

BACHELORARBEIT

Vom Abfall zum Baustoff: Maximierung des Einsatzes von UltraLit im Beton – einer Gesteinskörnung aus HMV-Schlacke

vorgelegt am 24. Oktober 2025

Marielle Feldt (Matrikel Nr. XXXXXXXXXX)

Erstprüfer: Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt
Zweitprüfer: Dipl.-Ing. Claus Gronholz

**HOCHSCHULE FÜR ANGEWANDTE
WISSENSCHAFTEN HAMBURG**

Fakultät Life Sciences
Department Umwelttechnik
Ulmenliet 20
21033 Hamburg

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während meiner Bachelorarbeit begleitet und unterstützt haben.

Hervorheben möchte ich Thomas Bauer von der OAM Baustoffe GmbH, der mir den Kies für meine Versuche zur Verfügung stellte und mir mit vielen hilfreichen Tipps zur Seite stand. Ebenso danke ich Felix von der Dyckerhoff GmbH, der mir Sand, Zement und Equipment bereitstellte und mich tatkräftig unterstützt hat.

Zudem danke ich meinem Zweitbetreuer Dipl.-Ing. Claus Gronholz, der mir nicht nur die Gesteinskörnung UltraLit zur Verfügung stellte, sondern mir auch spannende Einblicke in seine Forschung ermöglichte und mich bei der Arbeit an dieser Thesis fachlich wie auch organisatorisch wertvoll unterstützt hat.

Mein Dank gilt auch Andrea Seegrön und Andrea Mauch von der MAUCH-GLÄSER GmbH, die mir das Labor für meine Versuche bereitstellten und mich mit vielen wertvollen Ratschlägen, organisatorischer Hilfe und beständigem Beistand unterstützt haben.

Darüber hinaus möchte ich mich bei meinen Arbeitskollegen der MAUCH-GLