikumsmaßstab aufbereiteten Proben zeigen sich ähnliche Trends: Der Gehalt an verwitterungsbeständigen und harten Mineralen (Quarz, Silikate wie Feldspäte oder Pyroxene) nimmt mit steigender Korngröße zu. Entsprechend sinkt der Gehalt von Sulfaten (Gips, Bassanit, Anhydrit) und Carbonaten (hauptsächlich Calcit) mit steigenden Korngrößen (siehe Tabelle 5). Die potentiellen Klinkerphasen befinden sich dabei in der aufbereiteten 63–250 µm-Fraktion

Tabelle 5: Phasengehalte von drei verschiedenen Fraktionen der im Technikumsmaßstab aufbereiteten Proben (< 63 µm, 63–250 µm und die < 4 mm-Fraktion, gemahlen auf < 250 µm). Bestimmung mittels Röntgenpulverdiffraktometrie. Alle Angaben in M.-%.

Phase	<63 µm	63–250 µm	< 4 mm auf < 250 µm gemahlen
Quarz	6,3	24,1	48,8
Anhydrit	31,30	14,2	4,9
Bassanit	9,1	-	-
Calcit	29,4	18,5	2,3
Feldspäte	20,0	20,8	27,7
Pyroxene	-	8,1	12,3
Glimmer	-	5,7	-
Hämatit	3,9	2,9	2,5
Klinkerphasen (?)	-	13,8	-

Die gleichen abgeseibten Korngrößenfraktionen wurden sowohl von den Siebungen der 2–8 mm, als auch der < 2 mm Fraktion analysiert. Abbildung 31 zeigt exemplarisch vier Diffraktogramme der ähnlicher Korngrößenfraktionen; die beiden < 63 µm-Fraktionen der jeweiligen, aufbereiteten Proben, sowie zwei als Zementersatz genutzte Fraktionen, eine davon für Versuche im Labormaßstab gemahlene Probe und die andere, industriell gemahlene Fraktion. Die Phasen sind dabei wie oben beschrieben größtenteils gleich, lediglich deren Gehalte sind leicht unterschiedlich. Besonders die beiden < 63 µm-Fraktionen sind sehr ähnlich hinsichtlich des Phasenbestandes, während die beiden gemahlene Fraktionen sich sehr ähneln. Die größten Unterschiede zwischen den abgeseibten, feinen Fraktionen und den gemahlene Proben ist dabei einerseits der Gehalt an Ettringit, welcher bei den abgeseibten Fraktionen deutlich höher ist und zum anderen Eisenhydroxide wie Goethit und Lepidokrokit, welche nur bei den abgeseibten Fraktionen identifiziert werden konnten. Wie auch bei den vorherigen Analysen der im Technikumsmaßstab aufbereiteten Proben ist es vor allem in den kleineren Korngrößenbereichen möglich, dass Zement-Klinkerphasen, welche sich bei dem Verbrennungsprozess oder nachfolgender Reaktionen gebildet haben könnten, ebenfalls in der HMV-Asche vorhanden sind. Klinkerphasen wären dahingehend für das Potential der feineren HMV-Asche als Zementersatz vorteilhaft, während Sulfate in Zementen und Betonen unerwünscht sind, da diese zu Treiberscheinungen und damit zu Schädigungen des Werkstoffs führen können.

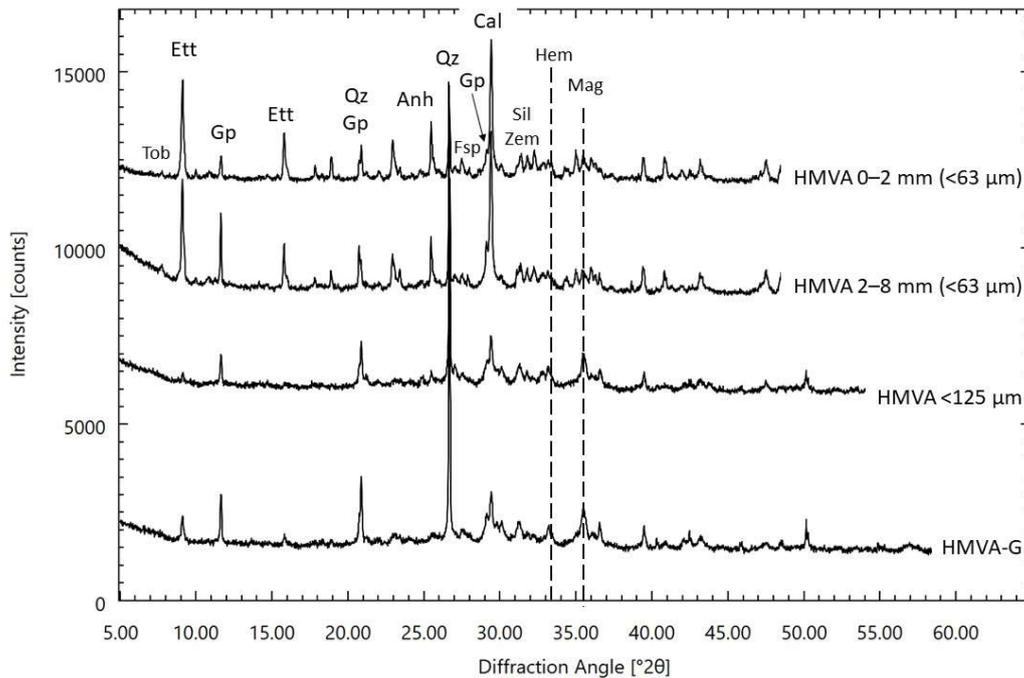


Abbildung 31: Diffraktogramme von vier feinen Korngrößenfraktionen: die $<63 \mu\text{m}$ -Fraktion der 0–2 mm-Fraktion; die $<63 \mu\text{m}$ -Fraktion der 2–8 mm-Fraktion; die im Labormaßstab gemahlene 0–2 mm-Fraktion; sowie die industriell gemahlene 0–2 mm-Fraktion (v.o.n.u.). Gekennzeichnet sind die Peaks der Hauptphasen. Tob = Tobermorit, Ett = Ettringit, Gp = Gips, Qz = Quarz, Cal = Calcit, Anh = Anhydrit, Fsp = Feldspat, Sil = Silikate, Zem = Klinkerphasen, Hem = Hämatit, Mag = Magnetit

Die mittels XRD bestimmten Phasenzusammensetzungen der einzelnen Proben ist Tabelle 6 zu entnehmen. Bis auf wenige Ausnahmen sind sich jeweils die abgeseibten und die gemahlene Proben sehr ähnlich und auch die Gehalte der einzelnen Phasen sind vergleichbar hoch.

Tabelle 6: Mittels XRD und Rietveld-Verfeinerung ermittelte Phasengehalte vier verschiedener, zementfeiner Proben. Alle Angaben in M.-%.

Fraktion Phase	< 63 µm (0–2 mm)	< 63 µm (2–8 mm)	< 125 µm (gemahlen)	HMVA-G
Quarz	7,5	12,0	16,7	21,7
Pyroxene	4,2	5,2	14,1	15,1
Feldspäte	8,7	3,4	18,3	17,1
Tobermorit	2,0	4,5	-	-
Calcit	20,9	23,3	11,0	11,1
Hemicarbonat	1,3	1,5	-	-
Ettringit	30,5	23,3	2,7	9,8
Gips	10,6	9,5	14,1	12,5
Anhydrit	2,8	4,4	3,6	-
Magnetit	2,7	2,9	5,7	5,3
Hämatit	2,4	2,3	3,4	1,8
Goethit	-	-	4,1	-
Lepidokrokit	-	1,7	-	-
Klinkerphasen (?)	6,4	6,0	6,3	5,6

Eine beispielhafte Auswertung mittels Rietveld-Verfeinerung ist in Abbildung 32 wiedergegeben. Die Kurven des gemessenen und berechneten Diffraktogramms sind dabei sehr ähnlich, weshalb die Differenzkurve sehr geringe Werte aufweist.

HMVA G.raw-0

HMVA G.dia

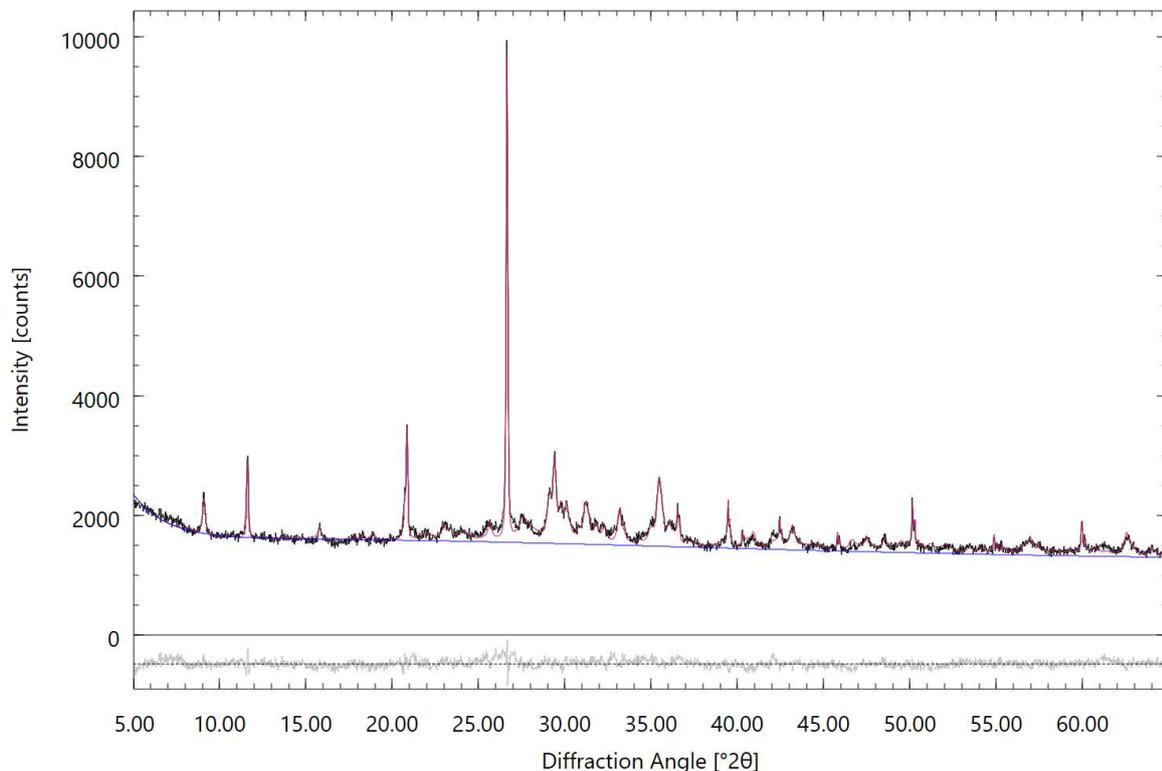


Abbildung 32: Ausgewertetes Röntgendiffraktogramm der Probe HMVA-G. Gemessenes Diffraktogramm in schwarz, berechnetes in rot und die Differenz der beiden als Kurve unten in grau dargestellt.

3.2.2 Reaktivität

Um die Reaktivität der gemahlene 0–2 mm-Fraktion und damit das Potential als Zementersatz zu evaluieren, werden die Ergebnisse der in der Methodik genannten Analysen vorgestellt. Diese erfolgten zusätzlich zu den XRD-Messungen, welche die potentielle Anwesenheit von Klinkerphasen nachweisen konnten. Zur grundsätzlichen Charakterisierung wurden Nassmessungen mit dem Lasergranulometer durchgeführt, um die Korngrößenverteilung der HMVA-G-Probe im Vergleich mit den zwei Zementen zu analysieren. Abbildung 33 zeigt die graphische Darstellung im logarithmischen Maßstab. Während die beiden Zementsorten eine ähnliche Korngrößenverteilung aufweisen, ist die HMVA-G-Probe wesentlich feiner.

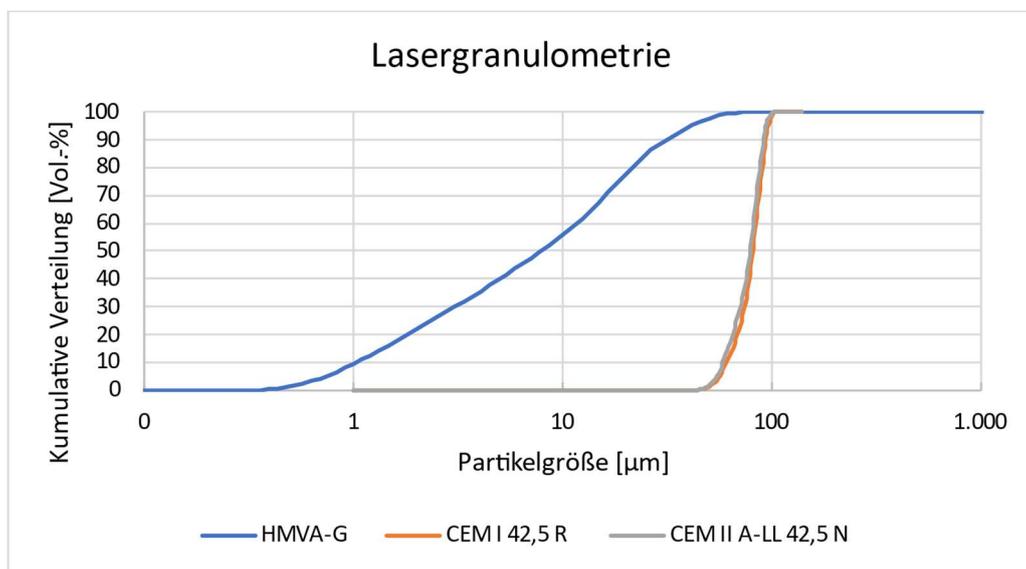


Abbildung 33: Partikelgrößenverteilung ermittelt durch Lasergranulometrie

Tabelle 7 listet einige statistische Kennwerte der Messungen auf. Zur weiteren Auswertung der Korngrößenverteilung wurden d_{10} -, d_{50} -, d_{90} -Werte sowie die d_{Breite} und d_{Spanne} (Gl. 3 und 4) bestimmt. Der d_{50} -Wert gibt dabei die mittlere Partikelgröße an und sagt aus, dass 50% der Partikel kleiner sind als der angegebene Wert, der d_{10} - und d_{90} -Wert verhalten sich analog dazu. Je enger d_{10} und d_{90} zusammenliegen, desto enger ist die Korngrößenverteilung. Die d_{Spanne} beschreibt die relative Breite einer Partikelgröße und liefert eine genauere Aussage beim Vergleich von Korngrößenverteilungen unterschiedlicher mittlerer Partikelgrößen.

$$d_{Breite} = d_{90} - d_{10} \quad (Gl.3)$$

$$d_{Spanne} = \frac{d_{90} - d_{10}}{d_{50}} \quad (Gl. 4)$$

Diese Werten zeigen, dass die Probe HMVA-G über ein relativ enges Kornband verfügt, welches bei den beiden vergleichenden Normzementen etwas breiter ist. Durch die logarithmische Darstellung wirken die Zemente allerdings etwas enger in ihrer Korngrößenverteilung.

Tabelle 7: Statistische Kennwerte der Messungen mit dem Lasergranulometer. Alle Angaben in μm .

Probe/ Kennwert	HMVA-G	CEM I 42,5 R	CEM II A-LL 42,5 N
d_{10}	1,1	2,8	2,2
d_{50}	8,3	18,3	14,9
d_{90}	32,5	57,2	46,9
d_{Breite}	31,4	54,4	44,6
d_{Spanne}	3,8	3,0	3,0

Als weiteres Analyseverfahren zur Quantifizierung der Reaktivität wurde die isotherme Wärmeflusskalorimetrie eingesetzt. Da Zement mit Wasser exotherm reagiert und Wärme entsteht, kann bei der Substitution von Zement durch HMV-Asche das Reaktionspotential über entstehende Wärmemenge abgeschätzt werden. In ersten Versuchen wurden die feineren Fraktionen ($< 63 \mu\text{m}$ und $63\text{--}250 \mu\text{m}$) der im Technikumsmaßstab aufbereiteten Fraktionen als Zementersatz für CEM II eingesetzt. In Abbildung 34 sind die entstehenden Wärmemengen von vier verschiedenen Messungen über einen Zeitraum von sieben Tagen dargestellt. Dabei ist die entstehende Wärmemenge, wenn 10% des Zementes mit der $< 63 \mu\text{m}$ -Fraktion ersetzt werden, nach sieben Tagen ungefähr gleich. Bei höheren Substitutionsgraden sinkt die Wärmemenge entsprechend. Zwar wurden bei der $63\text{--}250 \mu\text{m}$ -Fraktion mittels XRD Klinkerphasen nachgewiesen, allerdings ist die gemessene, kumulative Wärmemenge in dieser Fraktion bei gleichem Substitutionsgrad geringer als bei der $<63 \mu\text{m}$ -Fraktion, was zunächst auf eine geringere Reaktivität deutet.

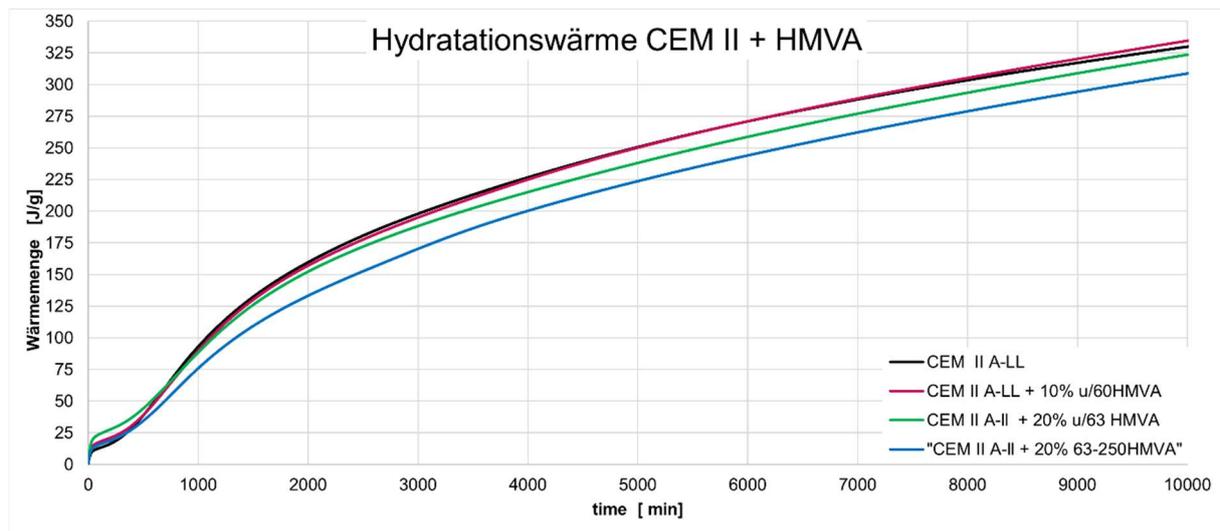


Abbildung 34: Kumulative Wärmemenge des CEM II-Zementes (schwarz), sowie die registrierte Wärmemenge, wenn der Zement durch HMV-Asche substituiert wird (restliche Farben) bei einem w/b -Wert von 0,50, gemessen mit einem Zementkalorimeter. Die Wärmemenge, die grob das Reaktionspotential anzeigt, ist bei bis zu 20% Ersatz des Zementes mit feiner HMV-Asche kaum unterschiedlich zur reinen Zement-Wasser-Mischung.

Bei Benutzung der gemahlten HMV-Asche, welche CEM I ersetzt, sind die Trends eindeutiger. Die Wärmemenge nimmt mit steigendem Gehalt der HMV-Asche stets ab (s.

Abbildung 35), allerdings ist die Abnahme der Hydratationswärme nicht gleichzusetzen mit dem Substitutionsgrad, d.h. bei einer Substitution von 40% des Zementes nimmt die Hydratationswärmemenge nur um ca. 30% ab (von ca. 356 J/g auf ca. 249 J/g).

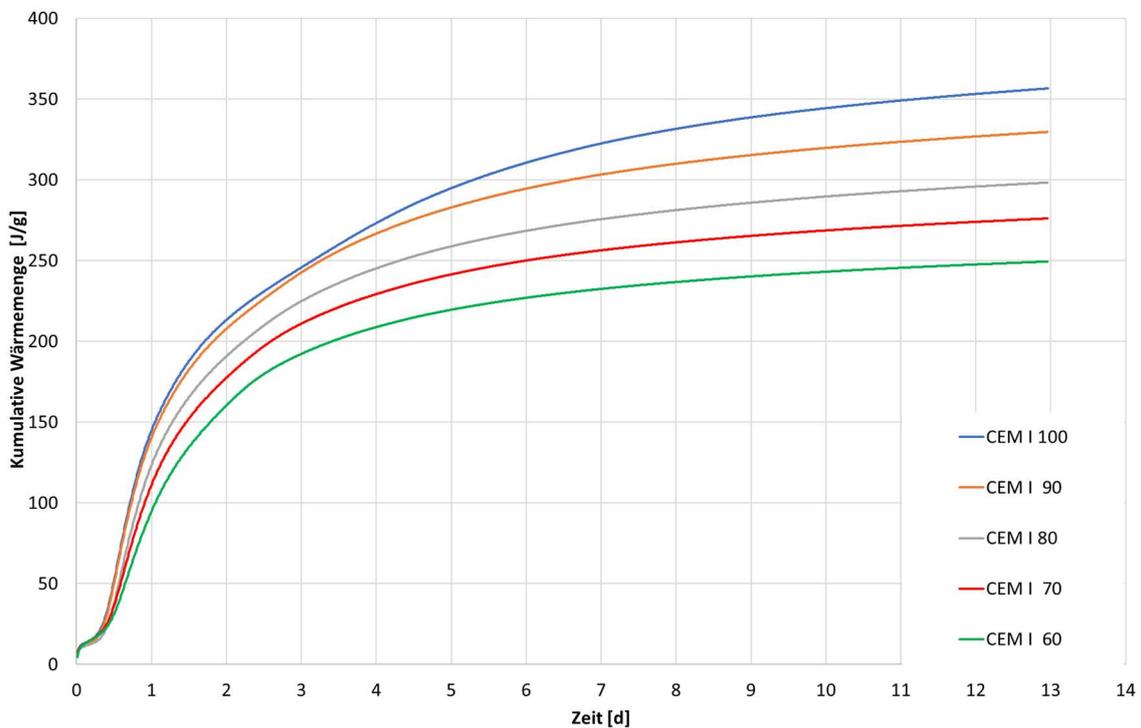


Abbildung 35: Kumulative Wärmemenge, gemessen mit isothermen Kalorimeter von CEM I (blau) und CEM I/HMVA-Mischungen mit jeweils 10% (orange), 20% (grau), 30% (rot) und 40% HMVA als Zementersatz (grün)

In Tabelle 8 ist die Auflistung der nach 28 Tagen registrierten Wärmemenge angegeben, sowie die Differenz der Wärmemengen zur Referenzprobe für die CEM I- und CEM II/HMVA-Mischungen (Substitutionsgrad bis zu 40%).

Tabelle 8: Mittels Wärmekalorimetrie gemessene Kennwerte der reinen Zemente und der Zement/HMVA-Mischungen

Probe/ Kennwert	CEM I [J/g] (Differenz)	CEM II [J/g] (Differenz)
Referenz	356,6 (0%)	362,7 (0%)
10% HMVA	329,7 (-7,6%)	331,8 (-8,5%)
20% HMVA	298,3 (-16,3%)	314,5 (-13,3%)
30% HMVA	276,1 (-22,6%)	286,1 (-21,1%)
40% HMVA	249,4 (-30,1%)	256,6 (-29,3%)

In Abbildung 36 ist der Vergleich der gemessenen Wärmemengen einer CEM I/HMVA-Mischung und einer CEM I/W12-Mischung über einen zeitlichen Verlauf von ca. 7 Tagen

angegeben. Deutlich zu sehen ist, dass die gemessene Wärmemenge mit dem inerten Quarzmehl deutlich niedriger ist, als die Wärmemenge mit der CEM I/HMVA-Mischung bei gleichen Anteilen (80/20). Die Wärmemenge mit Quarzmehl ist um ca. 15% geringer.

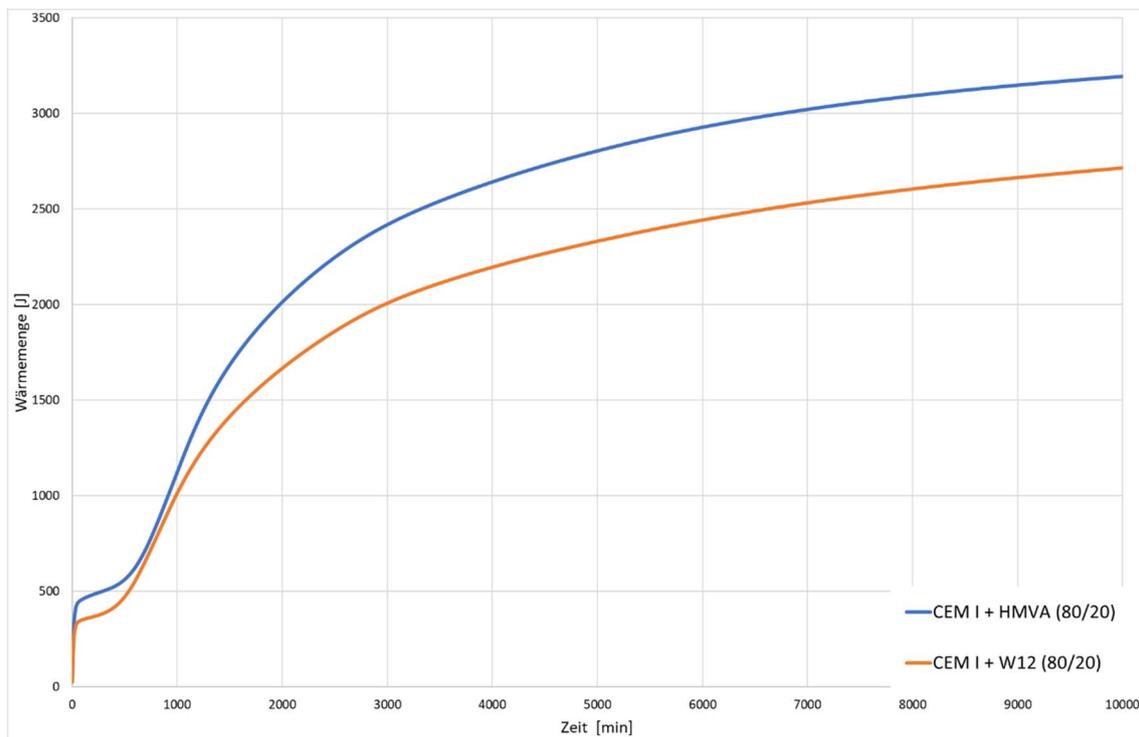


Abbildung 36: Kumulative Wärmemengen, gemessen mit isothermen Kalorimeter. Gemessen wurden eine CEM I/HMVA (80/20) Mischung (blau) und eine CEM I/W12 (80/20) Mischung (orange)

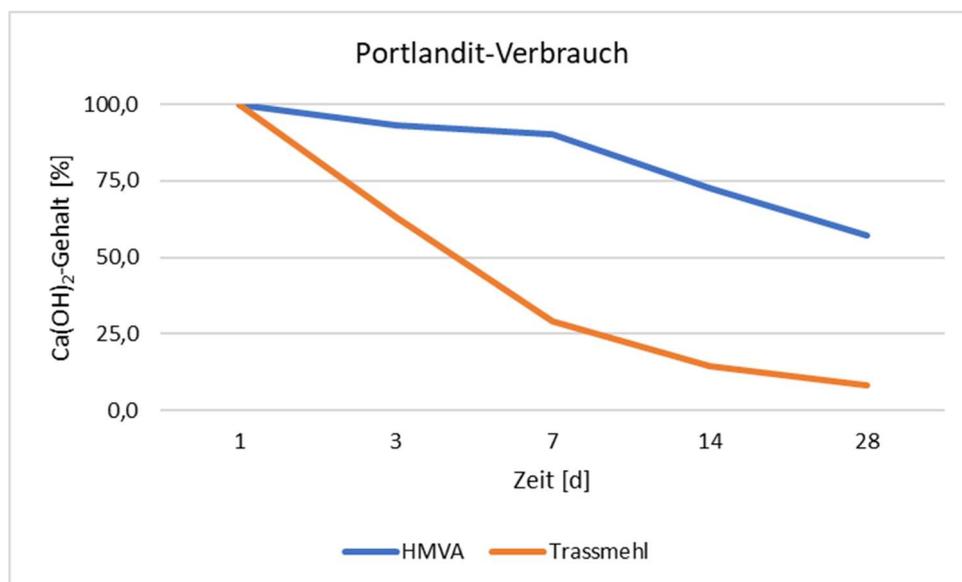
Gemäß dem Arbeitsplan wurden ergänzend verschiedene Stoffe genutzt, um die Möglichkeit der (alkalischen Aktivierung) der reinen HMV-Asche zu testen. Dazu wurden ebenfalls kalorimetrische Messungen genutzt, um auf die Reaktivität anhand der gemessenen Wärmemenge zu schließen. Tabelle 9 listet die nach 7 Tagen gemessene, kumulative Wärmemenge der verschiedenen Mischungen auf. Zwei Messungen erfolgten mit CEM I, die anderen Messungen wurden ohne Zement durchgeführt. Dabei weisen die Messungen mit Zement mit Abstand die höchsten, registrierten Wärmemengen auf. Von den reinen HMVA-Messungen ist die Aktivierung mit Kalilauge am vielversprechendsten, trotzdem wurde im Vergleich zum reinen Zement und zu der 80/20 Zement/HMVA-Mischung lediglich ca. 30% der Wärmemenge gemessen.

Tabelle 9: Gemessene und kumulierte Wärmemengen nach 7d des reinen Zementes und der Zement/HMVA-Mischungen mit verschiedenen Aktivatoren

Probe	Wärmemenge [J/g]	Probe	Wärmemenge [J/g]
CEM I (Referenz)	305,0	HMVA-G + 4M KOH	88,9
CEM I + HMA-G (80/20)	309,9	HMVA-G + 5% SikaRapid® C-100	15,6
HMVA-G + 100% K57M (kein Wasser)	62,81	HMVA-G + 10% Sigunit® LT	9,2
HMVA-G + 1M KOH	72,5	HMVAG + 50% K57M	53,3
HMVA-G + 2M KOH	79,4	HMVA-G + 5% Sigunit®	14,6

3.2.3 Titration

Puzzolanische Stoffe reagieren mit Kalkhydrat, welches bei der Zementhydratation entsteht, unter Bildung von CSH-Phasen. Puzzolane reagieren allerdings deutlich langsamer als reiner Portlandzement. Per Doppelbestimmung wurde mittels Titration der Gehalt an Kalkhydrat bestimmt und in Vergleich zum Gehalt nach 24h (=100%) gesetzt. Als Referenz und zur Überprüfung der Messmethode wurde ein den Normen entsprechender puzzolanischer Stoff (rheinisches Trassmehl) gewählt. Der Verlauf des bestimmten Kalkhydrat-Gehaltes über einen Zeitraum von 28 Tagen ist in Abbildung 37 zu sehen. Das Trassmehl verbraucht innerhalb dieser Zeitspanne fast das gesamte Kalkhydrat. Im Vergleich wird bei der HMV-Asche nicht so viel Kalkhydrat verbraucht wie beim Trassmehl, trotzdem nimmt der Gehalt deutlich (fast die Hälfte) ab, was aber dennoch für eine Reaktivität der HMV-Asche spricht. Zusätzlich wurde (nicht abgebildet) noch eine andere, trocken ausgetragene HMV-Asche eines anderen Müllheizkraftwerkes getestet. Bei dieser blieb der Portlandit-Gehalt stets im Bereich von 100%, es fand dementsprechend keine puzzolanische Reaktion statt.

Abbildung 37: Verlauf des Ca(OH)₂-Verbrauchs von HMVA und Trassmehl als Maß für die Reaktivität.

3.2.4 Festkörperuntersuchungen an Probekörpern

Weiterhin wurden Normprismen hergestellt und dabei der Zement (CEM I 42,5 R) zu gleichen Teilen durch HMVA-G und inertes, feines Quarzmehl (W12) ersetzt. Nach 28 Tagen wurden die Probekörper auf Biegezugfestigkeit (n=3) und Druckfestigkeit (n=6) geprüft. Die erzielten Festigkeitswerte wurden in Relation zu den Referenzproben gesetzt. Die Referenzprismen wiesen eine durchschnittliche Druckfestigkeit von ca. 50,3 MPa auf, was innerhalb der normativen Grenzen für einen Zement der Festigkeitsklasse 42,5 (zwischen 42,5 und 62,5 MPa) liegt; siehe Abbildung 38. Bereits bei einem Substitutionsgrad von 10% ist die Druckfestigkeit der HMVA-Prismen deutlich niedriger (ca. 39,0) als die der mit dem Quarzmehl W12 hergestellten Prismen (ca. 45,9 MPa). Höhere Substitutionsgrade führen zu weiter sinkenden Druckfestigkeiten bis hin zu einer Druckfestigkeit von ca. 21,1 MPa, während die Festigkeiten bei 20% und 30% im Rahmen der Standardabweichung im gleichen Bereich liegen (29,5 und 28,1 MPa). Bei den W12-Prismen wurde zwar auch eine sinkende Druckfestigkeit mit steigendem Substitutionsgrad festgestellt, die Abnahme ist aber geringer als bei vergleichbaren Prismen mit HMV-Asche. Bei einem Substitutionsgrad von 40% sinkt die Druckfestigkeit auf 30,7 MPa.

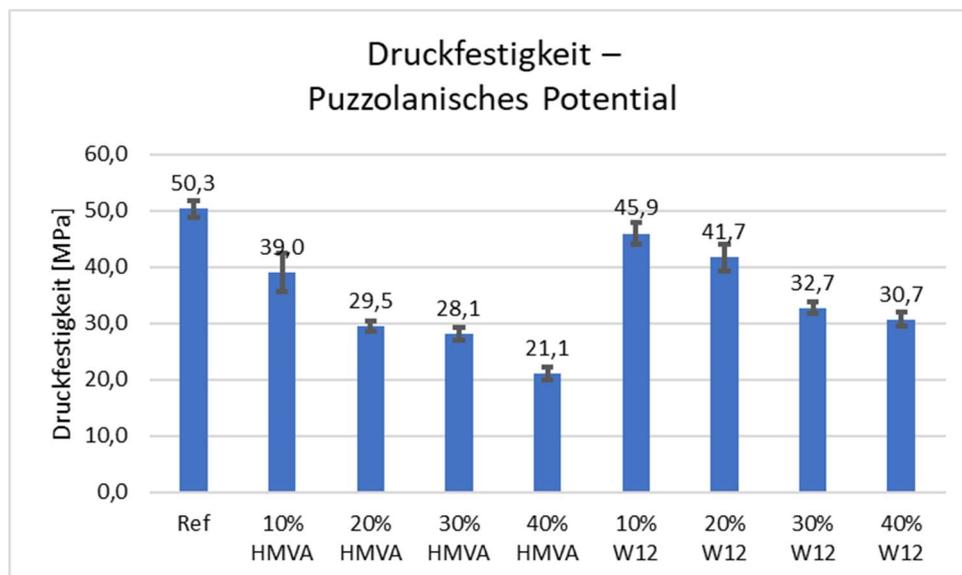


Abbildung 38: Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen der Normprismen zur Bestimmung des puzzolanischen Potentials als Zementersatz

Vor Prüfung der Druckfestigkeit wurden die Prismen auf Biegezugfestigkeit geprüft (Abbildung 39). Auch dabei ist die Festigkeit bei Substitution mit HMVA oder W12 stets niedriger als die der Referenzmischung. Bei 10% Ersatz sind die Biegezugfestigkeiten zwischen HMVA und W12 nicht vergleichbar, beiden liegen bei ca. 6,0 MPa. Mit steigendem Substitutionsgrad sinken die Biegezugfestigkeiten der Mischungen mit HMV-Asche stärker als bei gleichem Substitutionsgrad mit W12. Bei einem Gehalt von 40% betragen die geprüften Biegezugfestigkeiten ca. 3,2 (40% HMVA) und ca. 5,1 (40% W12) MPa.

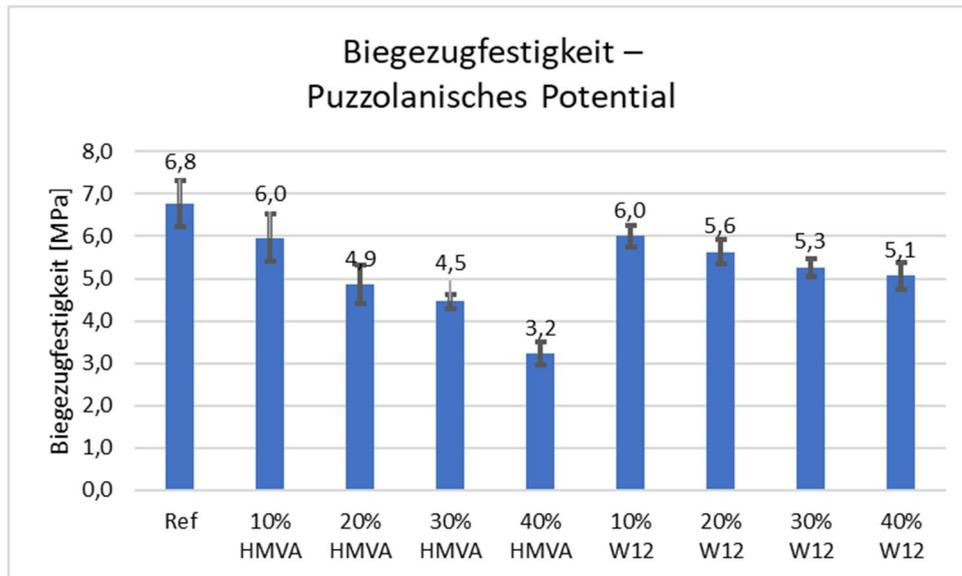


Abbildung 39: Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen der Normprismen zur Bestimmung des puzzolanischen Potentials als Zementersatz

Auffällig war das unterschiedliche Erscheinungsbild der Prismen direkt nach dem Ausschalen. Zu erkennen war eine dunklere Färbung der Prismen mit HMV-Asche im Vergleich zu denen der Referenz und den Mischungen mit W12. Außerdem waren Risse an den mit HMV-Asche hergestellten Prismen festzustellen. Besonders deutlich waren die Risse bei den Prismen mit dem höchsten HMVA-Gehalt (40%), siehe Abbildung 40. Diese Risse sind vermutlich auf den elementaren Al- und Zn-Gehalt zurückzuführen, welche bei der Hydratation zur Bildung von H_2 und damit zu einer Volumenvergrößerung führen können. Die chemischen Analysen und Aufbereitungsversuche zeigten, dass mit sinkender Korngröße der Gehalt von Al und Zn tendenziell abnimmt, diese Restmetalle aber auch schwerer zu entfernen sind.



Abbildung 40: Prismen mit 40% des Zementes ersetzt durch HMVA (oben) und Quarzmehl W12 (unten). Bei dem HMVA-Prisma sind deutliche Risse zu erkennen. Maße: 16x4x4 cm.

Zur Überprüfung der Porosität und der Porenradienverteilung und somit der Einteilung in Luftporen, Kapillarporen und Gelporen wurde die Quecksilberdruckporosimetrie verwendet und die offensichtlich unbeschädigten Bruchstücke nach den Druckfestigkeitsprüfungen analysiert. Die Ergebnisse sind Tabelle 10 zu entnehmen. Dabei ist jeweils bezogen auf das

untersuchte Porenvolumen die Gesamtporosität gelistet, sowie die Anteile der jeweiligen Porentypen an der Gesamtporosität. Die Aufteilung der Poren erfolgt dabei anhand der Porengröße: Luftporen $>0,1$ mm; Kapillarporen $10-0,03$ μm und Gelporen $<0,03$ μm . Die Referenzprobe hat eine Rohdichte von ca. $2,26$ g/cm^3 . Die Proben mit W12 haben bis auf die Probe mit einem Gehalt von 10% W12 eine vergleichbare Rohdichte von ca. $2,22$ g/cm^3 . Mit steigendem Anteil an HMV-Asche als Zementersatz fällt die Rohdichte kontinuierlich bis auf einen Wert von $2,13$ g/cm^3 bei einem Anteil von 40% HMV-Asche ab. Die Gesamtporosität bei der Referenzprobe beträgt ca. 13,8%. Die Probenreihe mit W12 weist untereinander ähnliche Gesamtporositäten von ca. 16,5% auf. Ausnahme ist die Probe mit 20% W12, hier lag der Wert bei 14,5%. Mit der HMV-Asche als Zementersatz steigt die Porosität bis auf ca. 20% bei einem Anteil von 40% HMV-Asche an. Die Probe mit 30% HMV-Asche wies bei dieser Probenserie mit 13,1% die geringste Porosität auf. Bezüglich der Anteile der Porenarten an der Gesamtporosität stellen die Kapillarporen stets den größten Anteil. Diese stellen einen Anteil von 85% der Gesamtporosität der Referenzprobe. Bei den Proben mit HMV-Asche schwankt dieser Anteil zwischen 68 und 75%, wobei kein eindeutiger Trend auszumachen ist. Bei der W12 Probenserie ist dieser Anteil relativ konstant zwischen 74 und 77%, unabhängig vom W12-Anteil. Bei allen Proben ist im Vergleich zur Referenzprobe (ca. 8%) der Anteil an Gelporen deutlich erhöht: bei den HMV-Asche Proben liegt der Gelporen-Anteil zwischen 17 und 24% (kein Trend mit steigendem HMV-Asche-Anteil) und bei den W12 Proben zwischen 15 und 19%.

Tabelle 10: Ergebnisse der Quecksilberdruckporosimetrie an Bruchstücken der Prismen zur Feststellung des puzzolanischen Potentials.

	Rohdichte [g/cm³]	Gesamtporosität [%]	Luftporen [%]	Kapillarporen [%]	Gelporen [%]
Referenz	2,26	13,83	0,78	11,96	1,09
10% HMVA	2,24	14,60	1,39	10,42	2,80
20% HMVA	2,20	17,55	2,14	12,43	2,98
30% HMVA	2,15	13,16	1,25	11,02	3,86
40% HMVA	2,13	20,03	1,17	15,10	3,76
10% W12	2,17	16,25	1,22	12,53	2,50
20% W12	2,23	14,51	1,10	10,87	2,54
30% W12	2,22	16,52	1,28	12,16	3,07
40% W12	2,21	16,15	1,09	12,31	2,75

3.2.5 Entwicklung geeigneter Betonrezepte und Zuordnung zu Anwendungen

Da Lasten im Normalbeton überwiegend über die Gesteinskörnung abgetragen werden, ist eine ausreichender Verbund zwischen Bindemittel und Gesteinskörnung herzustellen. Eine optimale Korngrößenverteilung sorgt dafür, dass Hohlräume maximal ausgefüllt werden und keine größeren Poren innerhalb des Betons übrigbleiben, die eine Reduzierung der mechanischen Eigenschaften bewirken würden. Um geeignete Betonrezepturen zu entwickeln, wurden die Sieblinien der beiden mineralischen Fraktionen (0–2 mm und 2–8 mm) bestimmt. Abbildung 41 zeigt Sieblinien der aufbereiteten HMVA-Fraktionen. Gut sichtbar ist

das Überkorn der 0–2 mm-Fraktion, welches ca. 20% beträgt, während es kaum Unterkorn bei der gröberen HMV-Asche-Fraktion gibt.

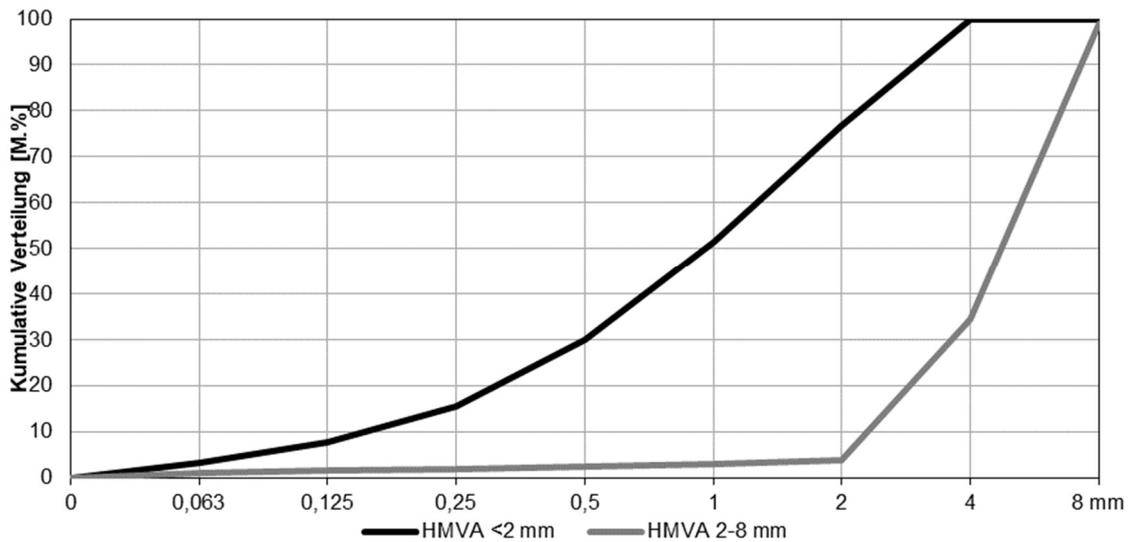


Abbildung 41: Sieblinien der beiden HMVA-Fractionen 0–2 mm (schwarz) und 2–8 mm (grau)

Für die praktische Umsetzung wurde zunächst systematisch die HMV-Asche bei Normprismen eingesetzt. Dabei erfolgte zunächst der teilweise Ersatz des Zementes sowie andererseits der Ersatz des Normsand. Dafür musste aufgrund des Überkorns die 0–2 mm-Fraktion mit einem 2 mm-Sieb gesiebt werden. Anschließend war die Sieblinie ähnlich der des Normsand (Abbildung 42).

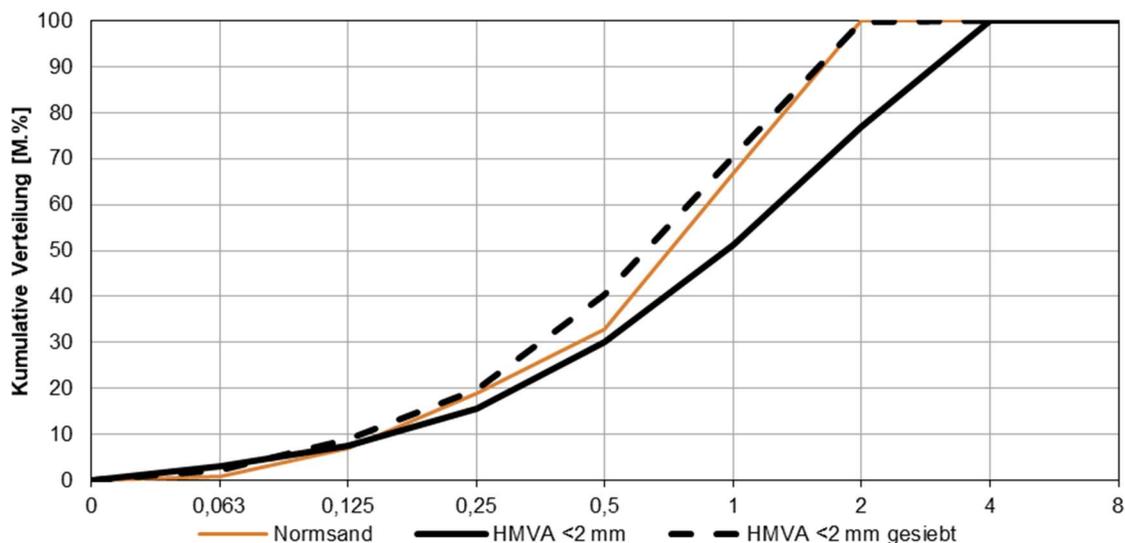


Abbildung 42: Sieblinien des Normsand (orange), der originalen 0–2 mm-Fraktion (schwarz, durchgehend) und der abgeseihten HMVA 0–2 mm-Fraktion (schwarz, gestrichelt)

Eine weitere Schwierigkeit bestand in der durch die HMV-Asche verschlechterte Verarbeitbarkeit. Durch die wassersaugenden Eigenschaften der HMV-Asche musste der w/z-Wert der Prismen von 0,5 auf 0,6 erhöht werden. Zudem stellte sich heraus, dass die

Verarbeitbarkeit noch weiter verbessert werden konnte, indem das zusätzliche Wasser (45 g) zuerst der 0–2 mm-Fraktion zugeführt wurde, damit diese mit Wasser vorbefeuchtet werden konnte. So war eine einfachere Verdichtung möglich, trotzdem musste diese im Labormaßstab händisch per Stampfer erfolgen und nicht auf einem Rütteltisch. In Abbildung 43 sind von zwei getesteten Prismen die Unterschiede des Gefüges durch lichtmikroskopische Bilder zu sehen.

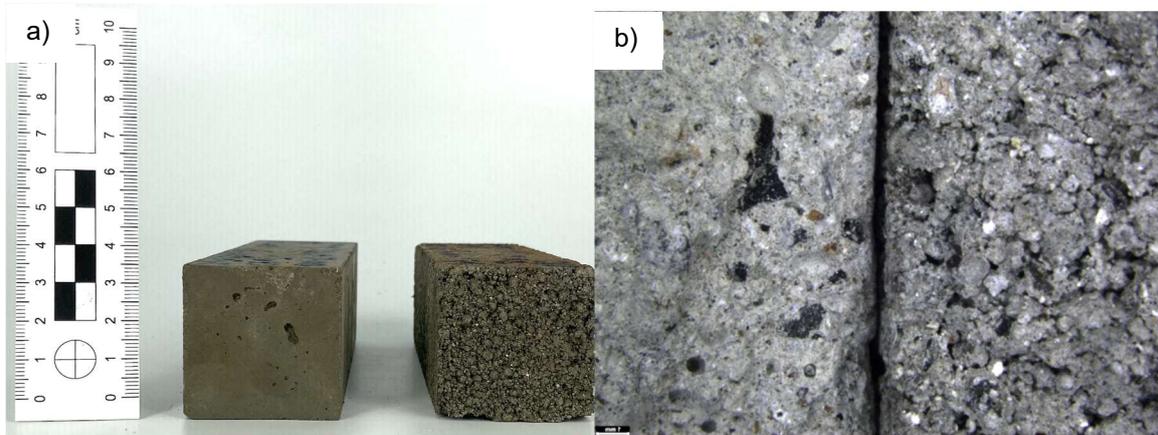


Abbildung 43: Unterschied von Normprismen mit HMV-Asche, wenn das Wasser zuerst der Asche zugegeben wird. a) Ansicht beider Prismen direkt nach dem Ausschalen, b) im Lichtmikroskop nach Festigkeitsprüfung. Das Prisma, bei dem das Wasser der HMV-Asche zuerst hinzugegeben wurde, ist jeweils links

Mit dieser Erkenntnis wurden die weiteren Proben hergestellt. In Abbildung 44 sind die Ergebnisse der Druck- und Biegezugfestigkeitsprüfungen dargestellt. Auch nach 56 Tagen zeigen die Ergebnisse einen ähnlichen Trend (nicht dargestellt). Dabei steht der Wert zwischen 0 und 40% HMVA für den Zementersatz, während SE für den (Norm-)Sanderersatz steht.

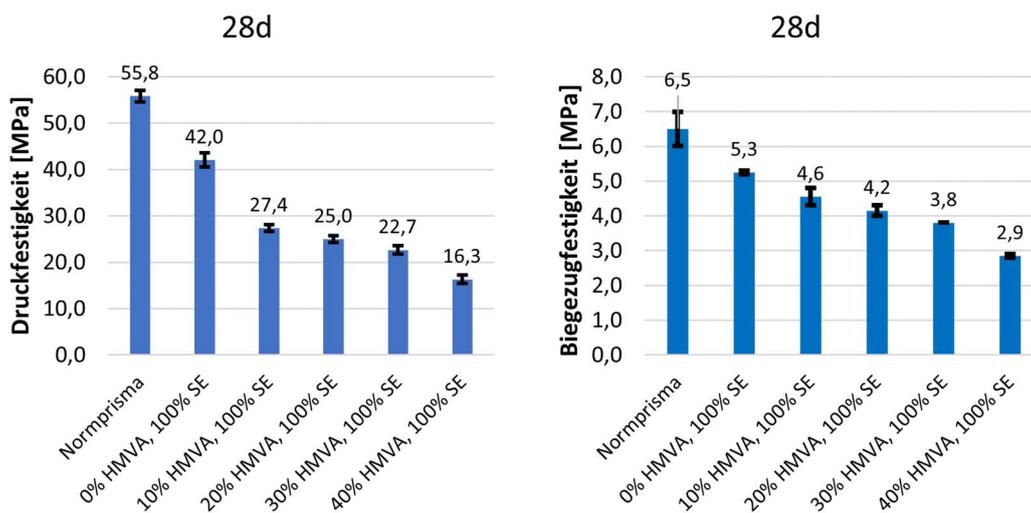


Abbildung 44: Druckfestigkeiten (links) und Biegezugfestigkeiten (rechts) von Normprismen und Prismen, bei denen der Normsand und zunehmend auch der Zement durch HMVA ersetzt wurde.

Die Verformungskurven der hergestellten und nach 24 Stunden ausgeschalteten Prismen sind in Abbildung 45 zu sehen (n=3). Dabei wurde in Anlehnung an DIN EN 12617-4 die Verformung mittels einer Schwindmessuhr der Prismen bei einer Lagerung bei ca. 20 °C und bei einer

relativen Luftfeuchte von ca. 65% bestimmt. Während die Referenzprismen ein für zementgebundene Proben übliches Schwindmaß von ca. 0,5 mm/m aufweisen – also eine Verkürzung von 0,5 mm hochgerechnet auf einen Meter – ist das Schwindmaß deutlich erhöht, sobald die abgeseibte 0–2 -mm-Fraktion eingesetzt wird. Die weiteren Schwindprismen beinhalten stets die komplett ersetzte Sand-Fraktion sowie mindestens 10% Zementersatz, bis hin zu 40%. Der Zementstein hat normalerweise den größten Einfluss auf das Schwindmaß, hier allerdings ist der hohe Grad der Verformung auf die 0–2 mm-Fraktion zurückzuführen, da der Unterschied bei verschiedenen Substitutionsgraden des Zementes deutlich geringer ist.

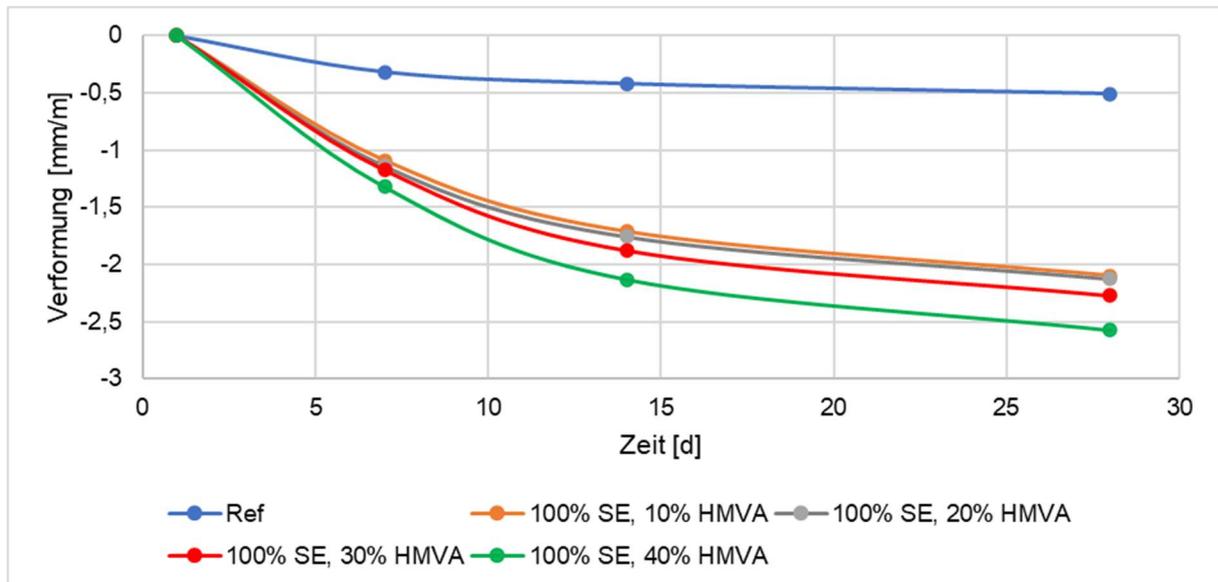


Abbildung 45: Schwindverläufe der Normprismen mit unterschiedlichen HMVA-Anteilen

Da durch Voruntersuchungen bereits bekannt war, dass noch restliche, magnetische Partikel in den Fraktionen vorhanden sind und teilweise im Mikroskop bei Proben sichtbar waren, wurden Messungen mit dem hochauflösenden Computertomographen (μ -CT-Gerät; Zeiss Xradia Versa 520) durchgeführt. Dazu wurden ca. 1 cm³ große Proben einerseits eines Referenzprismas und andererseits eines Prismas mit 100% Sandersatz und 40% Zementersatz durch HMV-Asche aus den Bruchstücken von geprüften Schwindprismen präpariert und gemessen. Abbildung 46 zeigt jeweils ein Schnittbild der Probe mit 100% Sandersatz und 40% Zementersatz (links) und eines Normprismas (rechts). Die HMV-Aschehaltige Probe weist deutliche Materialkontraste auf, von sehr dunklen Stellen (geringe Dichte, u.A. Luftporen), über graue Bereiche bis hin zu sehr hellen Bereichen mit hoher Dichte (vermutlich Metalle). Zuweilen ist die poröse Struktur einiger Partikel der 0–2 mm-Fraktion zu sehen. Das Normprisma hingegen weist kaum Helligkeitsunterschiede auf, bis auf einige, vermutlich unreaktierte Zementpartikel mit höherer Dichte, welche sich zwischen den Sandkörnern befinden. Luftporen sind ebenfalls vereinzelt zu erkennen.

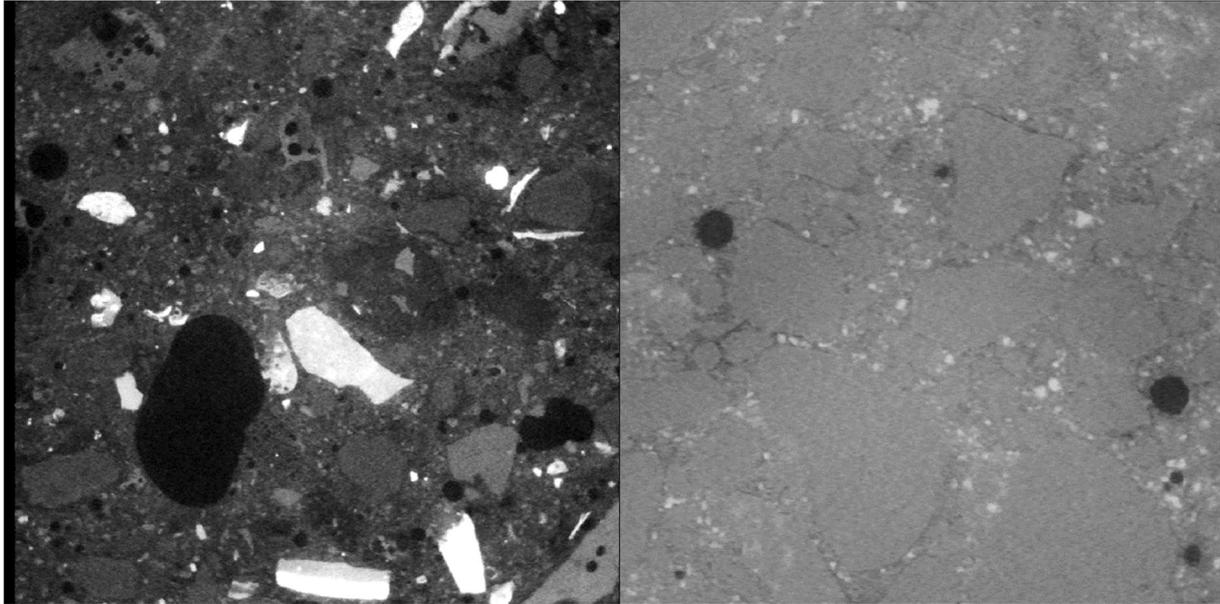


Abbildung 46: Schnittbilder der μ -CT-Aufnahmen eines Prismas mit 100% HMVA als Sandersatz und 40% HMVA als Zementersatz (links) und eines Normprisma (rechts). Gut zu sehen sind Partikel mit hoher Dichte (vermutlich Metalle). Bildbreite ca. 4 mm

Durch die dreidimensionale Aufnahme und entsprechende Symmetrien und Materialkontraste können auch beispielsweise Luftporen und Stellen mit hoher Dichte (z.B. Metalle) ebenfalls dreidimensional dargestellt werden; siehe Abbildung 47. Dort sind in blau auf der linken Seite Luftporen dargestellt (sichtbar gemacht anhand entsprechender Symmetrie und geringer Helligkeit), während auf der rechten Seite Stellen mit hoher Dichte und damit hoher Helligkeit dargestellt sind.

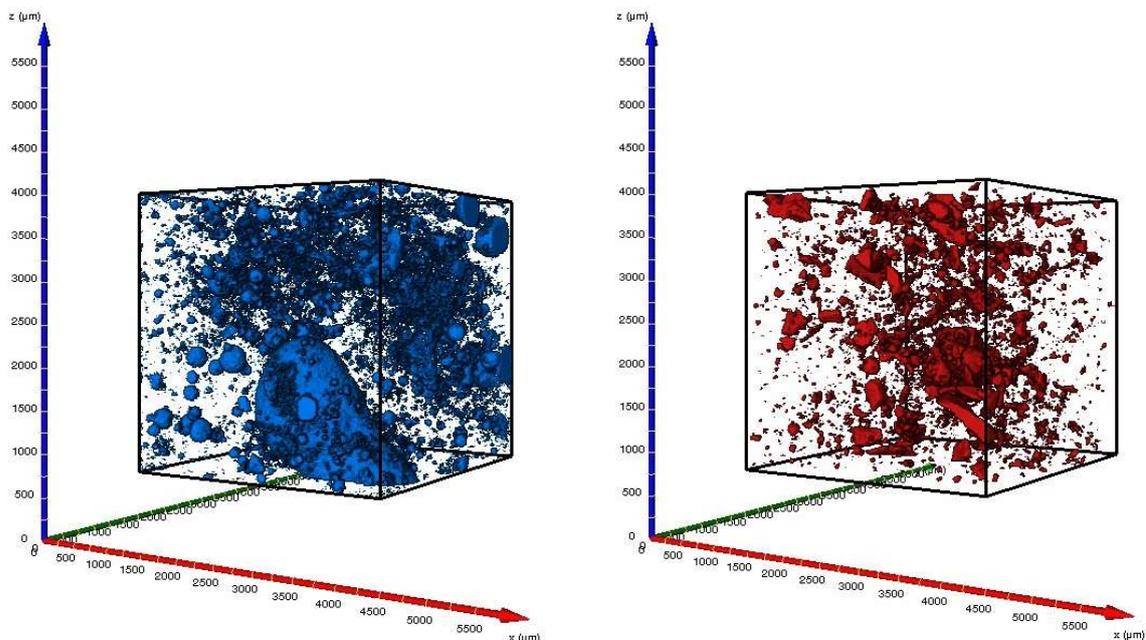


Abbildung 47: Rekonstruierte Bereiche der μ -CT-Aufnahmen des Prismas mit 100% HMVA als Sandersatz und 40% HMVA als Zementersatz. Links in blau die Luftporen und rechts in rot Bereiche mit hoher Dichte.

Um eine möglichst ideale Sieblinie zur vollständigen Substitution der Gesteinskörnung durch HMV-Asche zu erhalten, ist eine Mischung der beiden Fraktionen (0–2 mm und 2–8 mm) nötig.

Abbildung 48 zeigt die Sieblinie einer theoretischen 60/40-Mischung (60% 0–2 mm; 40% 2–8 mm-Fraktion) der beiden Fraktionen. In diesem Mischungsverhältnis würde eine gute Packungsdichte erreicht werden, die gute Betoneigenschaften einhergehend mit einer guten Verarbeitbarkeit ermöglicht. Ausgehend davon wurden die entsprechenden, natürlichen Gesteinskörnungen (0/2 Sand und 2/8 Kies) durch die HMV-Asche-Fraktionen ersetzt, während für die Kernbetonmischungen 8/16 Kies als natürliche Gesteinskörnung weiterhin genutzt wurde. In Abbildung 48 sind auch die Sieblinien von Gesteinskörnungen für Betonrezepturen nach (DIN 1045-2) angegeben; idealerweise sollten die Sieblinien sich im Bereich zwischen den Regelsieblinien A und B befinden.

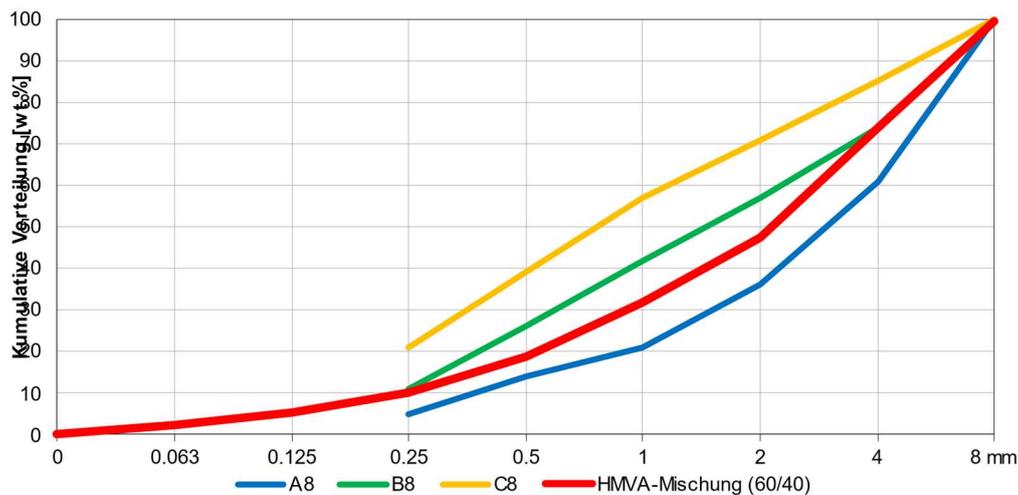


Abbildung 48: Sieblinien aus der Betonnormung (blau, grün, orange) sowie einer idealen, 60/40-Mischung der beiden HMVA-Fraktionen

Auf dieser Grundlage wurden erste Probekörper im Labor mit beiden HMV-Asche-Fraktionen hergestellt. Um eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu gewährleisten, wurde mit Betonzusatzmitteln (Hydrophobierer und Hochleistungsfließmittel) gearbeitet. Da bei der Fertigteilherstellung allerdings eine erdfeuchte Konsistenz des Betons notwendig ist, werden die Ergebnisse der Laborversuche an dieser Stelle nicht vorgestellt. Aufgrund dessen, dass auch ohne Zusatzmittel mit entsprechender Wasserzugabe erdfeuchter Beton hergestellt werden konnte, wurden Pflastersteine als mögliches Anwendungsfeld ausgewählt, da so ein großer Anteil der HMV-Asche im Kernbeton eingesetzt werden kann, während die Vorsatzschicht als dünne Schicht unverändert bleiben konnte und der Ansatz darauf beruhte, dass die Vorsatzschicht große Anteile an der Dauerhaftigkeit hat.

3.3 Herstellung von Betonpflastersteinen

3.3.1 Technikumsmaßstab

Nachdem im Labormaßstab die Anwendbarkeit von HMVA-Aschen in Betonen getestet und analysiert wurde, wurden im nächsten Schritt Versuche im Technikumsmaßstab angestrebt. Auf einer Labor-Pflastersteinmaschine bei Heidelberg Materials wurden sechs verschiedene Mischungen, basierend auf den vorhergehenden Analysen, hergestellt. Die Rezepturen und die Herstellungsweise ist den später im Projekt geplanten Werksversuch bei der Firma Kimm angelehnt, um eine Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf die großskalige Herstellung

gewährleisten zu können. In den Technikumsversuchen wurden nur die beiden HMV-Asche-Fractionen als Gesteinskörnungersatz genutzt, da die aufgemahlene HMV-Asche als Zementersatz im größeren Maßstab noch nicht verfügbar war. Die Pflastersteine wurden in dem Rastermaß 20x10 cm (Länge x Breite) hergestellt, die Höhe variierte zwischen 6 und 8 cm, abhängig davon, ob die Steine mit oder ohne Vorsatzschicht gepresst wurden. Mit Vorsatzschicht waren die Pflastersteine höher.

Zunächst wurde nur der Kernbeton in Anlehnung an die Rezeptur des Fertigteilherstellers produziert (Mischung I). Allerdings war die erste Mischung noch zu feucht, weshalb es zu sogenannten „Stempelklebern“ kam und die gepressten Pflastersteine an der Presse festgingen (Abbildung 49, links). Nachdem der Wassergehalt bei der nächsten Kernbetonmischung angepasst war (Mischung II), wurde eine Referenzmischung, bestehend aus Kernbeton und Vorsatz hergestellt (Mischung III). Anschließend wurde Kernbeton mit den 0–2 und 2–8 mm-HMV-Asche-Fractionen als Ersatz für die natürliche Gesteinskörnung hergestellt (Mischung IV). Danach gab es eine weitere Mischung mit Referenzkernbeton und Referenzvorsatz (Mischung V), diese unterschied sich von Mischung III dahingehend, dass die Maschinenparameter geändert, sowie die Maschine zuvor gewartet wurde. Bei den Mischungen mit HMV-Asche im Kernbeton wurde der Zementgehalt um etwa 40 kg/m^3 erhöht und der Gehalt an Kalksteinmehr entsprechend gesenkt. Ausgehend von den Ergebnissen der Vorversuche wurde wieder ein Teil des Wassers genutzt, um die HMV-Asche vorzunässen, um damit die wassersaugenden Eigenschaften einzuschränken. Durch die unterschiedlichen Feuchten der Gesteinskörnungen musste vor Ort teilweise zusätzlich Wasser hinzugegeben werden, um die gewünschte Konsistenz zu erreichen (Abbildung 49, rechts). Die Pflastersteine wurden auf Holzbrettern mit Hilfe der Stempel gepresst, weshalb der Abdruck auf einigen auf der Rückseite noch zu sehen ist. In der Regel wurden das erste und letzte Brett der jeweiligen Mischung verworfen. Nach ca. 24 h wurden die Pflastersteine von den Brettern entfernt und bei Raumtemperatur nachgelagert. Nach 28 Tagen erfolgten dann die betontechnologischen Untersuchungen.



Abbildung 49: Herstellung von Pflastersteinen im Technikumsmaßstab. Links: "Stempelkleber" durch eine zu feuchte Konsistenz. Rechts: erdfeuchte Konsistenz für eine optimale Herstellung.

In Abbildung 50 ist ein Brett mit Pflastersteinen der Mischung IV direkt nach Herstellung zu sehen. Die hergestellten Pflastersteine mit Vorsatzschicht konnten ohne Probleme mit der Maschine hergestellt und gepresst werden, sowie mit etwas Vorsicht vom Brett gehoben werden ohne zu brechen. Durch die dunkle Färbung der HMV-Asche hebt sich die Kernbetonschicht farblich deutlich von der Vorsatzschicht ab.



Abbildung 50: Pflastersteine der Mischung VI direkt nach Herstellung

In Abbildung 51 und Abbildung 52 sind Pflastersteine der Mischung III und VI zu sehen, jeweils mit Draufsicht (Vorsatzschicht) und mit Seitenansicht. Auch nach 28 Tagen ist die dunkle Färbung des Kernbetons mit HMV-Asche deutlich zu erkennen. Ebenfalls makroskopisch zu sehen ist die anscheinend porösere Struktur des Kernbetons mit HMV-Asche.



Abbildung 51: Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) der Technikmischung III



Abbildung 52: Draufsicht (links) und Seitenansicht (rechts) der Technikmischung VI

In Abbildung 53 sind von den vier für die Prüfung des Abriebwiderstandes gesägten Mischungen (III bis VI) Querschnitte zu sehen. Gut sichtbar ist wieder die dunkle Färbung des

Kernbetons (IV und VI) bedingt durch die HMV-Asche. In den HMV-Asche-Proben befanden sich einige Metallstücke, welche eine vollständige Prüfung auf den Abriebwiderstand nach Böhme nicht ermöglicht haben, da durch diese die Prüfscheibe beschädigt würde.

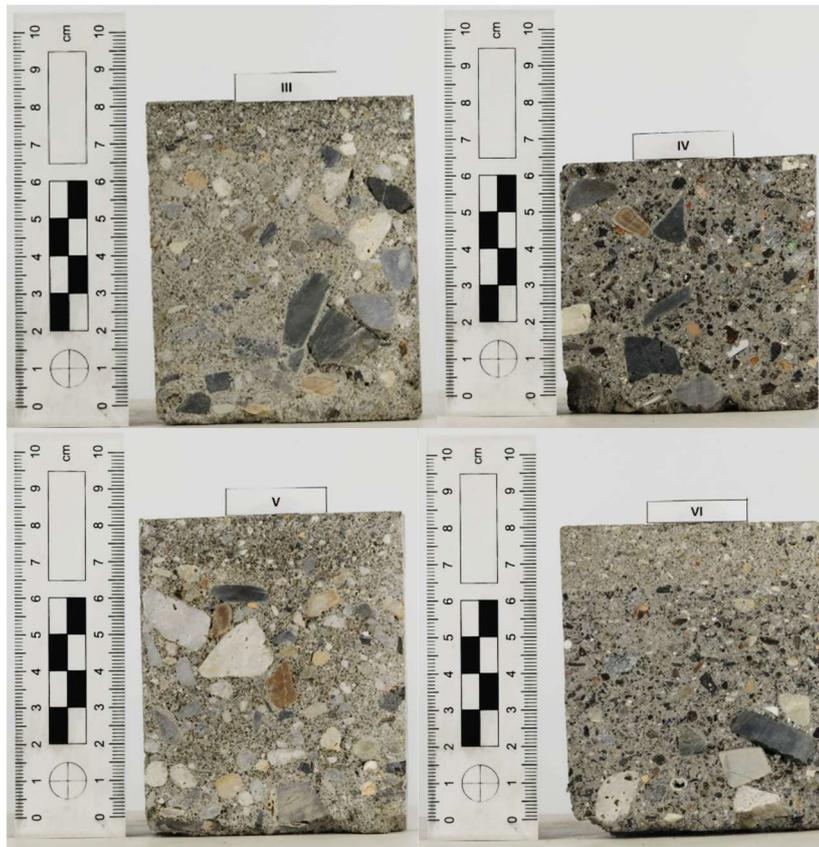


Abbildung 53: Querschnitte der Mischungen III (oben links), IV (oben rechts), V (unten links) und VI (unten rechts)

Nach DIN EN 1338 für Pflastersteine muss die Spaltzugfestigkeit für die entsprechende Verwendung im Mittel $>3,6$ MPa betragen und Einzelwerte mindestens 2,9 MPa aufweisen. Für die Prüfung wurden die Proben 24 Stunden vorher in Wasser gelagert und direkt danach geprüft. Die reine Kernbeton-Mischung hat dabei die höchste Spaltzugfestigkeit (ca. 5,6 MPa), gefolgt von den Pflastersteinen mit Kernbeton und Vorsatzschicht (ca. 3,4–3,7 MPa). Die Spaltzugfestigkeit bei den Mischungen mit HMV-Aschehaltigen Kernbeton und Vorsatzschicht ist deutlich niedriger (2,2 MPa bei Mischung IV und 1,5 MPa bei Mischung VI). Somit würden nur die Referenzproben die normativen Anforderungen bezüglich der Festigkeit erfüllen. Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Abbildung 54 dargestellt.

Spaltzugfestigkeit Technikumsversuche

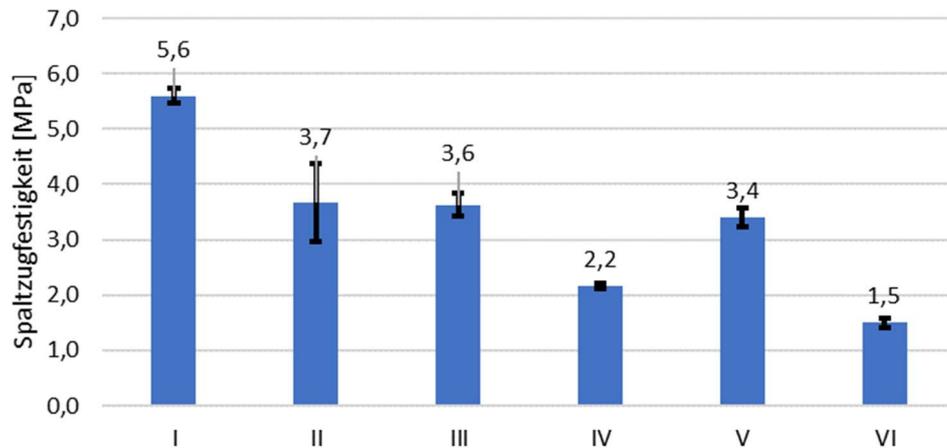


Abbildung 54: Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen der Technikmischungen

Weiteres Prüfkriterium gemäß der Norm ist der Frost-Tausalz-Widerstand (DIN EN 12390-9). Die CDF-Truhe wurde mit 15 entsprechend präparierten Probekörpern befüllt und 28 Zyklen mit Wechsel von +20 °C auf -20 °C in 3%iger NaCl-Lösung durchgeführt. Geprüft wurden die Mischungen II bis VI. Dabei wird nach einer gewissen Anzahl Zyklen der Pflasterstein herausgenommen und als Ganzes gewogen. Die Abwitterungsrate wird dabei in [kg/m²] angegeben. Die Prüfung gilt als bestanden, wenn die Abwitterungsrate < 1500 g/m² beträgt. In Abbildung 55 sind die nummerierten aber noch nicht weiter präparierten Pflastersteine abgebildet.



Abbildung 55: Für die CDF-Prüfung ausgewählte und nummerierte Pflastersteine der Technikumsversuche

In Abbildung 56 sind die Werte des Abwitterungsmaßes nach den 28 Zyklen der Technikmischungen dargestellt. Die Werte sind jeweils als Mittelwerte der Mischungen dargestellt. Zwei Steine der VI-Serie sind nach den 28 Zyklen vollständig zerfallen und wurden nicht weiter betrachtet. Die Referenzmischungen haben sowohl als Kernbeton als auch mit

zusätzlicher Vorsatzschicht die Prüfung bestanden. Auffallend ist, dass die Abwitterung mit Vorsatzschicht deutlich geringer ist. Beide Mischungen mit HMV-Asche hingegen haben die Prüfung nicht bestanden. Im Schnitt ($n=3$) wurden bei der Mischung IV (nur Kernbeton; mit HMV-Asche als 0/2 und 2/8-Ersatz) ca. 17 kg/m^2 Masseverlust festgestellt. Zwar ist auch hier durch die zusätzliche Vorsatzschicht der Masseverlust auf ca. $1/3$ gesunken, liegt aber trotzdem noch deutlich außerhalb der Normwerte.

In Abbildung 56 ist auf der rechten Seite beispielhaft ein Pflasterstein der Mischung VI zu sehen, welcher die Prüfung nicht bestanden hat; siehe auseinandergedrückte Folie.

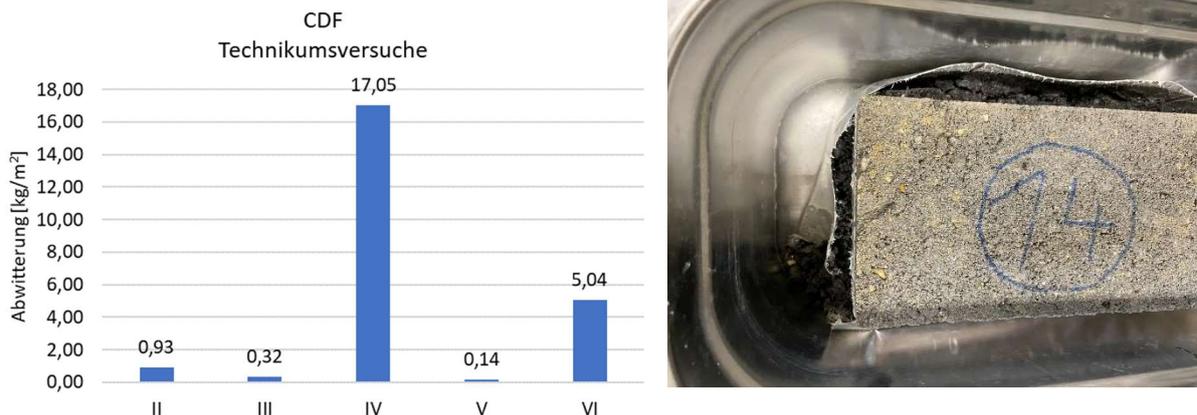


Abbildung 56: Ergebnisse der CDF-Prüfungen (links) und eine Probe der Mischung VI, welche die Prüfung nicht bestanden hat (rechts)

Tabelle 11 listet die jeweiligen Zusammensetzungen der Mischungen auf, jeweils auf ein Volumen von 1000 Litern gerechnet. Der Gesamtgehalt an Wasser umfasst das Wasser, welches zur Vorbenetzung genommen wurde, das regulär hinzugegebene Wasser, sowie das zusätzliche Wasser, um direkt während des Mischprozesses die gewünschte, erdfeuchte Konsistenz einzustellen. Bedingt dadurch, dass die Gesteinskörnung bei Anlieferung noch leicht feucht war, ist der Wassergehalt etwas höher, was besonders die Mischungen mit HMV-Asche betrifft.

Tabelle 11: Rezepturen der im Technikumsmaßstab hergestellten Pflastersteine für ein Volumen von 1000 l. Die Verdichtungshilfe ist basierend auf dem Zementgewicht. Angaben bis auf w/z-Wert in kg. Angegeben sind nur die Rezepturen für den Kernbeton.

Mischung	I	II	III	IV	V	VI
Art	Kernbeton	Kernbeton	Kernbeton + Vorsatz	Kernbeton	Kernbeton + Vorsatz	Kernbeton + Vorsatz
Zement	250	250	250	290	250	290
Kalksteinmehl	100	100	100	0	100	60
Wasser gesamt	92,9	58,9	62,2	121,8	61,4	118,9
Verdichtungsmittel	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,7%	0,8%
Sand 0/2	861,7	895,3	859,3	-	859,3	-
Kies 2/8	659,9	658,7	658,7	-	658,7	-
Kies 8/16	377,1	391,8	391,8	334,0	391,8	382,4
HMVA 0–2	-	-	-	812,7	-	930,3
HMVA 2–8	-	-	-	541,8	-	620,2
w/z gesamt	0,37	0,24	0,25	0,42	0,25	0,41

3.3.2 Großmaßstab

Im Werksversuch wurden, abgesehen von den Referenz-Pflastersteinen, fünf verschiedene Mischungen mit unterschiedlichen Anteilen von HMV-Asche im Kernbeton hergestellt. Hierbei wurde die gewaschene und nachträglich aufbereitete 2–8 mm-Fraktion verwendet. Zudem wurde HMVA-G als Zementsubstitut eingesetzt. Im Unterschied zu den Technikumsversuchen wurde ein CEM II höherer Festigkeitsklasse mit niedrigem, wirksamen Alkaligehalt eingesetzt (CEM II/B-S 52,5 N (na)). Der Zementgehalt konnte – bedingt durch die technischen Möglichkeiten der Presse – mit 180 kg/m³ sehr niedrig gehalten werden. Dabei wurden ebenfalls rechteckige Pflastersteine mit den Maßen 20x10x8 cm mit Fase hergestellt. Prozessbedingt konnte hier die HMV-Asche nicht mit Wasser vorbenetzt werden. Vor Ort musste – wie auch bei den vorherigen Versuchen – der Wassergehalt schrittweise angepasst werden, um die nötige, erdfeuchte Konsistenz zu erhalten. Somit liegt der eingesetzte w/z-Wert auch hier deutlich höher als bei den Referenzmischungen aufgrund des sehr hohen Wasseranspruchs der HMV-Asche. Es wurde dabei stets mit der gleichen Vorsatz-Rezeptur gearbeitet.

In Abbildung 57 sind zwei Fotos zu sehen, die während der Pflastersteinfertigung aufgenommen worden. Direkt nach dem Pressen der Pflastersteine fanden routinemäßige Kontrollen statt, um grundlegende Parameter (Höhe, Dichte, Verdichtungsmaß) direkt zu ermitteln. Nach der Herstellung wurden die Pflastersteine für eine Woche in einer Klimakammer bei einer Temperatur von 35 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 95% gelagert. Die Pflastersteine wurden anschließend ähnlich wie die der Technikumsversuche geprüft.



Abbildung 57: Pflastersteine der Großversuche direkt nach Herstellung

Beispielhaft sind jeweils ein gesägter Pflasterstein jeder Mischung in Abbildung 58 als Querschnitt dargestellt. Wie auch bei den Technikumsproben ist hier in den Großversuchen der HMV-Aschehaltige Kernbeton innerhalb der Pflastersteine durch seine dunkle Färbung gut zu erkennen und hebt sich deutlich von der Vorsatzschicht ab.



Abbildung 58: Querschnitte der Mischungen aus den Großversuchen

Bei den Versuchen zur Ermittlung des Abriebwiderstandes nach Böhme waren auch vereinzelt Metalle zu erkennen, allerdings deutlich weniger als bei den Technikumsproben. In Abbildung

59 ist ein Stück Metall zu sehen, das durch allmähliches Abschleifen während der Prüfung hervorgetreten war. Trotzdem mussten keine Prüfungen vorzeitig abgebrochen werden.



Abbildung 59: Metallstück bei der für den Abriebwiderstand nach Böhme vorbereiteten Probe der Mischung „gelb“

Die Klassifizierung nach DIN EN 1338 richtet sich nach den erzielten Werten. Dabei gibt es die Klassen 1 (keine Anforderung), 3 ($< 20.000 \text{ mm}^3$) und 4 ($< 18.000 \text{ mm}^3$). Die Ergebnisse der Prüfungen sind in Abbildung 60 dargestellt ($n = 3$). Mit Ausnahme der Mischung „blau“ erfüllen alle restlichen Mischungen die höchsten Anforderungen. Da ein Probekörper der Mischung „blau“ einen extrem hohen Schleifverlust hatte (112.330 mm^3) ist der Mittelwert entsprechend hoch.

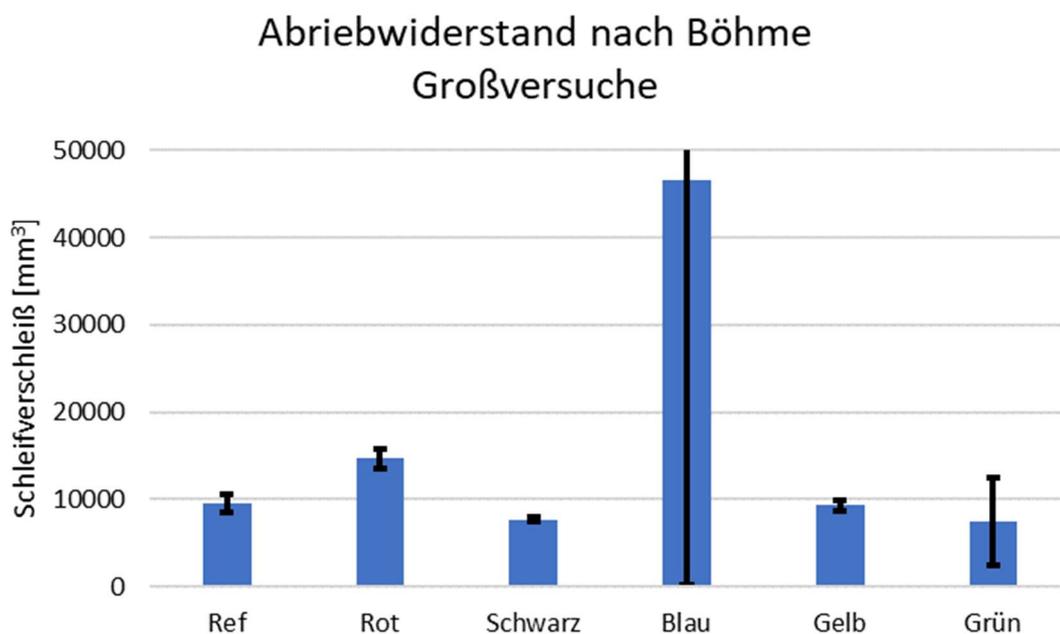


Abbildung 60: Ergebnisse der Prüfung des Abriebwiderstandes nach Böhme der Mischungen der Großversuche.

