

Schlussbericht

BMBF-Forschungsvorhaben **Förderkennzeichen 033L223D**

Stadt-Land-Plus - Verbundvorhaben:

INTEGRAL - Integriertes Konzept für mineralische Abfälle und Landmanagement zur nachhaltigen Entwicklung von Stadt-Land-Nutzungsbeziehungen

Teilvorhaben 4: BAM, Ermittlung stofflicher Parameter

ausführende Stelle:

BAM – Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung

Fachbereich 4.3 – Schadstofftransfer und Umwelttechnologien

Projektleiter: Dr. Franz-Georg Simon
Projektwissenschaftler: Dr. Fabian Pienkoß (01.02.2020-31.12.2022)
Laufzeit des Vorhabens: 01.02.2020 – 31.01.2023

Das diesem Bericht zugrunde liegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem Förderkennzeichen **033L223D** gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei dem Autor



Inhalt

Aufgabenstellung, Stand der Technik und Projektablauf	3
Stand der Technik	3
Projektablauf.....	4
Ergebnisse	4
Material und Methoden	4
Ergebnisse der Aufbereitungsversuche im Technikum der BAM.....	5
Demonstrationsversuch bei einem Recyclingbetrieb in Berlin	13
Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen.....	15
Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	15
Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans.....	15
Liste von Veröffentlichungen	16
Literatur.....	16

Aufgabenstellung, Stand der Technik und Projektablauf

Das Verbundvorhaben fokussiert auf einen ausgewählten Stoffstrom der Kreislaufwirtschaft sowie dessen Einfluss auf die Gestaltung eines nachhaltigen Landmanagements, um Stadt-Land-Synergien innerhalb der disparat ablaufenden Entwicklungen zu erschließen. Exemplarisch wurden innerhalb des Verbundprojektes die mineralischen Abfallfraktionen (als Teil des anthropogenen Lagers) bearbeitet, um deren Potenzial zur nachhaltigen Gestaltung von Stadt-Land-Nutzungsbeziehungen aufzuzeigen. Ziel des Teil-Projekts war zu prüfen, ob hochwertig aufbereitete Recyclingbaustoffe (RC-Baustoffe) aus den ländlichen Regionen als Baumaterial in urbanen Gebieten eingesetzt werden können, um die Flächeninanspruchnahme so gering wie möglich zu halten (gemeinsame Systeminnovationen zum gegenseitigen Vorteil).

Stand der Technik

Der im Jahr 2020 in Deutschland 55% bzw. 229 Mt umfassende größte Anteil des Abfallaufkommens bestand aus Bau- und Abbruchabfällen. Neben „Boden, Steinen und Baggergut“ (58%) fielen hier mit 27% auch rund 61 Mt „Beton Ziegel, Fliesen und Keramik“ an [1]. Hierbei handelt es sich um mineralische Stoffe aus Rückbau- und Abbruchmaßnahmen der Bauwirtschaft, welche häufig einer Verwertung auf geringerer Qualitätsstufe, wie z. B. im Straßen- oder Erdbau, zugeführt werden [2]. Entsprechend besteht hier ein großes Potenzial zum weiteren Ausbau der Kreislaufwirtschaft und einer nachhaltigeren Bauwirtschaft.

Eine hochwertige Verwendung dieser mineralischen Stoffe als Sekundärbaustoffe ist beispielsweise durch die Herstellung von ressourcenschonendem RC-Beton gegeben. Für diesen können zwei aus Betonbruch herzustellende Gesteinskörnungstypen verwendet werden, die sich überwiegend durch den Ziegelanteil voneinander unterscheiden. Dabei enthält Typ 1 bis zu 10% und Typ 2 bis zu 30% Ziegel [3]. Im günstigsten Fall wird hierbei der Ziegelanteil über bereits mit Betonbruch vermischte Baustoffe zugeführt, also über Material der Abfallschlüsselnummer 17 01 07 „Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 17 01 06 fallen“ [4]. Da dieses Material, wie auch der Betonbruch, in grober undefinierter Körnung anfällt, werden durch Brech- und Siebprozesse Körnungen wie beispielsweise 2/16 mm hergestellt [5]. Die untere Korngrößengrenze von 2 mm ergibt sich hierbei aus der Tatsache, dass Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen unterhalb von 2 mm, die sogenannten Brechsande, in RC-Betonen zur Zeit wegen der häufigen Anreicherung von Störstoffen in dieser feineren Fraktion noch nicht zulässig sind [3].

In der Größenfraktion kleiner 2 mm reichern sich, bedingt durch den geringeren Zerkleinerungswiderstand, vermehrt Stoffe mit geringerer Korndichte an [5, 6]. Bei diesen handelt es sich typischerweise um Reste von Gipsbaustoffen, die in einem Dichtebereich von 1.6 bis 1.9 kg dm⁻³ vorliegen [7] und durch ihre chemische Natur als Calciumsulfat, die Sulfatwerte der Sandfraktion signifikant erhöhen. Die Gegenwart von Sulfat wiederum, kann in Verbindung mit Feuchtigkeit, zu Bauschäden in Form von Betontreiben durch Ettringit- und Thaumasitbildung führen [8]. Weitere Schadstoffe [9], die in Bauschutt enthalten sein können, sind einerseits polyaromatische Kohlenwasserstoffe PAK, die beispielsweise aus Schornsteinen, Teerprodukten oder Holzschutzmitteln herrühren können. Und andererseits Schwermetalle, die beispielsweise aus Beschüttungen, Fliesen oder Schlackenbeton stammen. Entsprechend werden die während des Brechens von gemischten Baustoffen entstehenden und belasteten Brechsande meist einer Deponierung zugeführt und gehen so dem Stoffkreislauf

verloren. Dieser ausgeschleuste Stoffstrom beläuft sich auf circa 35% des ursprünglich eingesetzten Materials.

Die Aufbereitung des Brechsands erfolgte mit der Setzmaschinenteknik. Zu Grunde liegt hier die Sortierung durch Setzen [10], die Anordnung von spezifisch leichteren Körnern über spezifisch schwereren in einem aufwärts gerichteten Fluidstrom, Wasser im Fall von Hydrosetzmaschinen, Luft bei Luftsetzmaschinen.

Das Projekt verfolgte die Frage, ob die Setztechnik eine geeignete Methode darstellt, um Schad- und Störstoffe in Brechsanden aus der Aufbereitung gemischter Baurestemassen zu entfernen und ob die Technik in der Lage ist das Material zu einem Ersatzbaustoff oberhalb der Kategorie RC-3 aufzuwerten.

Projekttablauf

Die BAM bearbeitete vor allem das Arbeitspaket (AP) 6, bei dem die stofflichen Parameter des mineralischen Abfalls ermittelt und die Verbesserung der Produktqualität durch a) die Behandlung im Aufbereitungstechnikum der BAM (Task 6.1) und b) einen Demonstrationsversuch mit dem Projektpartner AGS untersucht wurde.

Ergebnisse

Material und Methoden

Das zur Aufbereitung verwendete Material wurde von einem Unternehmen aus dem Bereich des Baustoffrecyclings in Süddeutschland bezogen. Dabei handelte es sich um einen wirtschaftlich nicht verwertbaren und belasteten Brechsand, der als Begleitprodukt während der Brechprozesse bei Recycling von Material mit der Abfallschlüsselnummer 17 01 07 anfällt. Die Schadstoffbelastung war hierbei so hoch, dass eine Deponierung erforderlich war. Von diesem Material wurden aufgeteilt auf vier Bigbags 4,2 t bezogen. Jeder Bigbag wurde mittels Probenlanze (L: 100 cm, ID: 36 mm) und Liner vierfach beprobt. Pro Bigbag wurden anschließend Korndichte, Siebkurve, Elementzusammensetzung und die Ionengehalte im Feststoff nach Sodauszug und Königwasseraufschluss bestimmt. Die vereinigten Sammelproben der vier Großgebilde wurden anschließend zu einer Mischprobe zusammengeführt, homogenisiert und mittels Riffelteilern auf Analyseprobengröße geteilt.

Zur Durchführung der Aufbereitungsversuche und Trennung des Materials nach der Korndichte wurde eine Setzmaschine im Pilotmaßstab mit maximalem Durchsatz von 2 t h^{-1} verwendet. Bei dieser handelt es sich um eine Setzmaschine vom Typ Alljig P400/600x800 der Firma Allmineral mit einem zu verarbeitendem Korngrößenspektrum von 0,1 bis 4,0 mm, die im Zuge des EU Projektes RECDEMO [11] als Prototyp entwickelt wurde. Die Setzfläche beträgt $0,3 \text{ m}^2$ bei möglichen Setzbethöhen im Bereich von 60-140 mm und Hubfrequenzen im Bereich von 40-217 min^{-1} . Der Hub des Prozesswassers erfolgt seitlich mittels Druckluft, wobei die Hubfrequenz durch die Rotationsgeschwindigkeit eines Drehkolbenschieber bestimmt wird. Das Setzfass ist in zwei Bereiche mit jeweils durch Handflachschieber unabhängig einstellbare Wasser- und Luftdrücke unterteilt. Hierbei sind im aufgabenahen Bereich jeweils 100% und im aufgabefernen Bereich jeweils 50% Ventilöffnung für Wasser- und Luftdruck eingestellt. Die Setzbethöhe wird mittels eines Schwimmers erfasst, mit dem Sollwert abgeglichen und über die Öffnung eines

hydraulisch gesteuerten Bodenaustragsschiebers geregelt. Das Aufgabegut wird der Setzmaschine über eine Vibrationsrinne Typ DE 200/1050-DA von Vibtech zugeführt. Die beiden durch den Setzprozess erzeugten Materialströme Schwergut und Leichtgut verlassen das Setzmaschinenaggregat durch den Bodenschieber bzw. durch Überlaufen eines Wehrs. Anschließend werden beide Suspensionen über eine Pumpe, erst einem Hydrozyklon und darauffolgend einem Taumelsieb, zur Entwässerung zugeführt und getrennt in Loren aufgefangen. Die Maschenweite der Siebeläge beträgt hier 0,1 mm, so dass Korngrößen unterhalb dieser Schwelle teilweise durch das Prozesswasser im Kreislauf geführt und teilweise dem Abwasser zugeführt werden. Abbildung 1 zeigt das Fließschema der Nassaufbereitung.

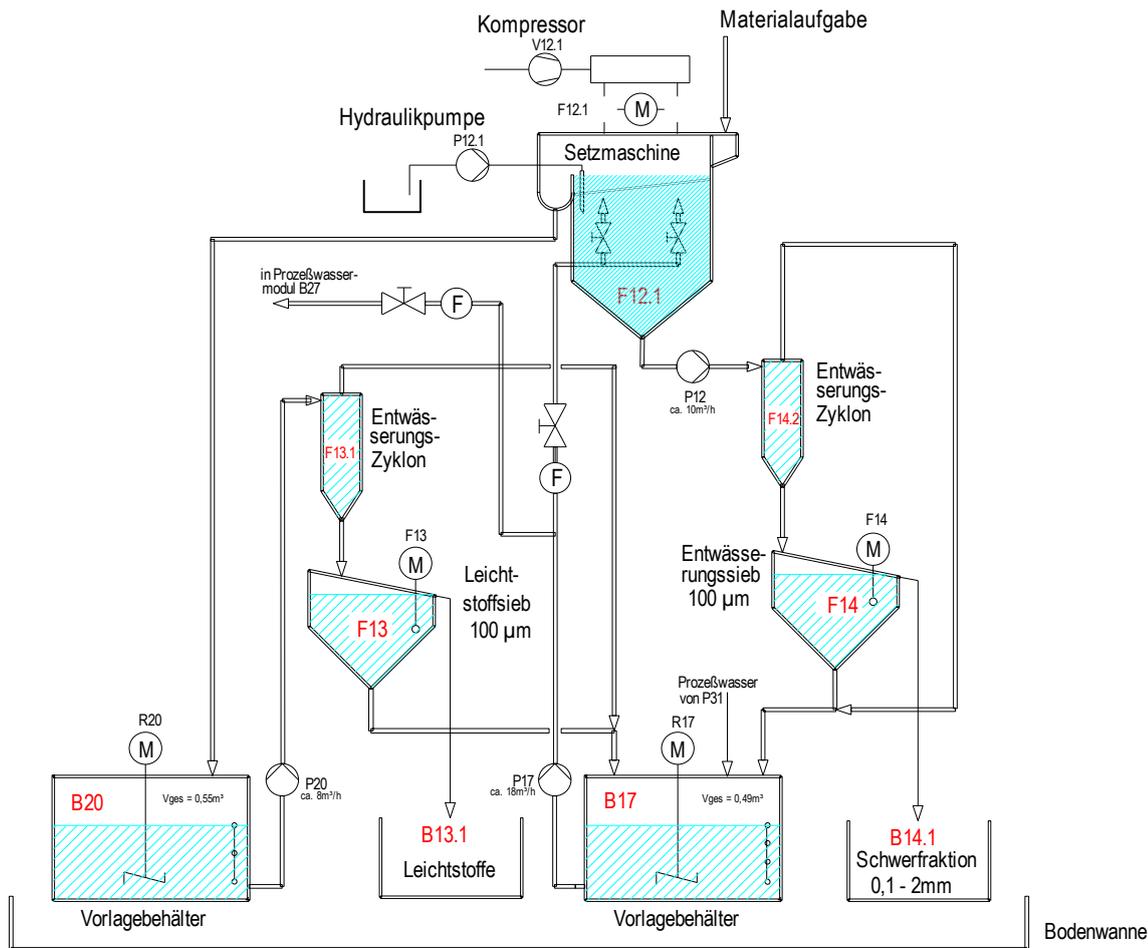


Abbildung 1. Fließschema des Aufbereitungstechnikums der BAM.

Ergebnisse der Aufbereitungsversuche im Technikum der BAM

Charakterisierung des Probenmaterials

Nachdem die Analysen der vier Bigbags mit Bauschuttbrechsand hinreichend übereinstimmende Charakterisierungsparameter zeigten, wurde die weitergehende Charakterisierung an einer Mischprobe durchgeführt. Für das Material mit einem Medianpartikeldurchmesser von 0,63 mm und einer Korndichte von $2,59 \text{ kg dm}^{-3}$, wurden folgende Hauptstörstoffe identifiziert: Sulfat mit $8,72 \text{ g kg}^{-1}$ und PAK-15 mit $4,09 \text{ mg kg}^{-1}$. Zur

genaueren Evaluierung wurde eine Siebanalyse mit Sulfat- und PAK-Quantifizierung für die einzelnen Siebfraktionen erstellt (Abbildung 2).

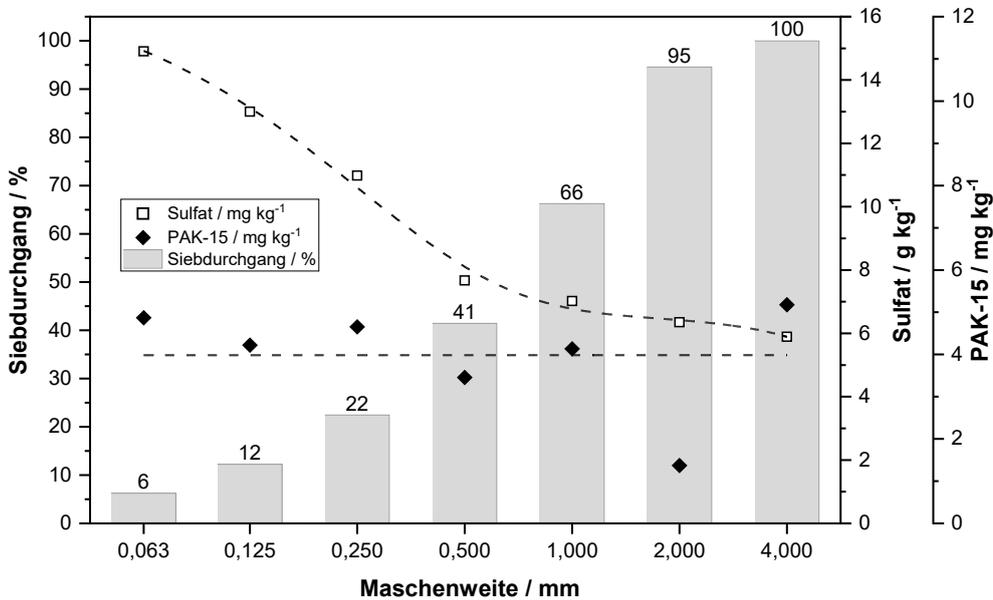


Abbildung 2. Hauptstörstoffe im Probenmaterial als Funktion des Korndurchmessers.

Tabelle 1. Säuleneluatwerte des Probenmaterials (W/F 2,0 L kg⁻¹) im Vergleich mit den Grenzwerten für verschiedene Einbauklassen aus der Ersatzbaustoffverordnung.

Parameter	Grenzwert RC-1	Grenzwert RC-2	Grenzwert RC-3	Säuleneluat
pH-Wert [-]	6 - 13	6 - 13	6 - 13	9,5
Elektr. Leitfähigkeit [$\mu\text{S cm}^{-1}$]	2500	3200	10000	3200
Sulfat [mg L^{-1}]	600	1000	3500	1895
PAK-15 [$\mu\text{g L}^{-1}$]	4,0	8,0	25	8,5
Chrom [$\mu\text{g L}^{-1}$]	150	440	900	246
Kupfer [$\mu\text{g L}^{-1}$]	110	250	500	47
Vanadium [$\mu\text{g L}^{-1}$]	120	700	1350	27

Die Analyse der Siebfraktionen zeigte bei geringeren Partikelgrößen deutlich erhöhte Sulfatgehalte im Vergleich zu größeren Partikeln. Für Partikel unterhalb von 0,063 mm lag der Sulfatgehalt bei 14,9 g kg⁻¹ und sank weitgehend linear um circa 48% auf einen Wert von 7,7 g kg⁻¹ für Partikel unterhalb von 0,5 mm. Im Anschluss liegt eine deutlich geringere relative Abnahme der Sulfatkonzentration mit der Partikelgröße vor. Diese betrug 16% für den Bereich von Partikeln zwischen 0,5 mm und 4 mm. Insgesamt wies die Probe einen Sulfatgehalt von

8,7 g kg⁻¹ auf. Die Summe der PAK-15, nach EPA „US-Environmental Protection Agency“ ohne Naphthalin, lag hingegen weitgehend unabhängig von der Partikelgröße im linearen Fit auf einem konstanten Konzentrationsniveau von circa 4 mg kg⁻¹. Auch bezüglich der Korndichte wurde für die einzelnen Partikelgrößen ein konstantes Niveau von 2,59 kg dm⁻³ festgestellt.

Zur Beurteilung, ob ein Material als Ersatzbaustoff eingesetzt werden darf und somit im Sinne der Kreislaufwirtschaft genutzt werden kann, sind die Eluatgrenzwerte aus der EBV [12] entscheidend. Entsprechend wurde mit dem Material ein Säulenversuch durchgeführt und die resultierenden Eluatkonzentrationen den Grenzwerten gegenübergestellt (Tabelle 1).

Wie in Tabelle 1 ersichtlich, ist das Ausgangsmaterial der Kategorie RC-3 zuzuordnen. Hierdurch ergibt sich ein eingeschränkter Anwendungsbereich, der sich vor allem auf gebundene Systeme oder solche mit weitgehendem Ausschluss von Wasserkontakt beschränken [12]. Neben den beiden zuvor identifizierten Hauptstörstoffen PAK-15 und Sulfat, ist ebenfalls die elektrische Leitfähigkeit der Kategorie RC-3 zugeordnet. Bei der Aufbereitung des Materials mit dem Ziel der Sulfatabreicherung geht jedoch eine Senkung der elektrischen Leitfähigkeit einher. Die bezüglich der EBV relevanten Schwermetalle Chrom, Kupfer und Vanadium liegen bereits im Bereich der Stufe RC-2 bzw. RC-1 vor. Zur Herstellung eines Ersatzbaustoffes der Kategorie RC-2, ist somit durch die Aufbereitung des Materials eine Absenkung der Eluatwerte für Sulfat von 53% und von PAK-15 von 6% erforderlich.

Evaluierung der Setzmaschinenteknik

Um die Eignung des gewählten Verfahrens zur Aufbereitung von Bauschuttbrechsand zu beurteilen, werden zunächst die für die einzelnen Zielgrößen erhaltenen Ergebnisse über alle Versuche hinweg in der Form von Boxplots betrachtet. Die Setzmaschinenteknik trennt das Aufgabegut nach der Korndichte in die zwei Stoffströme Schwergut mit höherer Dichte und Leichtgut mit niedrigerer Dichte, entsprechend sind in Abbildung 3 die Ergebnisse der Korndichte dargestellt.

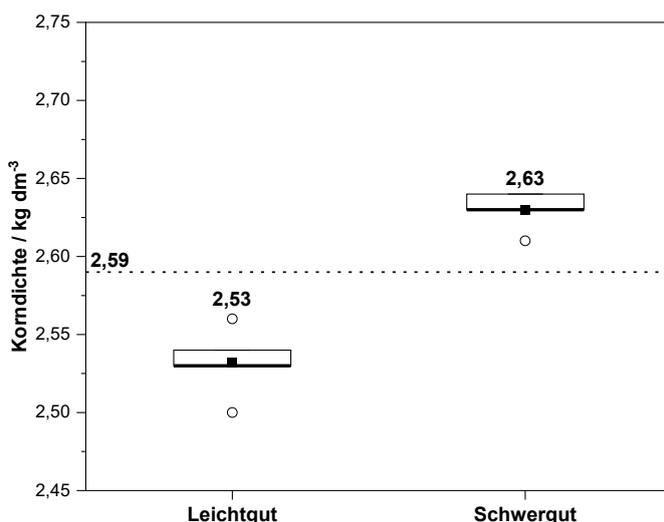


Abbildung 3. Durch die Aufbereitung resultierende Korndichten von Leicht- und Schwergut. Die gebrochene Linie entspricht dem Wert im Aufgabegut, die Vierecke den Mittelwerten mit Zahlenwerten über den Boxen, die breiten Linien den Medianen und die Kreise den Ausreißern.

Aus der Analyse der Daten zur Korndichte kann geschlossen werden, dass die Aufbereitung von Bauschuttbrechsand mittels Setzmaschinenteknik eine geeignete Methode ist, um das Material in zwei Stoffströme unterschiedlicher Dichte zu trennen. Hierbei wurde im Mittel die Dichte des Leichtgutes um 2,3% gesenkt und im Gegenzug die des Schwergutes um 1,5% erhöht. Neben der Sortierung des Materials nach der Dichte, kann während Setzprozessen ebenfalls eine Klassierung nach der Partikelgröße auftreten. In Abbildung 4 sind die aufgrund der stark ähnlichen Verläufe gemittelten Siebrückstände der Schwer- und Leichtgüter aus sieben Versuchsfahrten, den Siebrückständen des Aufgabegutes gegenübergestellt.

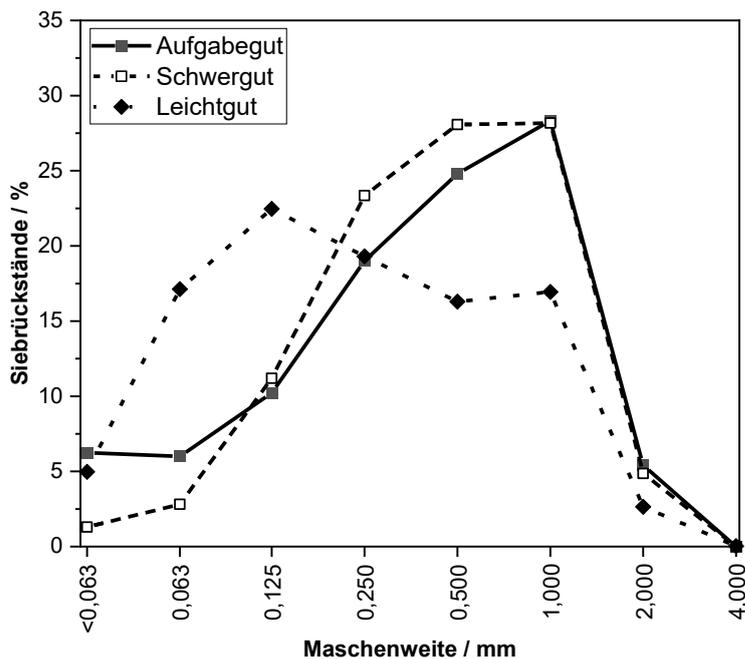


Abbildung 4. Einfluss der Aufbereitung auf die Korngrößenverteilungen in Form von Siebrückständen von Schwergut und Leichtgut im Vergleich zum Aufgabegut.

Bezüglich der Korngrößenverteilungen zeigt sich, dass Schwergut und Aufgabegut für Partikel oberhalb von 1 mm identische Verläufe aufweisen. Für Partikel von 0,25 bis 1 mm ist das Schwergut bei ähnlichem Verlauf jeweils ca. 5% gröber als das Aufgabegut. Nach einem erneut gleichen Wert für die Partikel zwischen 0,125 und 0,25 mm, werden für feinere Partikel ($\leq 0,125$ mm) im Schwergut anschließend nur noch sehr geringe Anteile von in Summe 4,1% festgestellt, während diese Fraktion im Aufgabegut 12,3% ausmacht. Hier wird in geringem Maß der Prozesswasseraustrag von $0,6 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ nach Nasssiegung bei 0,1 mm zum Tragen kommen und in größerem Ausmaß eine Klassierung dieser Partikel in das Leichtgut stattfinden. Während der Siebrückstand von Partikeln $< 0,063$ mm für das Leichtgut (5,0%) noch einen ähnlichen Wert wie das Aufgabegut (6,3%) aufweist, ist der Anteil der Fraktion 0,063 bis 0,125 mm mit in Summe 39,6% signifikant oberhalb der Werte für Schwergut (14,0%) und Aufgabegut (16,2%). Schwergut und Aufgabegut weisen zudem einen Peak-ähnlichen Verlauf mit Maximum bei 1 mm auf, während der Verlauf des Leichtgutes eher einem tieferen Plateau entspricht. Zur Quantifizierung der Partikeldurchmesser kann der Median d_{50} -Wert als Maß herangezogen werden, welcher für das Aufgabegut bei 0,63 mm lag. Durch die Aufbereitung wurde dieser im

Schwergut um 6% auf einen Wert von 0,67 mm erhöht und im Leichtgut signifikant um 48% auf 0,33 mm abgesenkt. Da im Schwergut keine ausgeprägte Abweichung zum Aufgabegut auffällt, ist es naheliegend, dass während des Aufbereitungsprozesses abrasive Prozesse stattfinden. Diese können beispielsweise während der Reibung der Partikel im pulsierenden Setzbett, in den Pumpen, Hydrozyklonen und Taumelsieben stattfinden. Dies deckt sich mit der Natur des Brechsandes, der als Beiprodukt während der Brechprozesse im Baustoffrecycling anfällt und somit vermehrt Stoffe mit geringen Zerkleinerungswiderständen enthält.

Einfluss der Aufbereitung auf die Feststoffwerte und Säuleneluatwerte

Die Aufbereitung von Brechsand mit der Setzmaschinenteknik erzeugt zwei Stoffströme, deren Messwerte entsprechend vom Aufgabegut abweichen werden. Um den generellen Einfluss der Aufbereitung zu diskutieren, werden im Folgenden sowohl die im Feststoff erzielten An- bzw. Abreicherungen als auch die Ergebnisse der Eluatanalysen anhand von Boxplots dargestellt. Die untenstehende Abbildung 5 zeigt die Ergebnisse bezüglich der pH-Werte und elektrischen Leitfähigkeit der erzeugten Eluate von Schwer- und Leichtgut.