An den Pflastersteinen aus den Werksversuchen wurde ebenfalls die Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 1338 bestimmt, die Ergebnisse sind in Abbildung 61 graphisch dargestellt. Die Referenzmischung erfüllt mit im Mittel ca. 4,6 MPa die normativen Vorgaben. Die Mischung „schwarz“ erreichte mit ca. 3,6 MPa im Mittel knapp die Anforderungen an die mittlere Spaltzugfestigkeit nach Norm, jedoch lag ein Einzelwert unterhalb des geforderten Mindestwertes von 2,9 MPa. Alle anderen Mischungen liegen zum Teil deutlich unter der geforderten Spaltzugfestigkeit von 3,6 MPa. Die Mischung „rot“ hat eine mittlere Spaltzugfestigkeit von 2,8 MPa; die Mischung „blau“ 1,9 MPa, die Mischung „gelb“ 1,7 MPa und die Mischung „grün“ ebenfalls 1,7 MPa. Wie stark das Nacherhärtungspotenzial der einzelnen Mischungen ist wurde nicht betrachtet

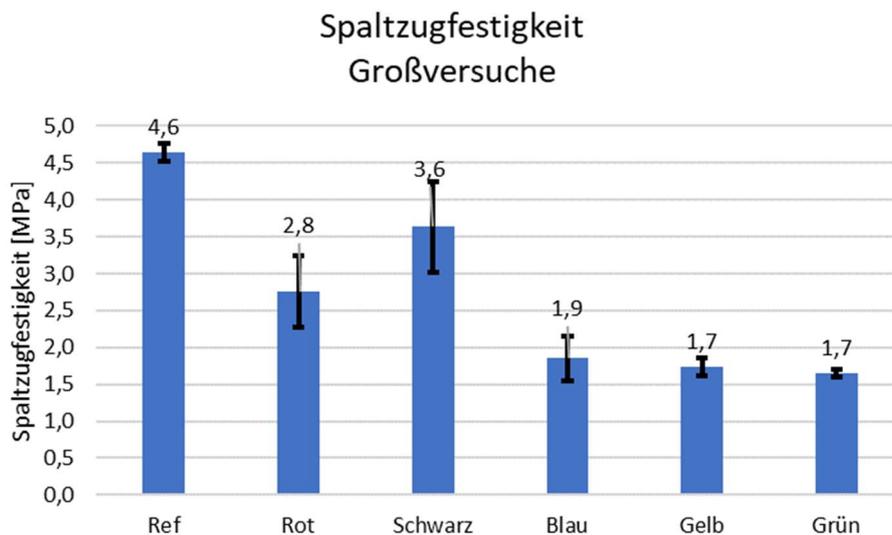


Abbildung 61: Ergebnisse der Spaltzugfestigkeitsprüfungen der Pflastersteine der Großversuche

Wie bei den Proben der Technikumsversuche wurden auch diese Pflastersteine den CDF-Tests unterzogen ($n = 3$; Abbildung 62). Die Referenzserie wurde nicht getestet, da bereits die Technikumsproben die Normbedingungen erfüllt hatten. Bedingt dadurch, dass in den Probenreihen manche Pflastersteine vollständig auseinandergefallen sind, ist die Abwitterung, ebenso wie die Standardabweichung, entsprechend groß. Mit einer Abwitterung von $0,7 \text{ kg/m}^2$ hat die Mischung „rot“ die Prüfung bestanden. Möglicherweise könnte bei einer größeren Probenreihe die Mischung „schwarz“ auch die normativen Vorgaben erfüllen, das kann zum jetzigen Zeitpunkt aber nicht mit Sicherheit behauptet werden.

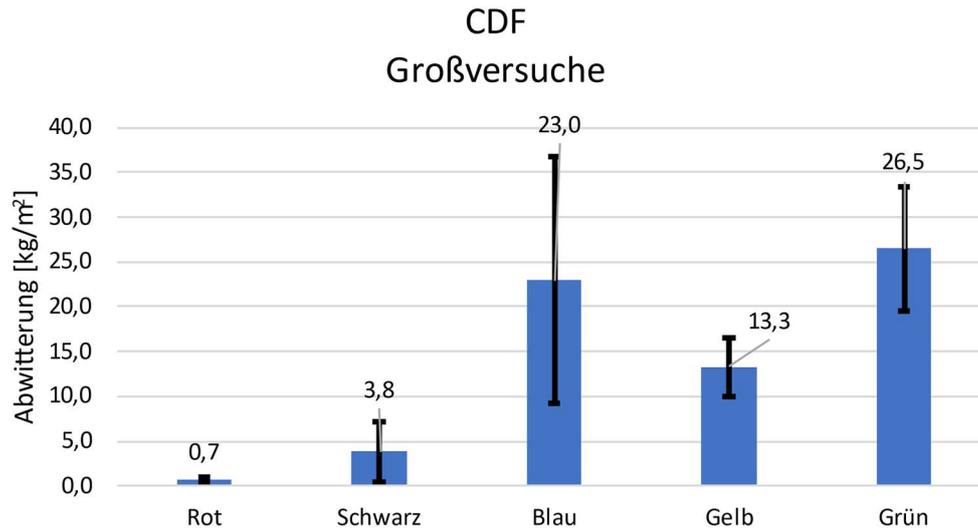


Abbildung 62: Ergebnisse der CDF-Prüfungen der Pflastersteine der Großversuche

Ähnlich wie bei den Normprismen wurden an Bruchstücken des Kernbetons jeder Mischung die Porositätswerte bestimmt (s. Tabelle 12). Bei dem Kernbeton aus der Referenzprobe liegt die Rohdichte bei ca. $2,30 \text{ g/cm}^3$ und die Gesamtporosität bei ca. 12,7%. Die Rohdichte ist bei fast allen weiteren Mischungen höher, mit der Ausnahme von Mischung grün, bei der die Rohdichte des Kernbetons bei ca. $2,55 \text{ g/cm}^3$ liegt, obwohl die Gesamtporosität bei ca. 28,4% liegt und damit doppelt so hoch ist wie bei der Referenzmischung. Bezüglich der Porosität ist diese bei allen Mischungen höher als bei der Referenzmischung. Möglicherweise befand sich in dieser Probe ein Metallstück. Die Porosität ist bei Mischung rot und schwarz nur leicht erhöht (ca. 18,3 und 17,8%), bei den Mischungen Blau, Gelb und Grün hingegen deutlich erhöht (29,3%, 34,2%, 28,4%). Den größten Anteil stellen auch hier – ähnlich wie bei den Normprismen – die Kapillarporen, wobei besonders die letzten drei einen hohen Anteil an Gelporen haben. Dabei ist der Anteil von Kapillarporen bezüglich der Gesamtporosität stets geringer als bei der Referenzprobe (hier ca. ein Anteil von 64%, im Vergleich zu maximal 55% bei den Mischungen mit HMVA). Hingegen sind die Anteile an Luft- und Gelporen höher. Während Mischung Gelb einen ähnlichen, prozentualen Anteil an Luftporen hat wie die Referenzmischung (die Mischung Grün sogar weniger), haben die restlichen Mischungen einen höheren Anteil. Der prozentuale Anteil an Gelporen der Gesamtporosität (ca. 16% bei der Referenzprobe) ist im Vergleich bei allen HMVA-haltigen Mischungen höher, bei den Mischungen Blau, Gelb und Grün liegt dieser Anteil bei ca. 31%. Die Mischungen, bei denen die Gesamtporosität im Vergleich zur Referenzprobe moderat höher sind, haben auch am ehesten die normativen Ansprüche erfüllt. Sobald allerdings der Sand durch die 0-2 mm Fraktion ersetzt wird, steigt die Porosität im Kernbeton deutlich an, was unter anderem die Festigkeitsverluste im Vergleich zur Referenzmischung erklärt. Ebenfalls steigt der Anteil an Kapillarporen und Gelporen deutlich an, sobald die 0-2 mm Fraktion den Sand der natürlichen Gesteinskörnung ersetzt.

Tabelle 12: Rohdichte und Kennwerte der Porositätsmessungen des Kernbetons der Großversuche

	Rohdichte [g/cm³]	Gesamtporosität [%]	Luftporen [%]	Kapillarporen [%]	Gelporen [%]
Referenz	2,30	12,70	2,59	8,10	2,02
Rot	2,20	18,30	4,68	9,77	3,85
Schwarz	2,22	17,82	6,19	8,51	3,12
Blau	1,97	29,29	6,73	13,18	9,38
Gelb	1,84	34,24	7,14	16,60	10,50
Grün	2,55	28,43	3,72	15,49	9,22

In Tabelle 13 sind die ungefähren Zusammensetzungen der Mischungen dargestellt. Bedingt durch die Wasserangabe sind die Mischungen nur für die Referenzmischung auf 1000 l bezogen, bei den anderen ist das Volumen entsprechend der zusätzlichen Wasserzugabe erhöht.

Tabelle 13: Rezepturen der im Großversuch hergestellten Pflastersteine für ein Volumen von ca. 1000 l. Die Verdichtungshilfe ist basierend auf dem Zementgewicht. Angaben in kg. Angegeben sind nur die Rezepturen für den Kernbeton.

Mischung	Ref	Rot (M1)	Schwarz (M2)	Blau (M3)	Gelb (M4)	Grün (M5)
Zement	180	180	160	160	160	160
HMVA-G	-	-	20	20	20	40
Kalksteinmehl	99	99	99	99	99	99
Wasser gesamt	125	Ca. 200	Ca. 205	Ca. 240	Ca. 255	Ca. 265
Verdichtungshilfe	0,78%	0,88%	0,88%	0,88%	0,88%	1,0%
Sand 0/2	885	885	885	-	-	-
Kies 2/8	673	-	-	-	-	-
Kiessplitt 8/11	383	383	383	383	383	383
HMVA 0–2 mm				885	776,4	776,4
HMVA 2–8 mm		673	673	673	722	722

3.4 Schadstoffaustragspotential, Materialflussanalysen und Ökobilanzierung

3.4.1 Elutionsversuche zur Bestimmung der Mobilisierbarkeit von Schadstoffen

Die Pflastersteinmischungen M1 (100%iger Ersatz von Kies 2-8 mm, Mischung „rot“ in Kapitel 3.3.2), M2 (100%iger Ersatz von Kies 2-8 mm und 10%iger Zementersatz, Mischung „schwarz“ in Kapitel 3.3.2) sowie M4 (100%iger Ersatz von Kies 2-8 mm und Sand 0-2 mm sowie 10%iger Zementersatz, Mischung „gelb“ in Kapitel 3.3.2) wurden gebrochen und korngößenspezifisch eluiert, mit dem Ziel das Schadstoffpotential zu bewerten. In Abbildung 63 bis Abbildung 66 sind die Ergebnisse für die Parameter Sulfat, Chlorid, Molybdän und Chrom dargestellt. Für alle Parameter zeigt sich, dass die Mischung M4 mit deutlich höheren

Schadstoffkonzentrationen im Eluat verbunden ist als die Mischungen M1 und M2. Dementsprechend ist die direkte Nutzung der Feinfraktion als Sandersatz (so wie in M4) aus umwelttechnischer Sicht als problematisch anzusehen, da das gebrochene Material den Molybdän-Grenzwert der Ersatzbaustoffverordnung für HMVA 1 (55 mg/l) nicht einhalten würde. Die Eluate der Mischungen M1 und M2 liegen dagegen deutlich unter den Grenzwerten der Ersatzbaustoffverordnung für Recyclingbaustoffe (sowohl RC-1 als auch HMVA-1) und können somit auch nach dem Nutzungsende im Materialkreislauf verbleiben. Nichtsdestotrotz weisen auch die Eluate der Mischungen M1 und M2 höhere Eluatkonzentrationen auf als die der Referenz-Pflasterstein ohne HMVA-Bestandteile. Die Konzentrationen sind jedoch im Vergleich zu den Konzentrationen der aufbereiteten HMV-Asche-Fractionen (vgl. Abbildung 25 und Abbildung 26) überproportional niedriger als aufgrund des Feststoffanteiles an HMV-Asche (ca. 30% in M1 und M2) zu erwarten wäre. Das deutet darauf hin, dass lösliche Substanzen in der Zementmatrix der Pflastersteine eingebunden und dadurch immobilisiert wurden. Für die Pflastersteinmischungen M1 und M2 zeigt sich somit, dass auch bei einem Recycling nach dem Lebensende der HMV-Pflastersteine keine Überschreitung der Grenzwerte der EBV zu erwarten ist. Die Eluatgehalte der Mischung M4 zeigen dagegen, dass die direkte Nutzung der Feinfraktion als Sandersatz zu einer Erhöhung der Konzentrationen im Eluat der gebrochenen Pflastersteine führt, die für den Einsatz als Recyclingbaustoff problematisch erscheint.

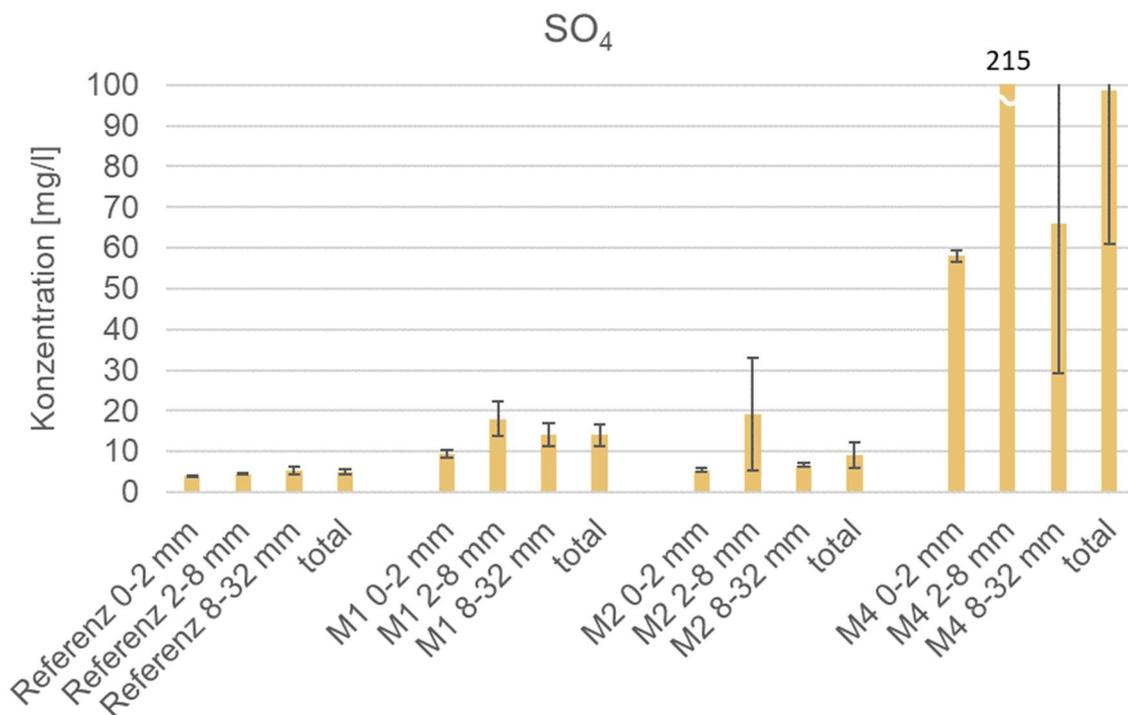


Abbildung 63: Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen für Sulfat (Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Analyseergebnisse an)

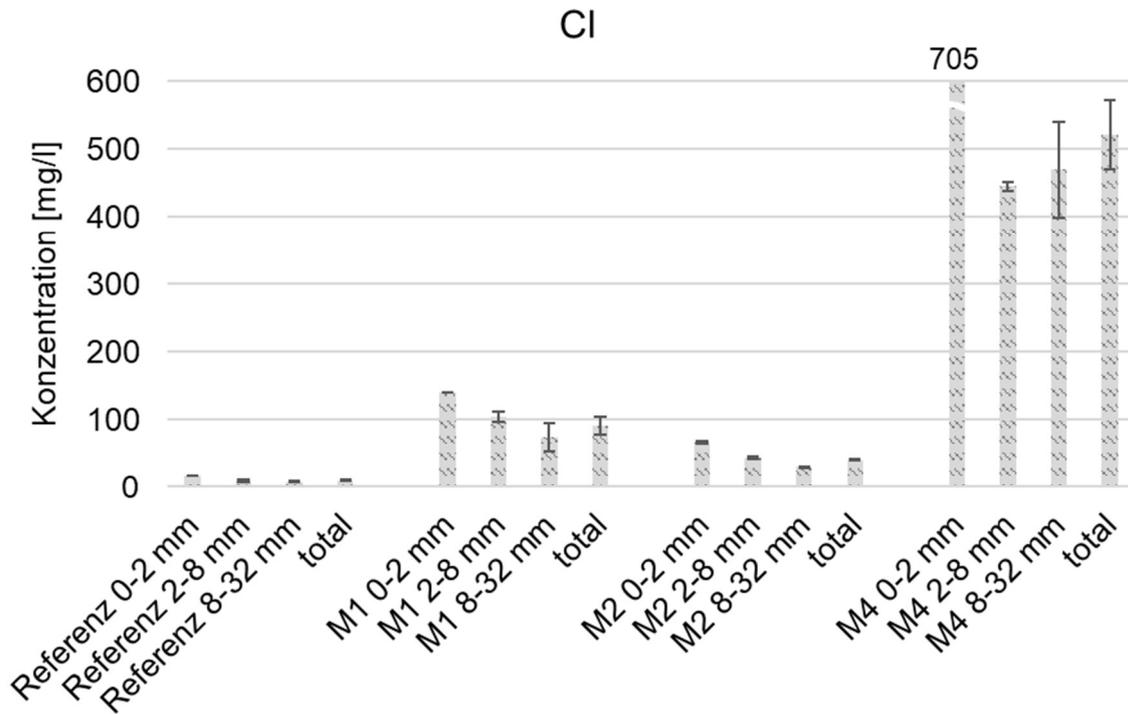


Abbildung 64: Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Chlorid (Fehlerbalken zeigen die Standardabweichung der Analyseergebnisse an)

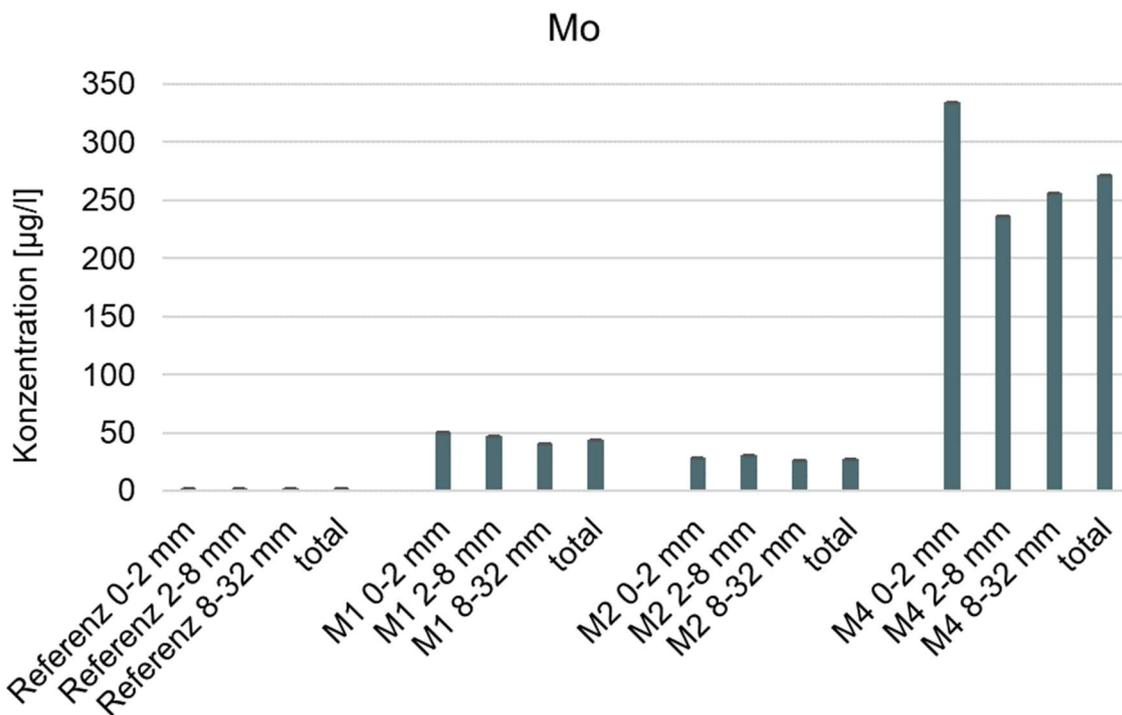


Abbildung 65: Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Molybdän

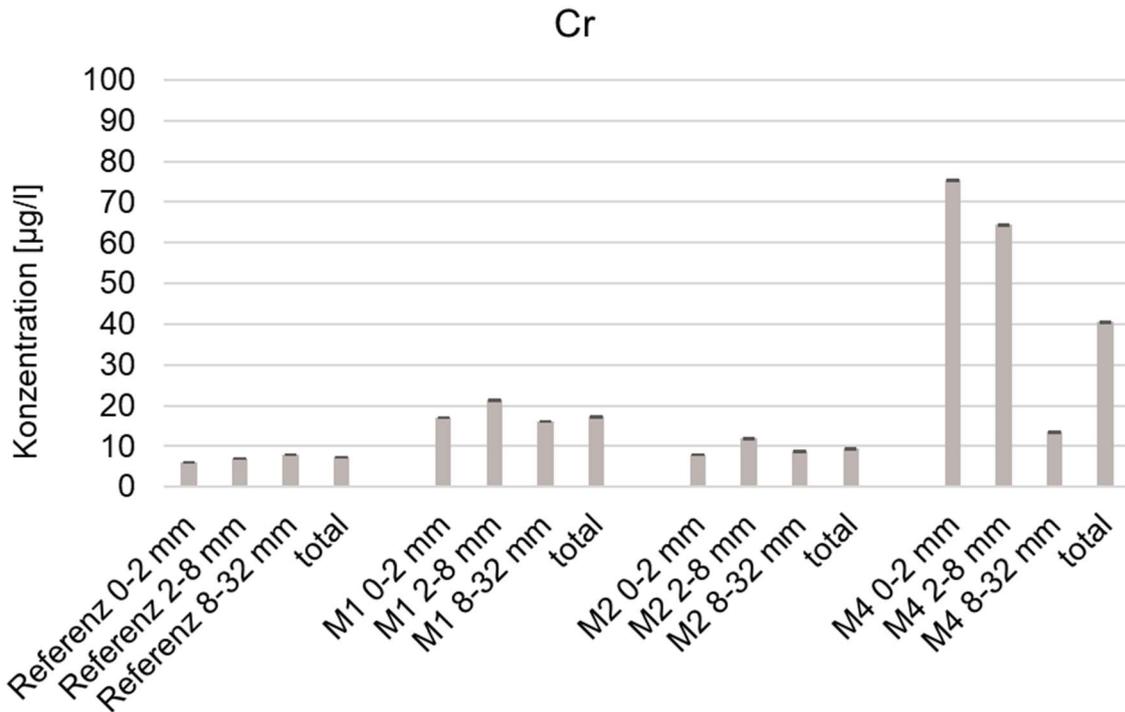


Abbildung 66: Eluatanalysen an gebrochenen HMV-Pflastersteinen: Chrom

3.4.2 Material- und Energiebilanzierung

Die Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Güterebene (Abbildung 67) und für die Stoffebenen Fe- und NE-Metalle (Abbildung 68 und Abbildung 69) sind in den folgenden Abbildungen dargestellt. Aus der Abbildung 67 geht hervor, dass die feine und mittlere Fraktion knapp 34% der gesamten Rohasche ausmachen und in Betonpflastersteinen eingesetzt werden können. Etwa ein Viertel der Rohasche macht die größte mineralische Fraktion 22-40 mm aus.

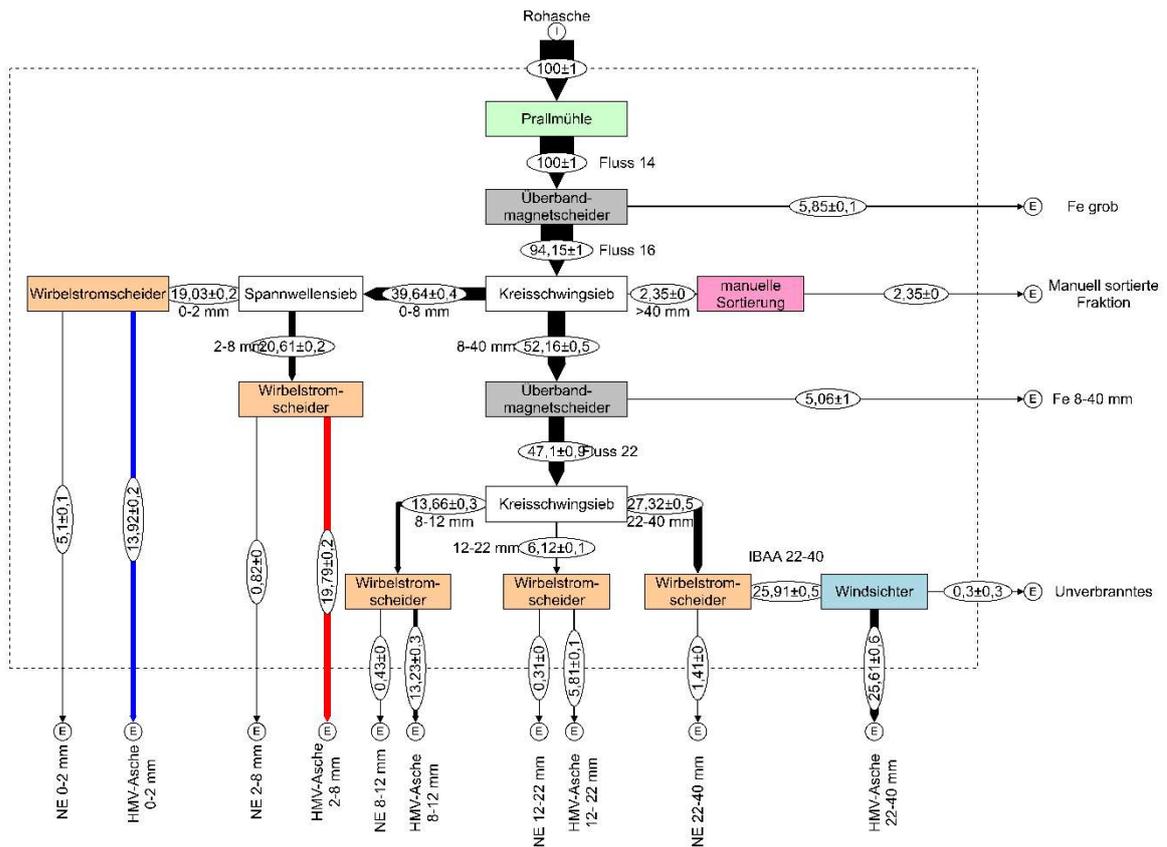


Abbildung 67: Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Güterebene; Darstellung in M.-% (Grubschat 2023)

Die folgenden zwei Abbildungen zeigen deutlich, dass die Zielfractionen der HMV-Asche (0-2 mm und 2-8 mm) nach der konventionellen Aufbereitung eine relevante Menge an Metallen (sowohl Fe als auch NE) enthalten. Die Feinfraktion enthält 0,6% Fe-Metalle und 2,0% NE-Metalle, die Gehalte der mittleren Fraktion liegen bei 3,8% für Fe-Metalle und 2,7% für NE-Metalle. Aus ökologischer Sicht sollten diese Metalle zurückgewonnen und dem Materialkreislauf zugeführt werden. Gleichzeitig wird durch deren Abtrennung auch die Qualität der mineralischen Fraktionen zur Nutzung in Beton verbessert.

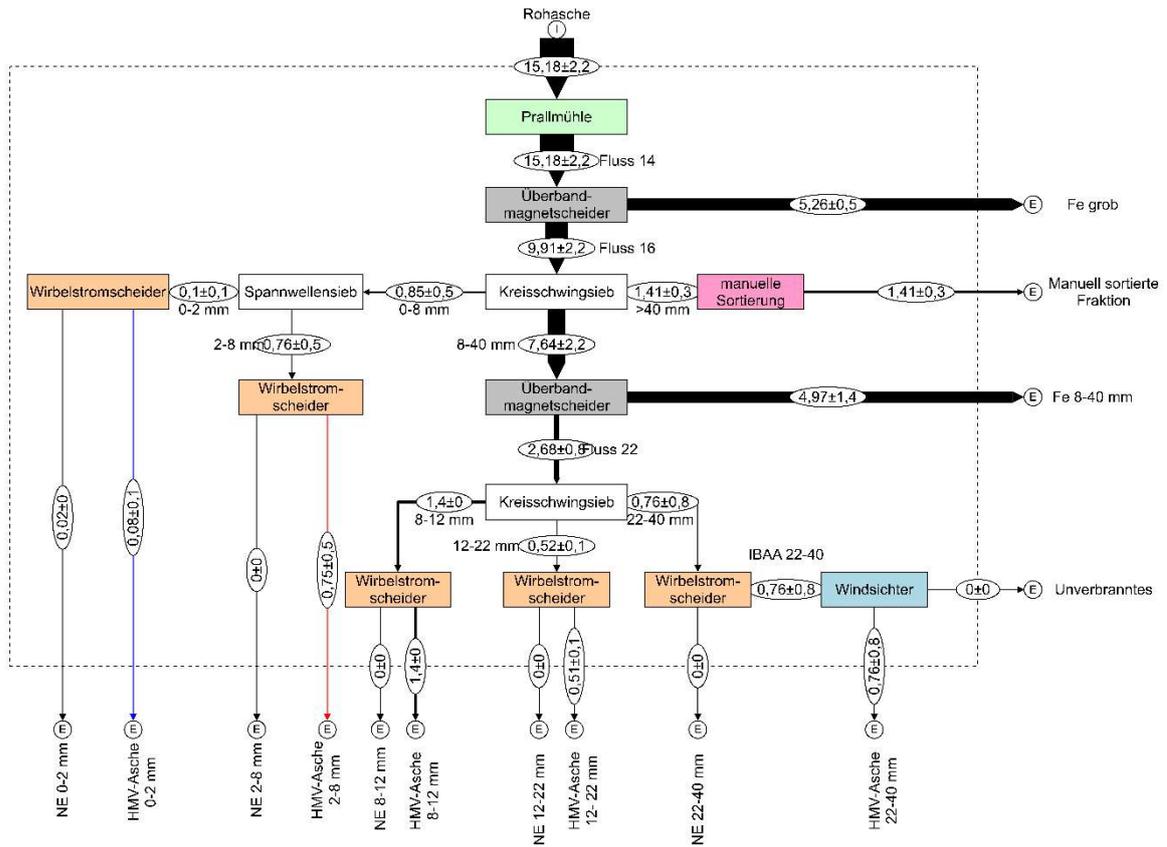


Abbildung 68: Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Stoffebene Fe-Metalle; in M.-% (Grubschat 2023)

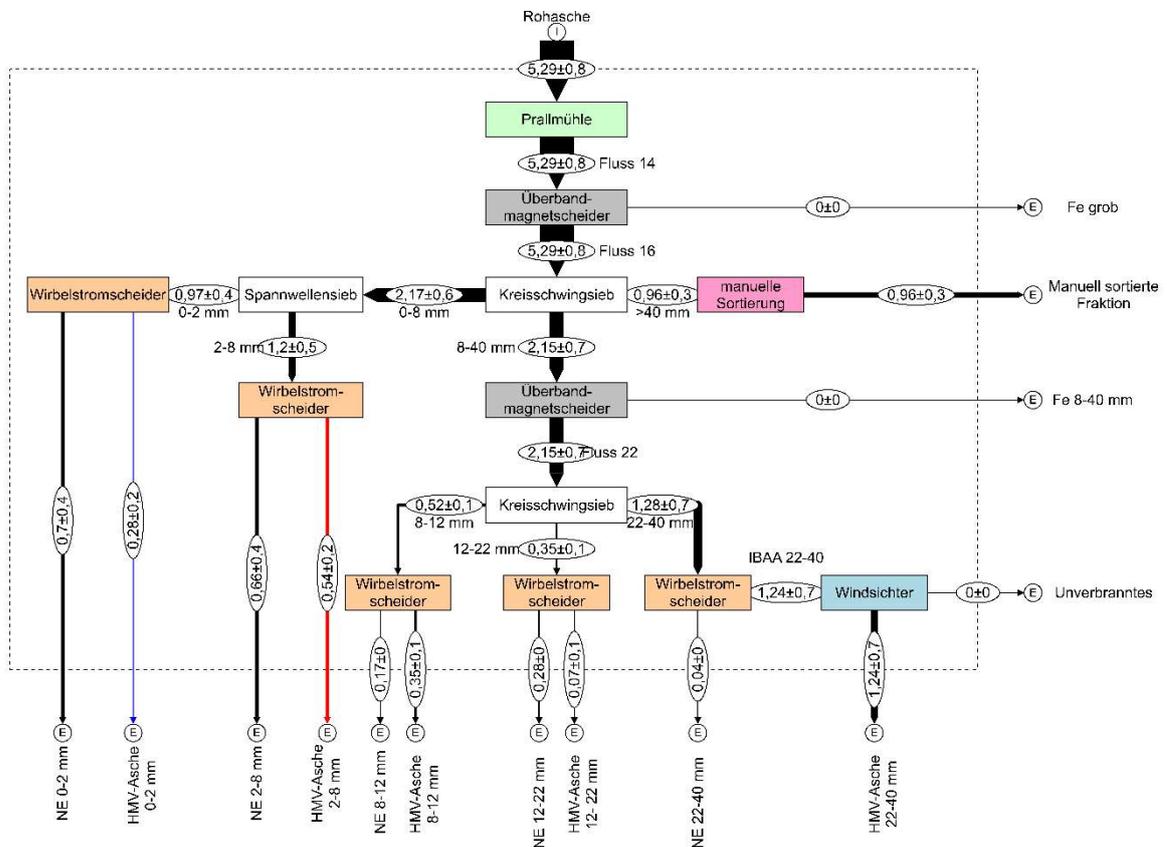


Abbildung 69: Materialflussanalyse der konventionellen Aufbereitung auf Stoffebene NE-Metalle; in M.-% (Grubschat 2023)

In den nachfolgenden Abbildungen (Abbildung 70 bis Abbildung 72) sind die Ergebnisse der Materialflussanalyse der untersuchten Aufbereitungs- und Verwertungswege für die Pflastersteinmischungen aus Tabelle 1 anhand von Materialflussdiagrammen dargestellt. Die Darstellungen beruhen auf den Bilanzen in Grubschat (2023). Wenn nur die mittlere Fraktion als Ersatz für die natürliche Gesteinskörnung 2-8 mm in Pflastersteinen eingesetzt wird, kann diese Fraktion vollständig für die Pflastersteinproduktion eingesetzt werden. In Bezug auf die jährliche Produktion von etwa 48.000 t HMV-Aschen beim MHKW Kassel könnten auf diese Weise ca. 14.200 Pflastersteine mit einem Anteil an HMV-Asche von 29% hergestellt werden.

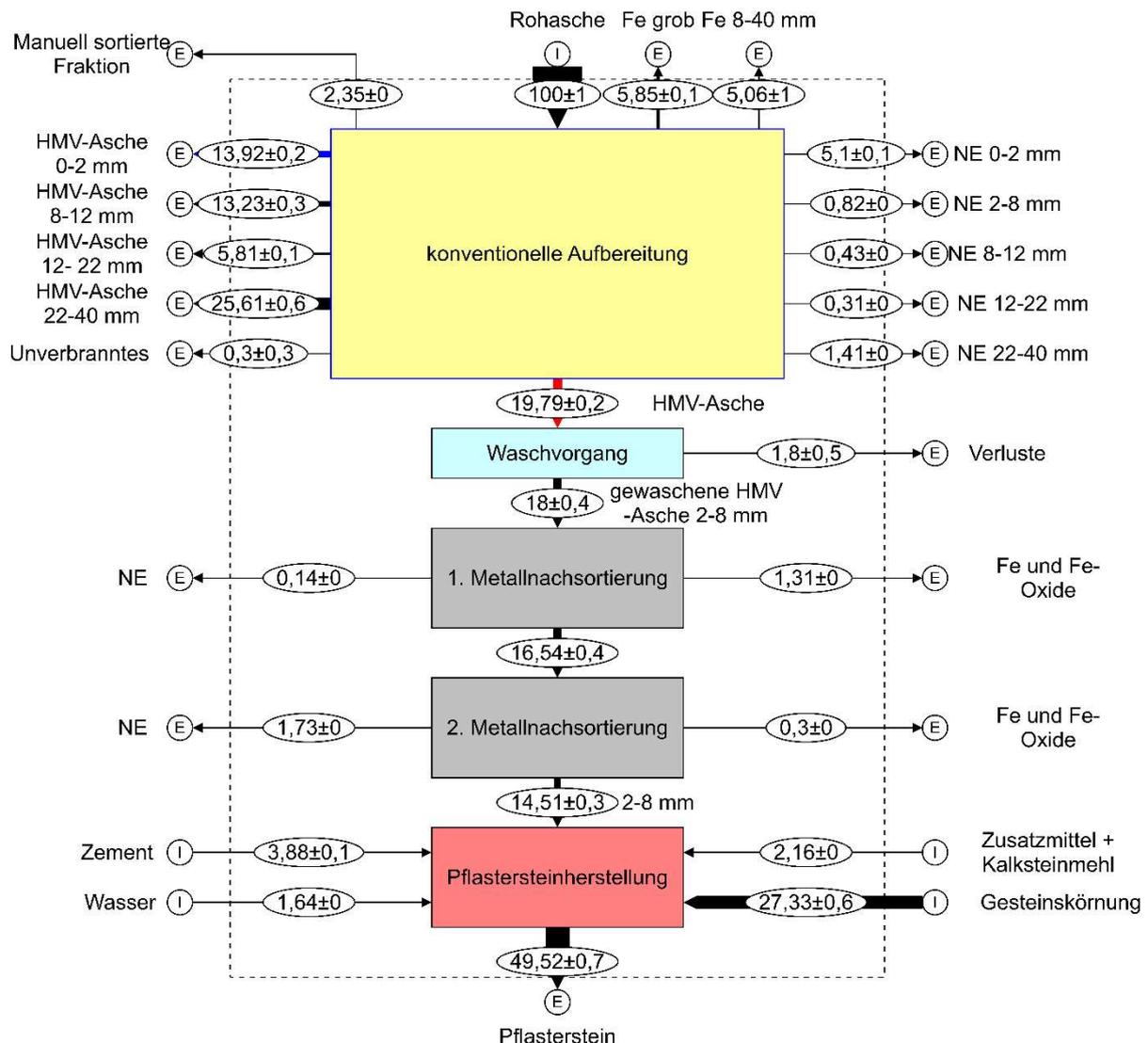


Abbildung 70: Güterbilanz des Aufbereitungs- und Verwertungsweges für die Mischung M1 (Angaben in M.% bezogen auf 100% Rohasche-Input)

Wenn zusätzlich zu der mittleren Gesteinskörnung auch 10% Zement durch gemahlene HMV-Asche substituiert werden (Abbildung 71), ist der Anteil an sekundären Rohstoffen in den Pflastersteinen 30%. In diesem Fall können 4,2% der aufbereiteten Feinfraktion in den Pflastersteinen verwertet werden. Der nicht im Pflasterstein einsetzbare Rest muss aufgrund der Überschreitung der Grenzwerte nach EBV deponiert werden.

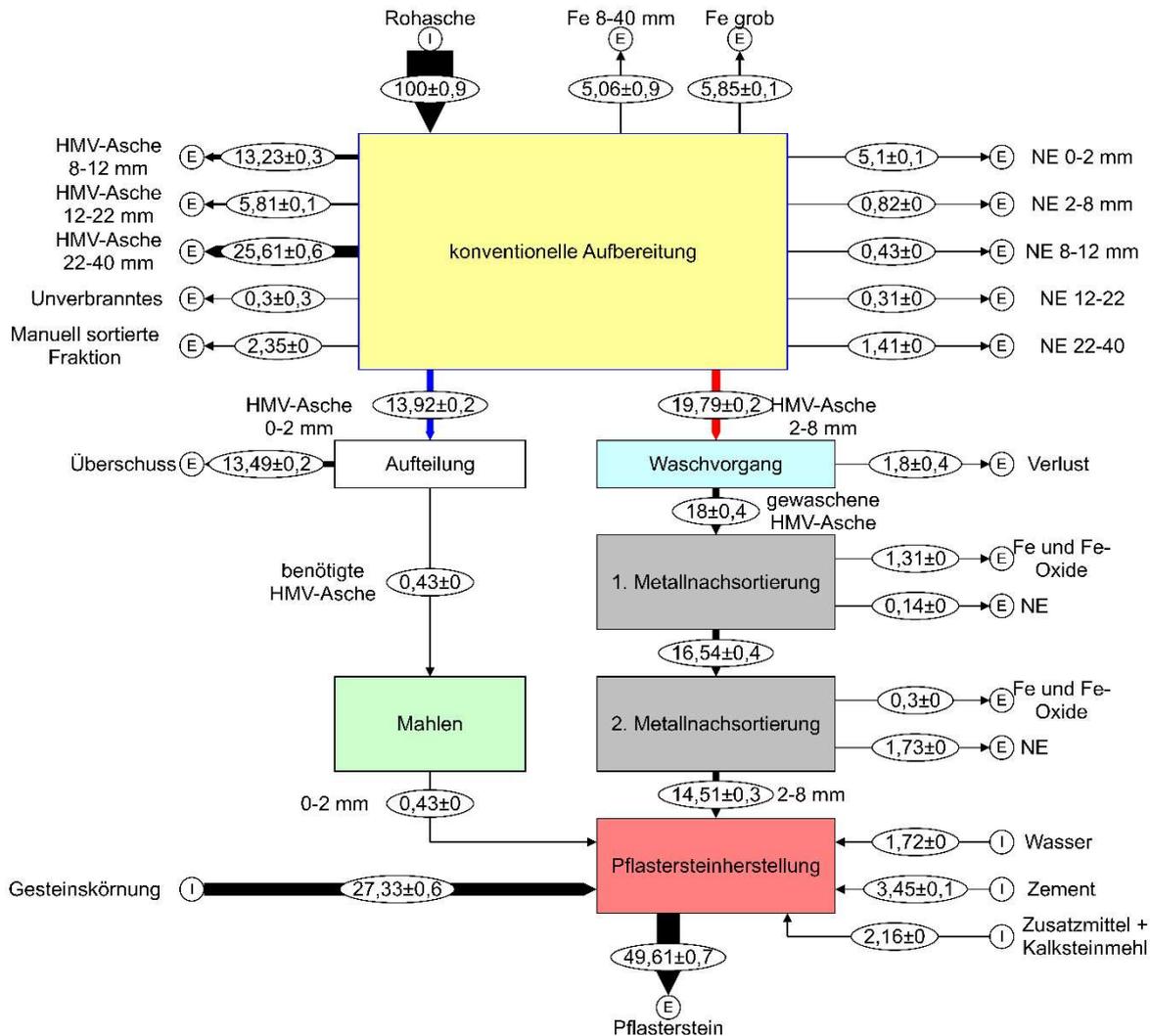


Abbildung 71: Güterbilanz des Aufbereitungs- und Verwertungsweges für die Mischung M2 (Angaben in M.% bezogen auf 100% Rohasche-Input)

Im letzten betrachteten Fall werden die komplette mittlere (2-8 mm Kies) und feine (0-2 mm Sand) natürliche Gesteinskörnung sowie 10% des Zements durch HMV-Asche substituiert (Abbildung 72). Dadurch bestehen die Pflastersteine aus 65% sekundären Rohstoffen. Der größte Teil der Feinfraktion wird für den Sandersatz (97,5%) verwendet und nur ein geringer Teil davon als Zementersatz (2,5%). Um das Mischungsverhältnis der Pflastersteinrezeptur einzuhalten, können nur 63,6% der aufbereiteten mittleren Fraktion eingesetzt werden. Eine Verwertung der restlichen mittleren Fraktion nach der Materialklasse HMVA-2 ist möglich. Die Verwertung der gröbereren Fraktionen über 8 mm wurde bereits im Kapitel 3.1.3 diskutiert.