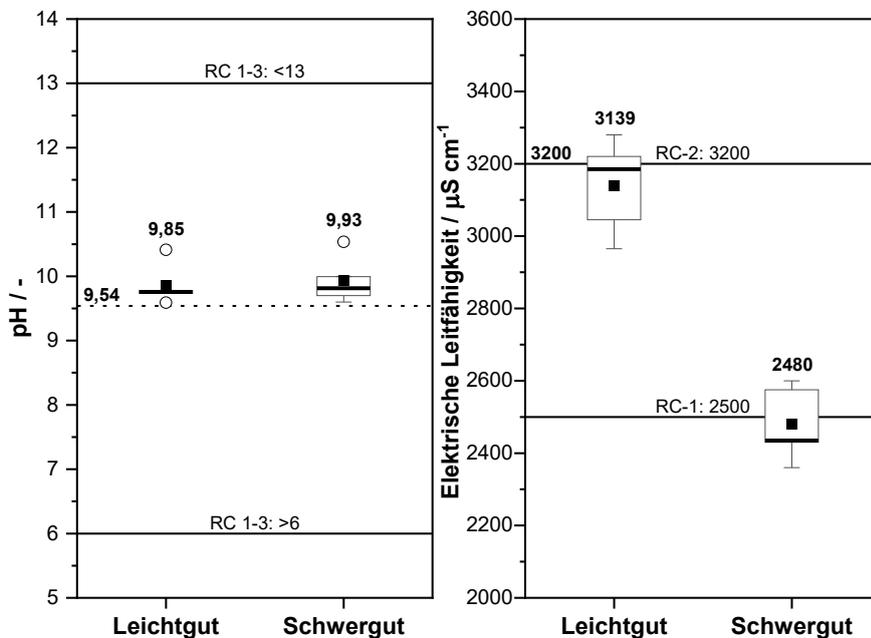


Abbildung 5. Übersicht über die Parameter pH-Wert und elektrische Leitfähigkeit im Säuleneluat (W/F 2,0 L kg^{-1}) der durch die Aufbereitung produzierten Leicht- und Schwergüter. Die gestrichelten Linien entsprechen dem Wert des Aufgabegutes, die durchgezogenen Linien den Grenzwerten der EBV, die Vierecke den Mittelwerten mit Zahlenwerten über den Boxen, die breiten Linien den Medianen und die Kreise den Ausreißern.

Wie in der linken Abbildung ersichtlich, bewegen sich die pH-Werte in den Eluaten der Leicht- und Schwergüter nahe dem Wert des Aufgabegutes und befinden sich im zulässigen Bereich zwischen pH 6 und pH 13. Bezüglich der elektrischen Leitfähigkeit, dargestellt in der rechten Abbildung, ist eine signifikante Herabsetzung im Schwergut (von 3200 auf 2480 $\mu\text{S cm}^{-1}$) bei nahezu konstantem Wert für das Leichtgut (3139 statt 3200 $\mu\text{S cm}^{-1}$) zu beobachten. Das Schwergut liegt somit im Mittel nahe an den RC-1 Anforderungen, während das Leichtgut weiterhin RC-3 zuzuordnen ist. In Abbildung 6 wird nun eine analoge Betrachtung für die

Kationenkonzentrationen durchgeführt.

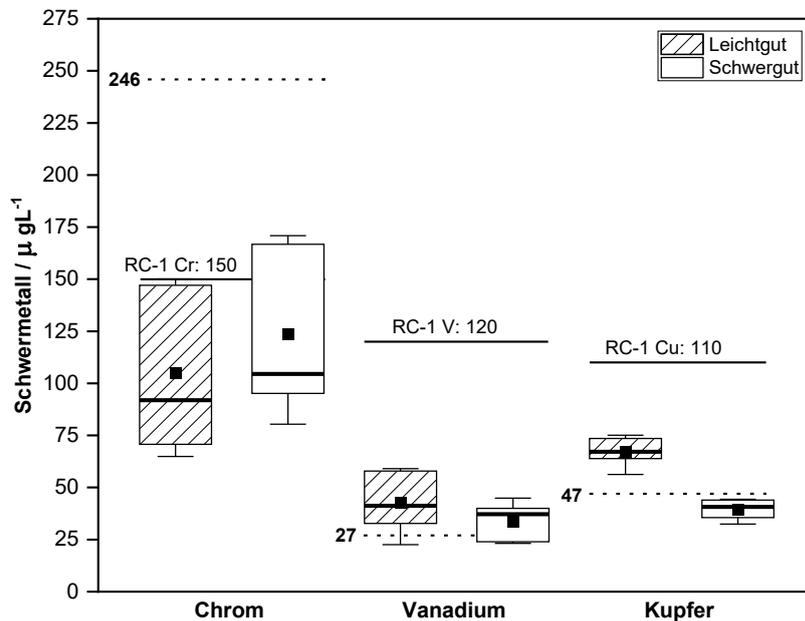
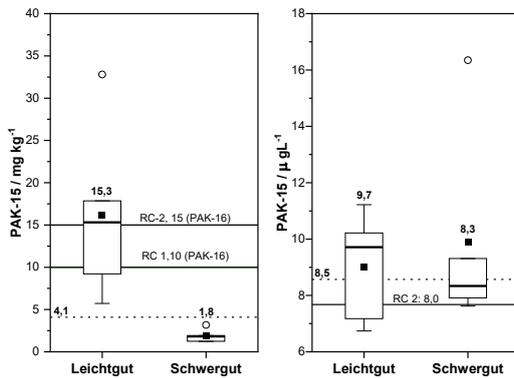


Abbildung 6. Übersicht über die Schwermetallkonzentrationen im Säuleneluat (W/F $2,0 \text{ L kg}^{-1}$) der durch die Aufbereitung produzierten Leicht- und Schwergüter. Die gestrichelten Linien entsprechen dem Wert des Aufgabeguts, die durchgezogenen Linien den Grenzwerten der EBV, die Vierecke den Mittelwerten und die breiten Linien den Medianen.