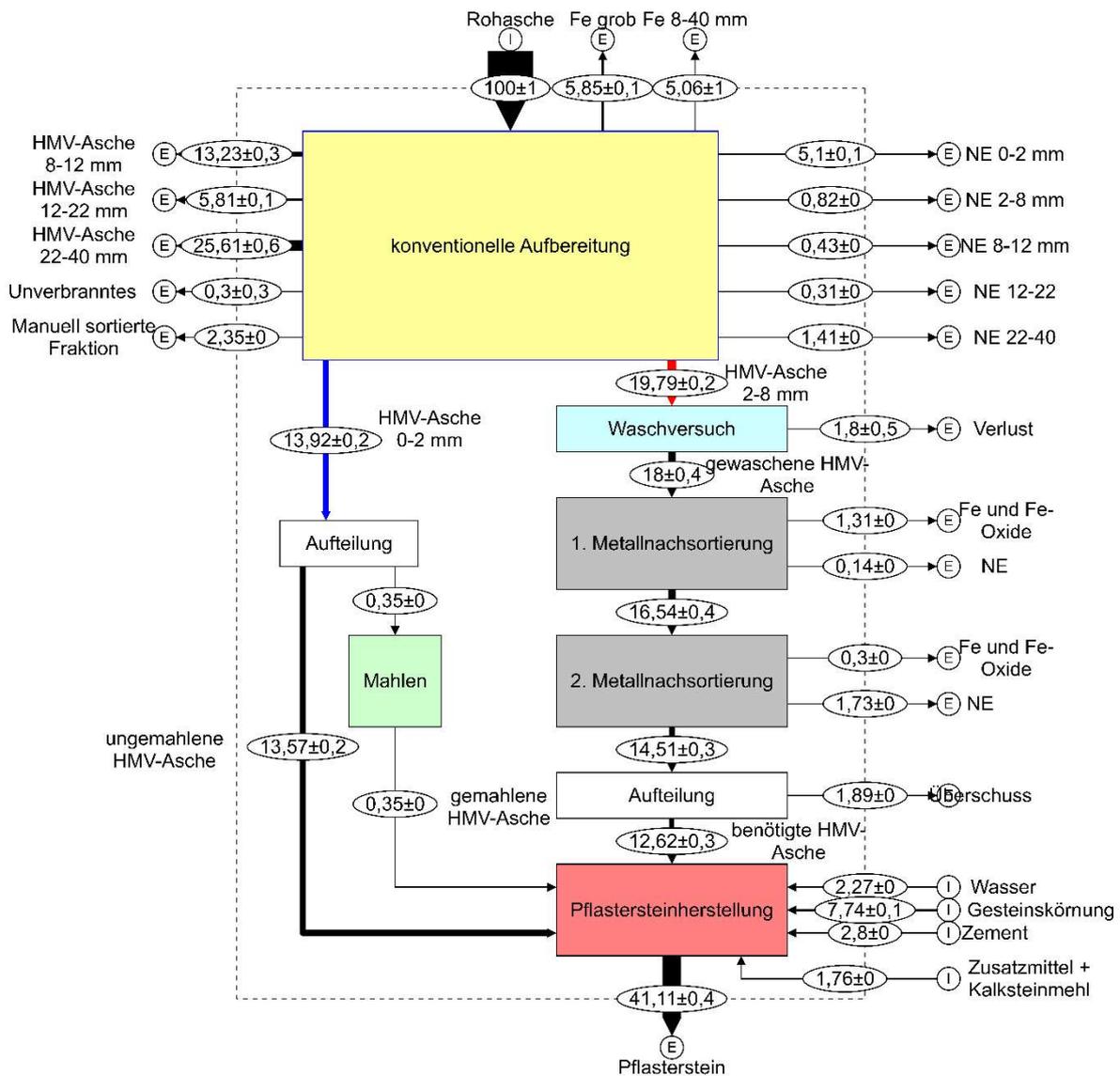


Abbildung 72: Güterbilanz des Aufbereitungs- und Verwertungsweges für die Mischung M4 (Angaben in M.% bezogen auf 100% Rohasche-Input)

In den folgenden drei Abbildungen sind die Energiebilanzen der drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten in MJ pro Tonne aufbereitete und transportierte HMV-Asche. Erwartungsgemäß steigt der Energieaufwand je mehr HMV-Asche aufbereitet und transportiert werden muss. So ist der niedrigste Energieaufwand bei der ersten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten (Abbildung 73) mit 438 MJ/t und der höchste Energieaufwand mit 864 MJ/t bei der zweiten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten (Abbildung 74). Im Fall, dass auch Sand ersetzt wird, ist der Aufwand leicht niedriger als bei der zweiten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten (Abbildung 75). Das liegt v.a. daran, dass die Feinfraktion für den Sandersatz nicht weitergehend im Großmaßstab aufbereitet wurde.

Auffällig ist, dass der Transport insgesamt einen hohen Anteil an dem Energieaufwand hat. Grund dafür ist, dass die weitergehende Aufbereitung im Rahmen des Projekts über 300 km weit entfernt stattgefunden hat. An dieser Stelle lässt sich Einsparpotential erkennen, wenn die weitergehende Aufbereitung ebenfalls in der Region stattfinden würde.

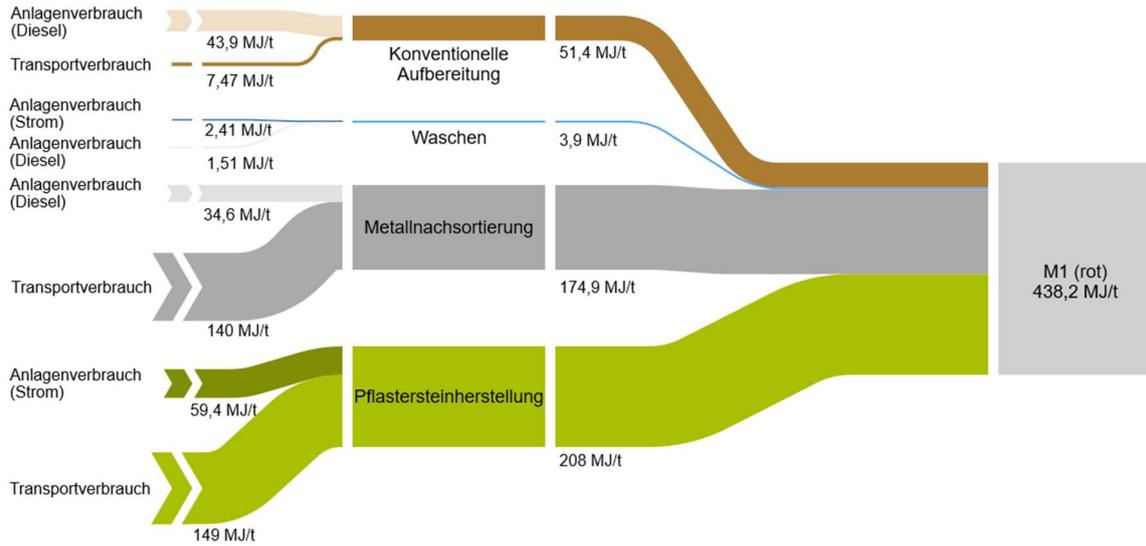


Abbildung 73: Energieverbrauch der Aufbereitungs- und Verwertungsrute M1

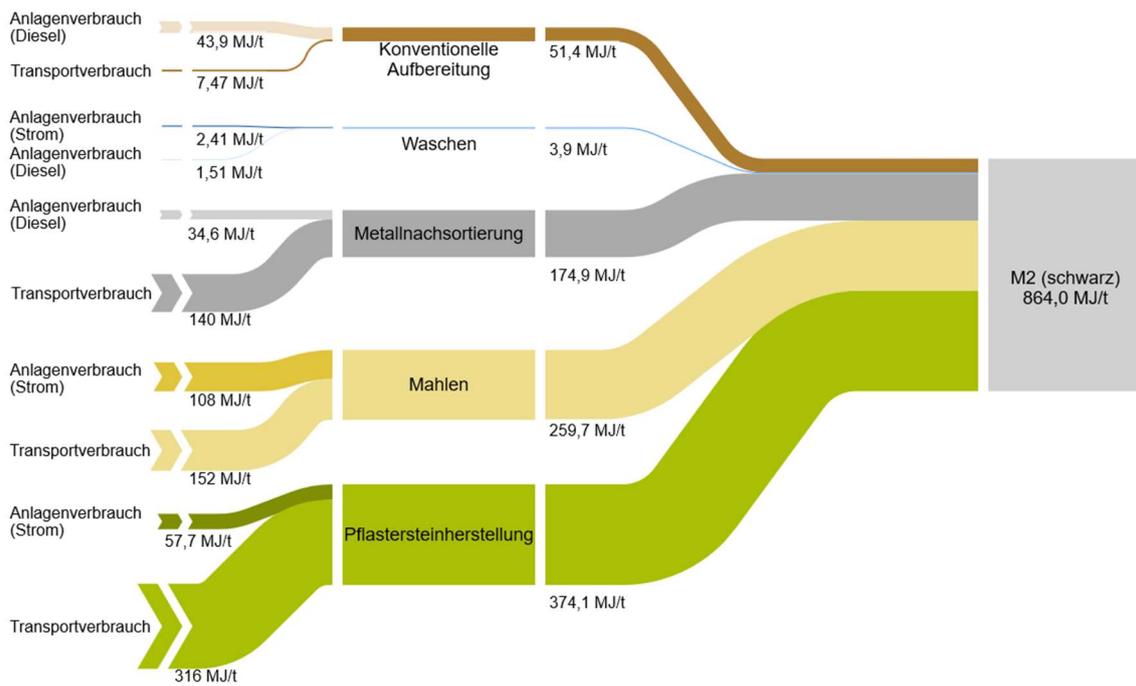


Abbildung 74: Energieverbrauch der Aufbereitungs- und Verwertungsrute M2

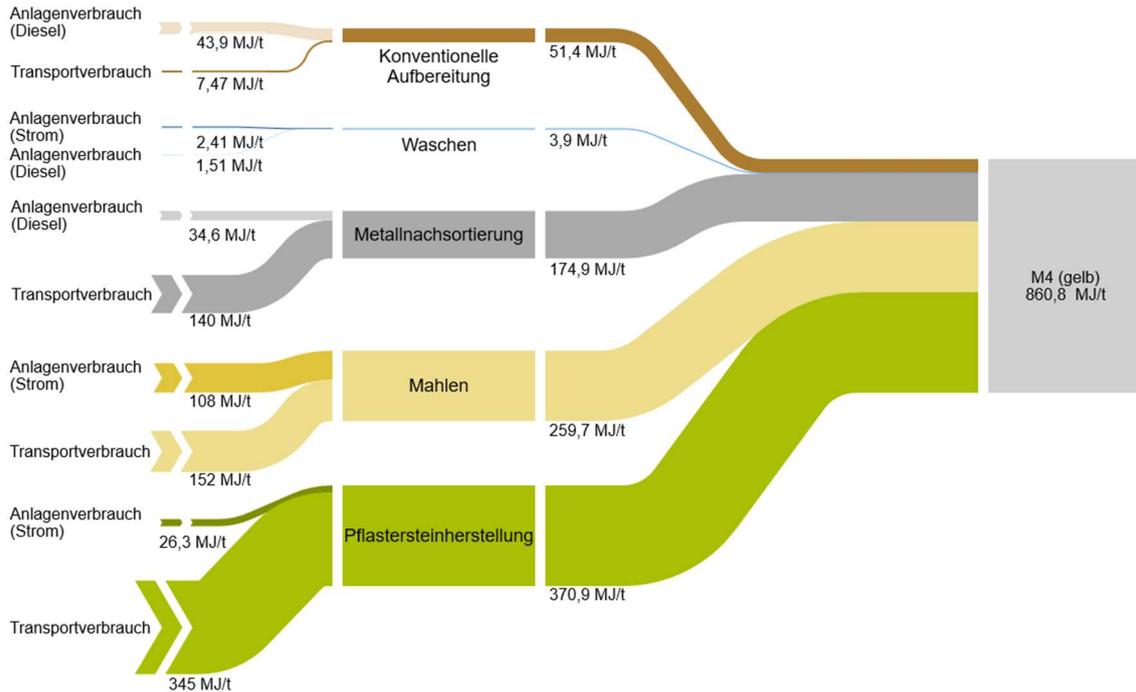


Abbildung 75: Energieverbrauch der Aufbereitungs- und Verwertungsrouten M4

3.4.3 Ökobilanzierung

Die Bilanzierung der drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten für die HMV-Aschen erfolgte sowohl mit den Transportdistanzen im Rahmen der Pilotstudie, wo die Versuche zum Mahlen der Feinfraktion und der weitergehenden Metallsortierung in relativ weit (über 300 km) entfernten Anlagen durchgeführt wurden als auch für ein regionales Szenario, dass eine Umsetzung der Verwertungskette in der Region Nordhessen annimmt (vgl. Abbildung 76 und Abbildung 77). Allgemein wird deutlich, dass der Großteil des Umweltnutzens durch die Aufbereitung von HMV-Asche aus der Zurückgewinnung von Nichteisen- und Eisenmetallen erzielt wird. Die Substitution von Zement und Kies leisten jeweils nur relativ kleine Beiträge, jedoch aus unterschiedlichen Gründen: Insgesamt wird im Rahmen der Szenarien M2 und M4 jeweils nur 0,6 bzw. 0,3% der Rohasche als Zementsubstitut eingesetzt, da die Mittelfraktion (2-8 mm) die Menge der Pflastersteine limitiert, die nach der jeweiligen Rezeptur erzeugt werden kann. Abgesehen von dieser rezepturbedingten Einschränkung im Verwertungsszenario wäre jedoch anhand der gemahlten Feinfraktion deutlich mehr Zementsubstitution möglich, was auch entsprechend höhere Gutschriften bringen würde (siehe dazu die produktbezogene Betrachtung in Abbildung 78). In Bezug auf die Kiessubstitution liegt der Grund für die relativ kleine Gutschrift dagegen nicht an der geringen eingesetzten Menge der Mittelfraktion sondern an den relativ geringen spezifischen Gutschriften für den Ersatz von Naturgestein in Beton.

Für den Fall der Pilotstudie-Transportdistanzen zeigt sich, dass die hohen Transportaufwendungen die ökologischen Vorteile der Zementsubstitution und weitergehenden Metallabtrennung mehr als ausgleichen und dadurch die Verwertung in der HMV-Asche je nach Pflastersteinmischung geringfügig kleinere Netto-Einsparungen ergibt als die Verwertung im Status Quo. In Bezug auf den Beitrag zur globalen Erwärmung (vgl.

Abbildung 76) zeigt sich beispielsweise, dass die Netto-Einsparungen durch die Verwertung einer Tonne Rohasche je nach Pflastersteinrezeptur um 2-4% niedriger sind als die Einsparungen durch den Status Quo. Von den Verwertungsszenarien in Betonpflastersteinen schneidet Szenario M2 (Pflastersteinrezeptur mit 100% Kiesersatz 2-8 mm und 11% Zementersatz) mit einer CO₂-Gutschrift von ca. 410 kg CO₂-eq pro Tonne Rohasche am besten ab. Da dieser Fall jedoch unrealistisch hohe Transportdistanzen für die Aufbereitung in Kauf nimmt, ist insbesondere das regionale Verwertungsszenario für den Vergleich mit der gegenwärtigen Praxis relevant. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Abbildung 77 in Bezug auf Treibhausgasemissionen dargestellt. Daraus ist ersichtlich, dass die regionale Verwertung der HMV-Asche in Betonpflastersteinen geringfügige Vorteile (je nach Szenario 1-3%) gegenüber dem Status Quo aufweist. Am besten schneidet auch in diesem Fall Szenario M2 ab, das in einer Netto-Einsparung von ca. 430 kg CO₂-eq pro Tonne Rohasche resultiert. Die etwas höhere Einsparung im Vergleich zu Szenario M4 ergibt sich durch die etwas größere Menge an gemahlener Feinfraktion, die im Rahmen von M2 als Zementsubstitut eingesetzt werden kann.

In Hinblick auf die weiteren Wirkungskategorien (nicht dargestellt) kann zusammenfassend festgehalten werden, dass alle regionalen Verwertungsszenarien mit Nutzung der HMV-Asche in Pflastersteinen leicht niedrigere Emissionen als der Status-Quo aufweisen und auch hier das Szenario M2 am besten abschneidet. Die Unterschiede sind aber auch für die anderen betrachteten Wirkungskategorien gering und liegen zwischen 0,2% und 2%. Ausschlaggebend für die geringen Unterschiede ist wiederum die relativ geringe Menge an Zement, die in Anbetracht der verfügbaren Mittelfraktion in den Rezepturen substituiert werden kann. Anschließend folgt daher eine produktbezogene Betrachtung, die keine solchen Einschränkungen beinhaltet.

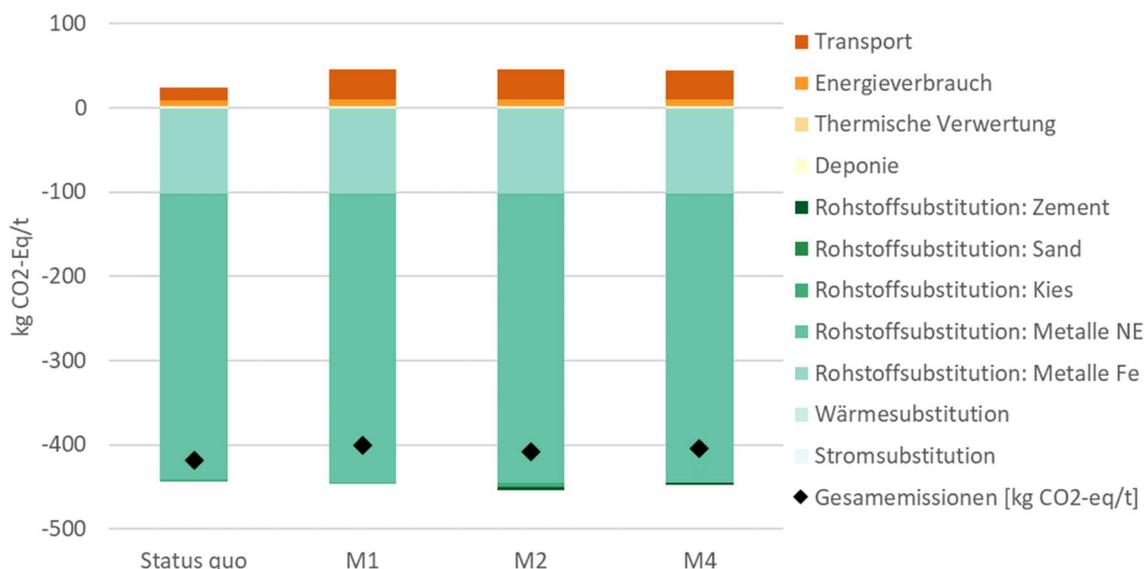


Abbildung 76: Treibhausgaspotential der aktuellen und der drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten für HMV-Aschen, bezogen auf eine Tonne Rohasche

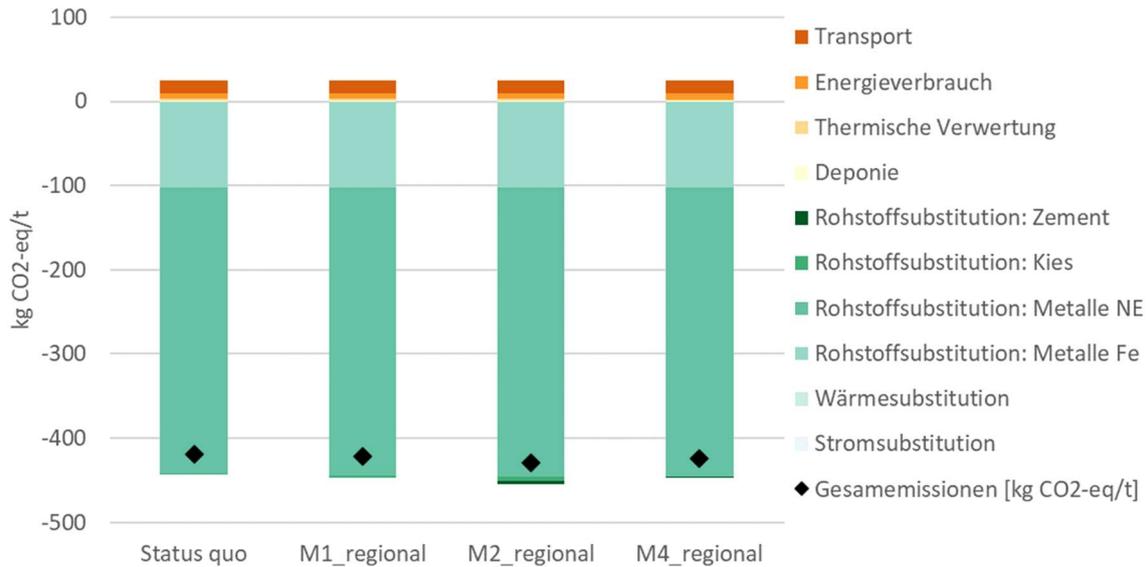


Abbildung 77: Treibhausgaspotential der aktuellen und der drei betrachteten Aufbereitungs- und Verwertungsrouten für HMV-Aschen nach einer Transportoptimierung (regionales Szenario), bezogen auf eine Tonne Rohasche

In der Betrachtung aus Produktperspektive werden die Ergebnisse der Ökobilanz pro Pflasterstein dargestellt. Durch die Veränderung der funktionalen Einheit auf „ein erzeugter Pflasterstein mit unterschiedlichen Rezepturen“ wird davon ausgegangen, dass die genutzten Fraktionen aus der HMV-Rohasche bereitgestellt werden können und somit keine Beschränkung durch die Verfügbarkeit der HMV-Asche-Fraktionen besteht. Die Ergebnisse für diese Betrachtung zeigen für den regionalen Fall (Abbildung 78), dass die Variante mit den höchsten Sekundärrohstoffanteilen (M4_regional) die niedrigsten Treibhausgasemissionen (Netto-Belastung von 0,26 kg/CO₂-eq pro Pflasterstein) aufweist. Für die anderen Rezepturen ergeben sich für M2 eine Netto-Belastung von 0,28 kg/CO₂-eq pro Pflasterstein und für M1 eine Netto-Belastung von 0,36 kg/CO₂-eq pro Pflasterstein. Die Herstellung des Referenzpflastersteins aus Primärmaterialien ist im Vergleich mit einer Netto-Belastung von 0,41 kg/CO₂-eq verbunden. Insgesamt werden die die größten CO₂-Einsparungen werden durch die Zementsubstitution (ca. 0,07 kg CO₂-eq pro Pflasterstein niedrigere Belastungen durch den Zementeinsatz als im Referenzfall) erzielt, wodurch sich auch die niedrigeren CO₂-Fußabdrücke von M2 und M4 ergeben. Außerdem trägt die zusätzliche Metallrückgewinnung im Zuge der weitergehenden Aufbereitung in allen Szenarien (M1, M2 und M4) zur Reduktion des CO₂-Fußabdruckes bei, da dadurch ca. 0,04 kg CO₂-eq pro Pflasterstein an Gutschrift erzielt werden. Die Substitution von Kies und Sand leistet in Bezug auf Treibhausgasemissionen einen relativ kleinen Umweltentlastungsbeitrag von max. 0,01 kg CO₂-eq pro Pflasterstein.