In Tabelle 1 wurde das Aufgabegut bezüglich Cr als Ersatzbaustoff Typ RC-2 eingeordnet. Wie in der obigen Abbildung klar erkennbar, wurde der Ausgangswert von $246 \mu\text{g L}^{-1}$ durch die Aufbereitung sowohl für das Leicht- als auch das Schwergut, um circa 55%, auf ein ähnliches Niveau von $110 \mu\text{g L}^{-1}$ und somit unter den RC-1 Grenzwert von $150 \mu\text{g L}^{-1}$ gesenkt. Die Konzentrationsniveaus der Metalle Vanadium und Kupfer hingegen bewegen sich auf einem Niveau nahe des Ausgangswertes, wobei für Kupfer die Konzentration im Leichtgut, bei simultaner Absenkung im Schwergut, angehoben wurde. Um der ausgeprägten Abnahme der Chromkonzentration nachzugehen, wurden zwei während des laufenden Betriebs aus dem Setzfass entnommene Prozesswasserproben analysiert. Die Kationenkonzentration lag hier für einen Prozesswasserstrom von $15,4 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ und einer Materialzugabe von 175 kg h^{-1} , also einem W/F von 88, im Mittel bei $20 \mu\text{g L}^{-1}$ Chrom. Somit kann angenommen werden, dass die Konzentrationsabsenkung für Chrom überwiegend durch Löslichkeitseffekte verursacht wurde. Für eine denkbare Anwendung und die entsprechende Prozesswasseraufbereitung ergibt sich somit ggf. das Erfordernis der Metallentfernung durch beispielsweise Fällung oder Aktivkohlefilter. Ein weiterer wichtiger Schadstoff sind die organischen PAK, welche ebenfalls in erhöhter Konzentration im Baustoffbrechsand vorlagen. Die Feststoffwerte und die aus diesen erhaltenen Konzentrationen im Säuleneluat werden untenstehend gemeinsam in Abbildung 7 dargestellt.

a



b

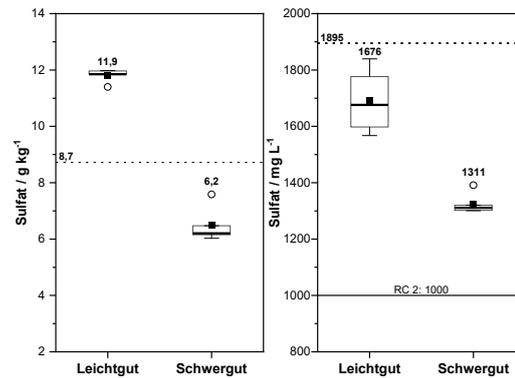


Abbildung 7. a.) Übersicht über die PAK-15 Feststoffwerte und die Konzentrationen im Säuleneluat (W/F $2,0 \text{ L kg}^{-1}$) der durch die Aufbereitung produzierten Leicht- und Schwergüter. Die gestrichelten Linien entsprechen hier dem Wert des Aufgabeguts, die durchgezogenen Linien den Grenzwerten der EBV, die Vierecke den Mittelwerten, die breiten Linien den Medianen mit Zahlenwerten über den Boxen und die Kreise den Ausreißern. b) Übersicht über die Sulfat Feststoffwerte und die Konzentrationen im Säuleneluat (W/F $2,0 \text{ L kg}^{-1}$) der durch die Aufbereitung produzierten Leicht- und Schwergüter. Die gestrichelten Linien entsprechen hier dem Wert im Aufgabegut, die durchgezogenen Linien den Grenzwerten der EBV, die Vierecke den Mittelwerten, die breiten Linien den Medianen mit Zahlenwerten über den Boxen und die Kreise den Ausreißern.

Das Aufgabegut entspricht bezüglich PAK im Feststoff die in der EBV anhand der Summe EPA PAK-16, also PAK-15 plus Naphthalin beurteilt werden, mit einem Messwert von $4,11 \text{ mg kg}^{-1}$ und einem Grenzwert von 10 mg kg^{-1} der Kategorie RC-1. In der obigen Abbildung werden Zwecks direktem Vergleich mit den Säuleneluaten, die Feststoffwerte ebenfalls in der PAK-15 Definition betrachtet. Da bei den PAK-Bestimmungen zudem teilweise signifikante Ausreißer auftraten, wird im Folgenden statt der Betrachtung der Mittelwerte der Median herangezogen. Das zur Setzmaschinenaufbereitung verwendete Aufgabegut enthielt eine PAK-Belastung von $4,09 \text{ mg kg}^{-1}$. Bei Betrachtung der im Schwergut gemessenen Werte wird deutlich, dass die Setzmaschinenteknik eine effektive Methode zur Entfernung von PAK ist: der Ausgangswert wurde um 56%, auf einen Wert von $1,8 \text{ mg kg}^{-1}$ abgesenkt. Hierbei fand eine einhergehende Erhöhung des PAK-Gehalts im Leichtgut um 273%, von $4,1$ auf $15,3 \text{ mg kg}^{-1}$ statt. Die aus diesen Medianwerten, den anteiligen Austragsgütern und dem mit einer Standardabweichung von 20% behafteten Wert des Aufgabegutes berechnete PAK-Massenbilanz ergibt einen Wert von 81%. In Bezug auf die aus den Feststoffen resultierenden Eluatwerte kann die für das Schwergut gefundene Absenkung von 56% im Feststoff nicht auf das Eluat übertragen werden kann. Die Eluatwerte bewegen sich hier mit einem Median von $8,3 \mu\text{g L}^{-1}$ um den Wert des Aufgabegutes von $8,5 \mu\text{g L}^{-1}$ verteilt, so dass keine Änderung im Vergleich zum Aufgabegut beobachtet wurde. Auch für das Leichtgut, mit einem Median von $9,7 \mu\text{g L}^{-1}$ ist dieses Verhalten mit einer signifikant erhöhten Schwankungsbreite ebenfalls zu beobachten. Der gesamte organische Kohlenstoffgehalt TOC hingegen wurde ausgehend von $23,9 \text{ mg L}^{-1}$ auf $10,2 \text{ mg L}^{-1}$ im Schwergut abgesenkt und im Leichtgut entsprechend auf einen Wert von $26,5 \text{ mg L}^{-1}$ erhöht. Einhergehend sank auch die Trübung von einem Wert von $1,5 \text{ NTU}$ auf $0,5 \text{ NTU}$ im Schwer- und $0,6 \text{ NTU}$ im Leichtgut. Eine der PAK-15 Betrachtung analoge Darstellung für den Parameter Sulfat findet sich in Abbildung 7 (rechts).

Der Sulfatgehalt im Aufgabegut lag bei $8,7 \text{ g kg}^{-1}$ und wurde durch den Aufbereitungsprozess für

das Schwergut um 29% auf einen Medianwert von 6,2 g kg⁻¹ gesenkt. Im anteilmäßig geringeren Leichtgut erfolgte einhergehend eine Erhöhung um 37% auf einen Wert von 11,9 g kg⁻¹, wobei für beide Austragsgüter jeweils eine sehr enge Verteilung der Feststoffwerte vorliegt. Die Massenbilanz bezüglich Sulfat im Feststoff beträgt im Mittel 78%. Die verbleibenden 22% dürften demnach in das Prozesswasser übergegangen sein, das in der zuvor erwähnten Probe eine Konzentration von 492 mg L⁻¹ aufwies. Diese Annahme deckt sich weitgehend mit den Ergebnissen eines Säulenversuches mit Aufgabegut, bei dem nach dem Säulenversuch erneut der Feststoffwert für Sulfat bestimmt wurde. Hier wurde eine Absenkung des Feststoffwertes um 24% von 8,7 g kg⁻¹ auf 6,6 g kg⁻¹ festgestellt. In Bezug auf die Eluatwerte fällt für das Leichtgut auf, dass trotz des signifikanten Konzentrationsanstiegs im Feststoff, kein erhöhter Eluatwert im Vergleich zum Aufgabegut auftritt. Folglich wird es sich bei der Sulfatanreicherung im Leichtgut vermehrt um schwer lösliche Sulfatspezies handeln. Sowohl das Leichtgut (1676 mg L⁻¹, -12%) als auch das Schwergut (1311 mg L⁻¹, -30%) generieren Konzentrationen unterhalb des Eluatwertes im Aufgabegut (1895 mg L⁻¹). Weitere relevante Parameter zur Beurteilung des Schwergutproduktes sind der Glühverlust und der Carbonatgehalt. Beide Parameter wurden durch den Kontakt mit Prozesswasser deutlich reduziert. Der Glühverlust von 10,5% für das Aufgabegut wurde auf 2,1% für das Schwergut und auf 4,4% für das Leichtgut reduziert. Der Carbonatgehalt hingegen wurde von 18,2% auf 15,0% und 16,1% abgesenkt. In Tabelle 2 findet sich zur Zusammenfassung eine Übersicht der oben beschriebenen Parameter.

Tabelle 2. Übersicht über die Feststoff und Säuleneluatwerte (W/F 2,0 L kg⁻¹) des Aufgabeguts gegenüber den Werten von Schwer- und Leichtgut.

	Aufgabegut	Schwergut	Leichtgut
Feststoff:			
Massenbilanz [%]	100	89	11
d50 [mm]	0,63	0,67	0,33
Korndichte [kg dm ⁻³]	2,59	2,63 ±0,01	2,54 ±0,02
Glühverlust [%]	10,50	2,09 ±0,15	4,43 ±0,71
Carbonatgehalt [%]	18,15	14,95 ±0,66	16,06 ±0,84
PAK-15 [mg kg ⁻¹]	4,01 ±0,82	1,82* ±0,79	15,31* ±10,46
Sulfat [g kg ⁻¹]	8,72 ±0,88	6,20* ±0,63	11,85* ±0,24
Eluat:			
pH [-]	9,54	9,91 ±0,33	9,79 ±0,32
Leitfähigkeit [µS cm ⁻¹]	3200	2491 ±96	3158 ±126
TOC [mg L ⁻¹]	23,91	10,24 ±1,75	26,48 ±4,29
Trübung [NTU]	1,51	0,46 ±0,24	0,55 ±0,20
PAK-15 [µg L ⁻¹]	8,53	8,34* ±3,66	9,71* ±1,96
Sulfat [mg L ⁻¹]	1895	1311* ±38	1676* ±116
Chrom [µg L ⁻¹]	246,41	123,55 ±42,24	104,93 ±41,11
Kupfer [µg L ⁻¹]	46,86	39,40 ±5,25	67,19 ±7,63
Vanadium [µg L ⁻¹]	27,15	33,86 ±9,79	42,70 ±15,85

*Median

Demonstrationsversuch bei einem Recyclingbetrieb in Berlin

Im Dezember 2022 wurde in Kooperation mit dem Verbundpartner AGS ein Demonstrationsversuch mit typischem städtischem Bauschutt (Inputmaterial) durchgeführt. Zum Einsatz kam die mobile Setzmaschine Triple A. Die Setzmaschine Triple A ist für die effiziente Abtrennung von Bestandteilen unterschiedlicher spezifischer Dichte aus Schüttgütern im Kornbereich 0 - 35 mm geeignet [13].



Abbildung 8. Die Setzmaschine Triple A von AGS aufgestellt bei einem Recyclingbetrieb in Berlin (links), gemischter Bauschutt als Inputmaterial (rechts, Euro-Münze als Größenvergleich).

Mit der Anlage wurde für mehrere Stunden ein kontinuierlicher Betrieb durchgeführt. Outputmaterialien waren Leichtfraktion, Schwerfraktion und eine Feinstfraktion.



Abbildung 9. Probenahme der Outputfraktionen: Leichtfraktion (linker Haufen), Schwerfraktion (rechter Haufen), Feinstfraktion (im nebenstehenden Container).

Im Labor wurden an den Outputfraktionen einige Untersuchungen durchgeführt. Die Schwerfraktion von 16-32 mm wurde manuell in die Stoffgruppen Steine, Mörtel, Ziegel,

Keramik, Glas und Metalle (kurioserweise wurde hier ein 10 Pfennig Stück aus dem Jahr 1989 gefunden) aufgetrennt (Probemenge 8800 g). Bei der Leichtfraktion, die zu einem hohen Anteil aus organischem Material bestand, wurde der Glühverlust zu 12,1 % bestimmt (Einzelmessung, Probemenge 225,4 g TM). Für die Schwerfraktion (<32 mm) wurde eine Siebanalyse durchgeführt.

Tabelle 3. Stoffgruppen in der Schwerfraktion nach Aufbereitung mit der Setzmaschine Triple A.

Stoffgruppe	Anteil
Fliesen	9.02%
Ziegel	25.78%
Mörtel	50.61%
Steine	14.22%
Glas	0.20%
Metalle	0.17%

Tabelle 4. Siebanalyse der Schwerfraktion.

Korngröße (mm)	Anteil	kumulierter Anteil
<0.63	0.83%	0.83%
0,63-2	1.37%	2.20%
2-4	9.32%	11.51%
4-10	29.63%	41.14%
10-16	21.04%	62.19%
16-32	37.81%	100.00%



Abbildung 10. Fotos der einzelnen Stoffgruppen und Siebfraktionen (von links oben nach rechts unten: >16mm unsortiert, >16 mm Ziegel, >16 mm Mörtel, >16 mm Steine, >16 mm Glas und Metall und gemeinsam <0,63, <2 und <4 mm).

Der Demonstrationsversuch hat gezeigt, dass durch die Abtrennung einer Leichtfraktion eine nahezu vollständige Abtrennung von ungewünschtem organischem Material möglich ist. Eine weitergehende Abtrennung der Ziegelfraktion könnte bei Optimierung des Setzprozesses durchaus möglich sein.

Schlussfolgerungen aus den Ergebnissen

Zusammenfassend wurde in dieser Arbeit gezeigt, dass die Setzmaschinenteknik eine geeignete Methode ist, um Brechsande aus gemischten Bauabfällen aufzubereiten. Die Trennung des Materials in zwei Stoffströme unterschiedlicher Dichte hat sich mit einer Absenkung um 56% besonders effizient in der Reduzierung von PAK Belastungen im Feststoff erwiesen. Auch die Sulfatlast im Produktstrom wurde durch den Prozess im Vergleich zum Aufgabegut um 29% gesenkt. Neben der Erhöhung des Median Partikeldurchmessers durch Klassierungseffekte, ist die Herabsetzung verschiedener Eluatparameter ebenfalls positiv zu bewerten. Dies bezieht sich zum einen auf die elektrische Leitfähigkeit, die nach EBV von RC-3 auf RC-1 aufgewertet wurde und zum anderen auf die Chromkonzentration, die von RC-2 auf die Stufe RC-1 angehoben wurde. Die vorliegenden Aufbereitungsergebnisse erlaubten jedoch nicht eine Gesamteinordnung des Materials als Ersatzbaustoff oberhalb der Klasse RC-3. Hierzu ist eine weitere Absenkung der Eluatwerte für Sulfat um 25% von RC-3 (1325 mg L^{-1}) auf RC-2 ($< 1000 \text{ mg L}^{-1}$) und des PAK-15 Wertes um 4% von RC-3 ($8.3 \mu\text{g L}^{-1}$) auf RC-2 ($< 8.0 \mu\text{g L}^{-1}$) erforderlich. Eine detaillierte Optimierung der Prozessparameter der Setzmaschinenteknik könnten diesen Spielraum ermöglichen.

Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Die Projektlaufzeit des Teilprojekt D war vom 01.02.2020 bis zum 31.01.2023. Für die weitere Laufzeit des auf 5 Jahre ausgelegten Verbundprojekts INTEGRAL werden noch Ausgaben im Bereich der Dienstreisen anfallen. Es wurde zugesagt, dass der Projektleiter an der BAM dafür zur Verfügung steht.

Das Projektbudget wurde vor allem für wissenschaftliches Personal verauslagt (149.474 EUR). Für Verbrauchsmittel wurden 850 EUR ausgegeben, für Dienstreisen im In- und Ausland bislang 175 EUR.

Verwertbarkeit der Ergebnisse im Sinne des Verwertungsplans

Die Ergebnisse des Teilprojekts D zielten vor allem auf die Demonstration der Vorteile einer nassmechanischen Aufbereitung von Baurestmassen mit der Setzmaschinenteknik ab. Eine Potenzialstudie zum Markt für Sortieranlagen in Europa bis 2025 von trend:research (<https://www.trendresearch.de/studien/13-1348.pdf>) beziffert das Marktvolumen für mineralische Abfallsortieranlagen (Reparatur, Retrofit und Neubau) auf 245 Millionen Euro nur für Deutschland, in den Nachbarländern Polen und Frankreich wegen des hohen Nachholbedarfs sogar auf 401 Millionen bzw. 709 Millionen Euro. Es konnte gezeigt werden, dass mit der Setzmaschinenteknik eine bessere Ersatzbaustoffqualität erzielen lässt. Die

Ergebnisse werden wie geplant im Nachgang zum Projekt auf Konferenzen präsentiert und in Zeitschriften veröffentlicht.

Liste von Veröffentlichungen

Web-of-science Artikel:

Fabian Pienkoß, Ute Kalbe, Franz-Georg Simon, Nassmechanische Aufbereitung von Bauschutt-Brechsand mit der Setztechnik – ein Schritt auf dem Weg zum Ersatzbaustoff, Chemie Ingenieur Technik, Themenheft Umweltverfahrenstechnik, 2023, Manuskript zur Veröffentlichung angenommen (cite. 202300019)

Simon, F.G. und Kalbe, U., Case Study on Secondary Building Materials for a Greener Economy, Applied Sciences 13 (2023) 1-13. doi: 10.3390/app13106010

Webseite: INTEGRAL, Mineralische Abfälle in Stadt und Land: Neue Konzepte für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft, <https://www.zukunftsstadt-stadtlandplus.de/integral.html>

Video: Shortvideo des Projektverbunds (ab 1:51 Videosequenz mit der Setzmaschine der BAM)

<https://youtu.be/1FPP4e4HNCo>

Projekt-Logo:



Literatur

[1] Statistisches Bundesamt (2022): Abfallbilanz 2020. Statistisches Bundesamt: Wiesbaden, Artikelnummer, 5321001207004.

[2] Basten, M. (2021): Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018. Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.: Berlin.

[3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V (2010): Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620: Berlin.

[4] Bundesregierung (2001): Verordnung über das Europäische Abfallverzeichnis. Bundesgesetzblatt I(65), 3379-3412.

[5] Müller, A. (2018): Baustoffrecycling. 1, Springer Vieweg: Wiesbaden.

[6] Loehr, K. und Melchiorre, M. (1996): Liberation of composite waste from manufactured

products. *International Journal of Mineral Processing* 45, 143-153, doi: 0.1016/0301-7516(95)00025-9.

[7] Müller, A., Schnellert, T. und Kehr, K. (2010): Gips reduziert: Gipsbestandteile in Betonrezyklaten – Herkunft, Auswirkungen und Abtrennung mittels Setztechnik, Teil 2. *AT Mineral Processing* 51(7-8), 54-69.

[8] Göske, J., Pöllmann, H. und Wenda, R. (2007): Ettringit- und Thaumasitreiben in Betonwerkstoffen: Analytische Betrachtung und Ursachenermittlung mittels Röntgendiffraktometrie und Rasterelektronenmikroskopie. *Beton- und Stahlbetonbau* 102(5), 321-329.

[9] Clement, D., Hammer, K., Schnöller, J., Daxbeck, H. und Brunner, P.H. (2011): Wert- und Schadstoffe in Wohngebäuden. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft* 63(3), 61-69, doi: 10.1007/s00506-010-0272-4.

[10] Schubert, H. (1996): *Aufbereitung fester Stoffe, Band II: Sortierprozesse. Bd. II*, Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie: Stuttgart.

[11] Weimann, K., Giese, L.B., Mellmann, G. und Simon, F.G. (2003): Building materials from waste. *Materials Transactions* 44(7), 1255-1258, doi: 10.2320/matertrans.44.1255.

[12] Bundesregierung (2021): *Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Bundesgesetzblatt Teil I(43)*, 2598-2752.

[13] Müller, A. (2012): *Bauschutt ohne Gips. Steinbruch und Sandgrube*, 40-45.

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel INTEGRAL - Integriertes Konzept für mineralische Abfälle und Landmanagement zur nachhaltigen Entwicklung von Stadt-Land-Nutzungsbeziehungen Teilvorhaben 4: BAM, Ermittlung stofflicher Parameter	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Simon, Franz-Georg Pienkoß, Fabian	5. Abschlussdatum des Vorhabens 31.01.2023
	6. Veröffentlichungsdatum 30.04.2023
	7. Form der Publikation Bericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung Unter den Eichen 87 12205 Berlin	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 033L223D
	11. Seitenzahl 16
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) 53170 Bonn	13. Literaturangaben 13
	14. Tabellen 4
	15. Abbildungen 10
16. Zusätzliche Angaben	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Christian Bodensteiner, Projekträger Jülich , Nachhaltigkeit (UMW) Ressourcenmanagement und Transfer (UMW 2), Lützowstraße 109 – 10785 Berlin 30.04.2023	
18. Kurzfassung Das Recycling von gemischten Baustoffen führt neben der Herstellung von Gesteinskörnungen parallel zu einem stärker schadstoffbelasteten Stoffstrom, der circa ein Drittel der ursprünglichen Masse ausmacht. Dieser sogenannte Brechsand endet derzeit in der Deponierung und wird somit der Kreislaufwirtschaft entzogen. Im Rahmen des Projekts wurde die Aufbereitung dieses Materials unter Verwendung einer Setzmaschine im Pilotmaßstab untersucht. Hierbei wird die Eignung dieser Technik evaluiert und das Aufbereitungsprodukt als möglicher Ersatzbaustoff untersucht.	
19. Schlagwörter Setzmaschine, Ersatzbaustoff, Sulfatentfernung, PAK	
20. Verlag	21. Preis