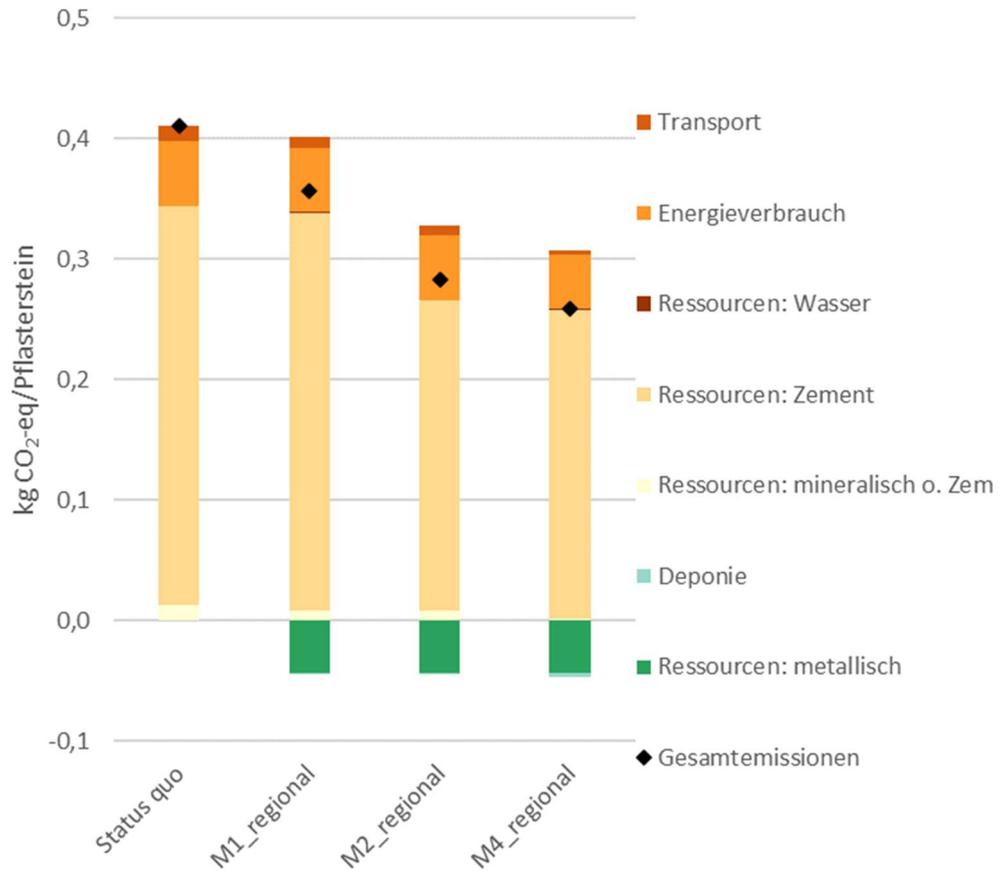


Abbildung 78: Treibhausgaspotential eines typischen Pflastersteins und der drei HMV-Pflastersteine nach Transportoptimierung (regionales Szenario), bezogen auf einen Pflasterstein

4 Projektdissemination zum Zeitpunkt des Abschlussberichtes

Zu Beginn des Projekts wurde eine Pressemitteilung durch die Universität Kassel herausgegeben, in der das Forschungsvorhaben der Öffentlichkeit vorgestellt wurde. Diese Mitteilung ist auf großes mediales Interesse gestoßen und hat viele Rückmeldungen ergeben.

Im März 2022 wurde das Projekt in einem Vortrag auf dem 11. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft in Dresden, der von der DGAW jährlich organisiert wird, vorgestellt. Im Rahmen der Konferenz wurde ein Beitrag zu dem Thema im Konferenzband veröffentlicht.

Im Juli und August 2022 hat die Universität Kassel im Rahmen der documenta 15 den „Wissensspeicher“ präsentiert, ein Ausstellungsprojekt mit 100 Ideen aus Wissenschaft und Kunst für eine nachhaltigere Zukunft. Die Fachgebiete RM&AT und WdBB haben gemeinsam das Projekt HMV-Öko-Beton in diesem Rahmen ausgestellt und in einem Vortrag der interessierten Öffentlichkeit präsentiert.

Im November 2022 wurden Zwischenergebnisse aus dem Projekt an der Konferenz Recy & DepoTech in Leoben, Österreich vorgestellt. Im Rahmen dieser Konferenz wurde ein Beitrag im Konferenzband veröffentlicht.

Im März 2023 wurden die Zwischenergebnisse des Projekts auf dem 12. Wissenschaftskongress Abfall- und Ressourcenwirtschaft in Hamburg präsentiert. Im Rahmen der Konferenz wurde ein Beitrag zu dem Thema im Konferenzband veröffentlicht.

Das DBU-Projekt wurde hinsichtlich des betontechnologischen Aspekts im April 2023 auf dem 8. International Slag Valorisation Symposium vorgestellt und eine schriftliche Ausarbeitung in den Proceedings der Tagung veröffentlicht.

Im Mai 2023 konnte das Projekt auf der Tagung der Verbände ITAD, IGAM und vgb in Düsseldorf präsentiert werden.

Im Oktober 2023 wurden ausgewählte Ergebnisse aus dem Projekt auf dem Sardinia-Symposium in Sardinien mit zugehörigem Tagungsbandbeitrag vorgestellt.

Auf der 2. Hessischen Ressourcenschutzkonferenz, die im November 2023 stattfand, wurde das Projekt im Rahmen einer Posterpräsentation vorgestellt.

Derzeit sind zwei Veröffentlichungen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften in Vorbereitung. Die eine Veröffentlichung betrifft die Aufbereitung der HMV-Aschen und insbesondere der Feinfraktion zur Nutzung in Beton. In der anderen werden die bautechnischen Eigenschaften der aufbereiteten HMV-Aschen für die Nutzung im Beton adressiert.

5 Fazit und Ausblick

Im Rahmen des Projekts HMV-Öko-Beton wurden ausgewählte Kornfraktionen der HMV-Asche aufbereitet und deren Eigenschaften so optimiert, dass eine Nutzung als Ersatz für natürliche Gesteinskörnung und Zement in Betonprodukten ermöglicht wurde.

HMV-Aschen des MHKW Kassel wurden in rohem und gealtertem Zustand zu unterschiedlichen Zeitpunkten und nach unterschiedlichen Aufbereitungsstufen umfassend charakterisiert. Für die Kornfraktionen 0-2 mm und 2-8 mm wurden unterschiedliche Aufbereitungspfade getestet und schließlich optimierte Verfahren zur weitergehenden Abtrennung von Metallen (v.a. Aluminium und Zink) und zur Verbesserung der Reaktivität identifiziert. Trotz der weitergehenden Aufbereitung wurden durch die untersuchten Kornfraktionen die Grenzwerte der Materialklasse HMVA-1 (EBV) nicht eingehalten. In Bezug auf Molybdän im Eluat wurden auch die Grenzwerte der Materialklasse HMVA-2 der EBV nicht eingehalten. Eine Verwertung der aufbereiteten Kornfraktionen im Rahmen der EBV stellt sich daher als schwierig dar und erscheint in Hinblick auf lösliches Molybdän nur unter Anwendung weitergehender Nassaufbereitungsverfahren realistisch. In Bezug auf den Einsatz in Betonprodukten konnten jedoch insbesondere durch die zusätzliche Metallabtrennung sowie die sequentielle Mahlung und Siebung der Feinfraktion Qualitäten (Reduktion auf 0,3% metallisches Aluminium und Zink in der gemahlten Asche) erzielt werden, die einen Einsatz in Betonprodukten erlauben.

Die Ergebnisse der Phasenanalyse, der Wärmekalorimetrie und die Ergebnisse der Titrations deuten jedoch auch auf ein vorhandenes puzzolanisches Potential hin, welches durch zusätzliche Aufbereitungsschritte weiter verbessert werden könnte. Aufgrund der Eigenschaften der HMV-Asche-Fraktionen und den Erkenntnissen aus den bautechnischen und bauchemischen Laboranalysen wurden zweischichtige Betonpflastersteine als geeignete Produkte für den Einsatz der aufbereiteten HMV-Asche-Fraktionen identifiziert, da im Gegensatz zum konstruktiven Ingenieurbau relativ geringe normative Ansprüche erfüllt werden müssten. Die Nutzung der gemahlten Feinfraktion als Zementersatz ist trotz der erfolgten Abreicherung mit Restgehalten an metallischem Aluminium erfolgt, die im Beton eine erhöhte Porosität und damit einhergehend eine verminderte Druckfestigkeit verursachen und die es zu beherrschen gilt.

Im Rahmen der Werksversuche wurden die Labor- und Technikmischungen mittels Rezepturoptimierung auf ein Mischvolumen von 1,5 m³ hochskaliert. Dabei wurde bis zu 22 M.-% des Zements durch fein gemahlene HMVA und die komplette natürliche Gesteinskörnung durch die beiden HMV-Asche-Fraktionen (2-8 mm und 0-2 mm) substituiert. Die Substitution erfolgte dabei stets für den Kernbeton, die Beton-Vorsatzschicht blieb unverändert. Die Pflastersteine wurden nach der Herstellung Festbetonuntersuchungen unterzogen und gemäß DIN EN 1338 geprüft. Dabei wurden bestimmte normative Vorgaben in allen Fällen eingehalten, wie z.B. der Abriebwiderstand. Die Vorgabe zur Spaltzugfestigkeit wird von einer Mischung eingehalten, bei der einerseits die 2-8 mm-Fraktion durch die entsprechende HMV-Asche ersetzt wurde und andererseits auch 11 M.-% des Zementes ersetzt wurden. Diese Mischung erfüllte aber nicht die Vorgaben für den CDF-Test und damit der Frostbeständigkeit. Die Frostbeständigkeit nach Norm wurde hingegen bei der Mischung

nachgewiesen, bei der die 2–8 mm-Fraktion durch die entsprechende HMV-Asche ersetzt wurde; trotzdem bestehen noch Optimierungsmöglichkeiten. Prozessbedingt konnte die HMV-Asche-Fraktion im Pflastersteinwerk nicht vorgegast werden, was für eine kompaktere Struktur und höhere Festigkeiten sorgen könnte, was auch im Rahmen der Laborversuche bei kleineren Probekörpern gezeigt werden konnte. Auch der Einsatz von Zusatzmitteln, die den w/z-Wert verringern, könnte zur Festigkeits- und Dauerhaftigkeitssteigerung beitragen. Die Verwendung mit möglichst hohem Substitutionsgrad von HMVA ist bereits jetzt im eingeschränkten Anwendungsbereich denkbar, wenn beispielsweise keine Anforderungen an den Frostwiderstand oder an die Spaltzugfestigkeit gestellt werden.

So konnte die primäre Gesteinskörnung der Korngröße 2-8 mm vollständig in Betonpflastersteinen ersetzt werden und gleichzeitig die Produkthanforderungen an Pflastersteine eingehalten werden. Der nächste Schritt wäre, die 0-2 mm Fraktion einzubauen und durch betontechnologische Optimierung den Beton so zu konzeptionieren, dass auch diese Pflastersteine die normativen Vorgaben einhalten werden. Mit der Erschließung gewisser Betonwarenbereiche, wie zum Beispiel dem Kernbeton in Pflastersteinen, ist auch ein großer Absatzmarkt bereits vorhanden, bei dem die Weiterführung der Forschung zur Verbesserung der Eigenschaften zielführend ist. Weitere Untersuchungen, besonders im Bereich der Aufbereitung der Feinfraktion sind zudem nötig, um erfolgreich feine HMV-Asche als Zementersatz einsetzen zu können, da der Gehalt an metallischem Aluminium und Zink zu unerwünschter Gasbildung führt und damit ungewollt die Porosität der entsprechenden Betone erhöht.

Aus stoffflussanalytischer und ökologischer Sicht ist die erweiterte Aufbereitung und Verwertung der Zielfraktionen 0-2 mm und 2-8 mm in Betonpflastersteinen gegenüber der aktuellen Verwertungspraxis in einem regionalen Szenario zu bevorzugen, da dadurch Recyclingniveaus erhöht (je nach Rezeptur um 2 – 5%) und Umweltauswirkungen reduziert werden können. Der ökologische Fußabdruck der Pflastersteine sinkt, je mehr primäre Rohstoffe durch sekundäre Rohstoffe ersetzt werden. In Bezug auf Treibhausgasemissionen verbessert sich die Ökobilanz für das Szenario einer regionalen weitergehenden Aufbereitung von einer Netto-Belastung von 0,4 kg CO₂-eq pro Pflasterstein auf eine Netto-Belastung von ca. 0,26 – 0,36 kg CO₂-eq pro Pflasterstein. Die CO₂-Einsparungen ergeben sich dabei vor allem durch den Einsatz von gemahlener Feinasche als Zementersatz (Reduktion um ca. 0,07 kg CO₂-eq pro Pflasterstein) sowie die zusätzliche Metallrückgewinnung im Rahmen der weitergehenden Aufbereitung (Gutschrift von ca. 0,04 kg CO₂-eq pro Pflasterstein). Neben der besseren Treibhausgasbilanz der Pflastersteine werden durch die Verwertung der Fein- und Mittelfraktion in Beton auch Deponiekapazitäten geschont, da die beiden Fraktionen nach der Aufbereitung die Grenzwerte der EBV nicht einhalten würden und entweder deponiert oder weitergehend nass aufbereitet werden müssten. Da eine solche nasse Aufbereitung derzeit nicht stattfindet, kann durch den Einsatz in Pflastersteinen potenziell ca. 60% der HMV-Asche recycelt statt deponiert werden. Schadstoffe, die in der aufbereiteten HMV-Asche ein Hindernis für die Verwertung nach EBV darstellen, werden bei dem Einsatz in Pflastersteinen teilweise in der Zementmatrix, respektive in den CSH-Phasen, gebunden und somit zu einem geringeren Grad eluiert. Die Eluatgehalte der gebrochenen Pflastersteine zeigen zum einen, dass die direkte Nutzung der HMV-Feinfraktion als Sandersatz problematisch für das Recycling in Hinblick auf die Konzentrationen gelöster Schadstoffe erscheint und zum

anderen, dass durch den Ersatz von Zement und größerer Gesteinskörnung in HMV-Betonpflastersteinen keine Überschreitung der Grenzwerte für das Recycling zu erwarten ist.

Insgesamt belegen die Projektergebnisse, dass die Verwertung der Fein- und Mittelfraktion aus HMV-Asche in Beton nach weitergehender Aufbereitung möglich ist und Qualitäten erreicht werden, die eine Nutzung in Fertigbetonprodukten wie Pflastersteinen erlauben. Es besteht aber hinsichtlich verschiedener Aspekte weiterer Forschungsbedarf, um die Nutzung von HMV-Asche in Fertigbetonwaren hinsichtlich substituierter Anteile und Anwendungsbereichen zu optimieren und dadurch den ökologischen Fußabdruck von HMV-Öko-Beton-Produkten weiter zu reduzieren. Im Rahmen des gegenständlichen Projektes wurde ein Fokus auf die HMV-Asche des MHKW Kassel und die Verwertung in der Region Nordhessen gelegt. Obwohl das MHKW Kassel durchaus als typische deutsche Müllverbrennungsanlage (Rostfeuerung, Nassaustrag, vorwiegend unsortierte Siedungsabfälle im Input usw.) bezeichnet werden kann, ist eine belastbare Aussage zur Skalierung der vorliegenden Ergebnisse nur basierend auf weitere Untersuchungen von HMV-Aschen aus anderen Müllverbrennungsanlagen und entsprechend variierender Brennstoffinputs sowie Verbrennungstechnologien und -bedingungen möglich. Basierend auf entsprechenden Untersuchungen gilt es anschließend zu beurteilen, wie Aufbereitungsverfahren und Rezepturen in Abhängigkeit unterschiedlicher Ascheeigenschaften gegebenenfalls anzupassen sind. Abgesehen davon stellen auch die Optimierung der Abtrennung von metallischem Aluminium und Zink, die Abreicherung von Schwermetallen in der Feinfraktion sowie die Untersuchung der Effekte von Restmetallgehalten und Glas auf die Dauerhaftigkeit der Pflastersteine Forschungsbedarfe dar, die in zukünftigen Arbeiten adressiert werden sollten, um einen qualitätsgesicherten Einsatz von HMV-Asche in Betonfertigwaren in skalierbarem Ausmaß zu ermöglichen.

6 Quellenverzeichnis

Basten, Michael (2018): 11. Monitoringbericht Kreislaufwirtschaft Bau. Hg. v. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V. Berlin.

BMUV (09.07.2021): Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung - ErsatzbaustoffV). ErsatzbaustoffV.

Brunner, Paul H.; Rechberger, Helmut (2017): Handbook of material flow analysis. For environmental, resource, and waste engineers. Second Edition. Boca Raton: CRC Press Taylor & Francis Group.

Deike, R.; Smaha, Bartosz; Vennemann, Bettina; Knöpfelmacher, Aneta; Hoenig, Volker (2019): Kann die mineralische Fraktion der Feinfraktion der MVA-Schlacke in der Zementindustrie als Rohstoff eingesetzt werden? In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Thomas Pretz, Dieter Senk und Hermann Wotruba (Hg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen. Neuruppin: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 188–201.

DIN 19529, 2015-12: Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen mit einem Wasser/Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg.

DIN EN ISO 10304-1, 2009-07: Wasserbeschaffenheit - Bestimmung von gelösten Anionen mittels Flüssigkeits-Ionenchromatographie - Teil 1: Bestimmung von Bromid, Chlorid, Fluorid, Nitrat, Nitrit, Phosphat und Sulfat.

DIN EN ISO 17294-2, 2017-01: Wasserbeschaffenheit - Anwendung der induktiv gekoppelten Plasma-Massenspektrometrie (ICP-MS) Teil 2: Bestimmung von ausgewählten Elementen einschließlich Uran-Isotope.

DIN EN 12617-4, 2002: Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Teil 4: Bestimmung des Schwindens und Quellens

DIN EN 12390-9, 2002: Prüfung von Festbeton.

DIN CEN/TS 16637-2, 2014-11: Bauprodukte - Bewertung der Freisetzung von gefährlichen Stoffen - Teil 2: Horizontale dynamische Oberflächenauslaugprüfung.

DIN EN ISO 14044, 2018-05: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen.

DIN EN ISO 14403-1, 2012-10: Bestimmung von Gesamtcyanid und freiem Cyanid mittels Fließanalytik (FIA und CFA) – Teil 1: Verfahren mittels Fließinjektionsanalyse (FIA).

DIN 1045-2, 2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.

Grubschat, Jan (2023): Material- und Energiebilanzierung ausgewählter Verwertungsrouten für HMV-Asche. Bachelorarbeit. Universität Kassel.

Gy, Pierre (1992): Sampling of heterogeneous and dynamic material systems: Theories of heterogeneity, sampling, and homogenizing. Amsterdam: Elsevier.

Holm, Olaf (2016): ATR - Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen verfahren. Hg. v. BAM.

Holm, Olaf; Simon, Franz-Georg (2017): Innovative treatment trains of bottom ash (BA) from municipal solid waste incineration (MSWI) in Germany. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 59, S. 229–236. DOI: 10.1016/j.wasman.2016.09.004.

Hyks, Jiri; Hjelm, Ole (2018): Utilisation of incineration bottom ash (IBA) from Waste incineration. Prospects and Limits. In: Olaf Holm und Elisabeth Thomé-Kozmiensky (Hg.): Removal, treatment and utilisation of waste incineration bottom ash. Nietwerder: Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, S. 11–24.

ILCD Handbook (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook - General Guide for Life Cycle Assessment - Detailed Guidance. Hg. v. European Commission - Joint Research Centre - INstitute for Environment and Sustainability. Luxembourg.

ITAD (Hg.) (2020): Jahresbericht 2019. Online verfügbar unter <https://www.itad.de/ueberuns/mehr/jahresbericht/itad-jahresbericht-2019-webformat.pdf>, zuletzt geprüft am 13.12.2021.

ITAD (2023): ITAD Jahresbericht 2022/23. Hg. v. ITAD - Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.

Joseph, Aneeta Mary; Snellings, Ruben; van den Heede, Philip; Matthys, Stijn; Belie, Nele de (2018): The Use of Municipal Solid Waste Incineration Ash in Various Building Materials: A Belgian Point of View. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 11 (1). DOI: 10.3390/ma11010141.

Lübber, Stefan (2019): KMU-Innovativ - Verbundvorhaben Ressourceneffizienz: OPTIMIN - Optimierung der stofflichen verwertung mineralischer Rückstände aus der Abfallwirtschaft. Schlussbericht. Hamburg.

Lübber, Stefan; Enzner, Verena; Holm, Olaf (2018): Aufbereitung von Teilströmen der Abfallverbrennungsasche zu hochwertigen Zuschlagstoffen und deren Einsatz als Recyclingprodukte in der Baustoffindustrie. In: Stephanie Thiel, Elisabeth Thomé-Kozmiensky, Bernd Friedrich, Thomas Pretz, Peter Quicker, Dieter Georg Senk und Hermann Wotruba (Hg.): Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Neuruppin: TK.

Müller, Urs; Rübner, Katrin (2006): The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. In: *Cement and Concrete Research* 36 (8), S. 1434–1443. DOI: 10.1016/j.cemconres.2006.03.023.

Poth, Robert (2020): Die Treibhausgasemissionen der Zementindustrie. Online verfügbar unter https://rpoth.at/pastwork/zement_klimaschutz, zuletzt geprüft am 10.04.2020.

Quicker, Peter; Stockschräder, Jan; Zayat-Vogel, Battogtokh; Pretz, Thomas; Garth, Andrea; Deike, Rüdiger et al. (2018): Möglichkeiten einer ressourcenschonenden Kreislaufwirtschaft durch weitergehende Gewinnung von Rohstoffen aus festen Verbrennungsrückständen aus der Behandlung von Siedlungsabfällen (Possibilities of a resource-efficient recycling economy

by further extraction of raw materials from solid combustion residues from the treatment of municipal solid waste). Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.

Rüßmann, David; Pretz, Thomas; Gisbertz, Kilian; Friedrich, Bernd (2015): VeMRec - Verlustminimiertes Metallrecycling aus Müllverbrennungsraschen durch sensorgestützte Sortierung.

Seifert, Severin; Thome, Volker; Karlstetter, Christof; Maier, Matthias (2013): Elektrodynamische Fragmentierung von MVA-Schlacken - Zerlegung der Schlacken und Abscheidung von Chloriden und Sulfaten. In: Karl J. Thomé-Kozmiensky (Hg.): Aschen, Schlacken, Stäube - aus Abfallverbrennung und Metallurgie. Neuruppin: TK Verlag.

Statista (2022): Absatz von Betonsteinpflaster in Deutschland im Zeitraum 2018 bis 2022 und prognostiziert bis 2023. Online verfügbar unter <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1338806/umfrage/absatz-von-betonsteinpflaster-in-deutschland/>, zuletzt geprüft am 23.11.2023.

Statistisches Bundesamt (Destatis) (Hg.) (2022): Abfallentsorgung 2020. Online verfügbar unter <file:///C:/Users/Chef/Downloads/abfallentsorgung-2190100177004.pdf>, zuletzt geprüft am 05.10.2022.

Šyc, Michal; Simon, Franz Georg; Hykš, Jiri; Braga, Roberto; Biganzoli, Laura; Costa, Giulia et al. (2020): Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments. In: *Journal of hazardous materials* 393, S. 122433. DOI: 10.1016/j.jhazmat.2020.122433.

van der Wegen, Gert; Hofstra, Ulbert; Speerstra, John (2013): Upgraded MSWI Bottom Ash as Aggregate in Concrete. In: *Waste Biomass Valor* 4 (4), S. 737–743. DOI: 10.1007/s12649-013-9255-6.

Vateva, Iveta; Laner, David (2020): Grain-Size Specific Characterisation and Resource Potentials of Municipal Solid Waste Incineration (MSWI) Bottom Ash: A German Case Study. In: *Resources* 9 (6), S. 66. DOI: 10.3390/resources9060066.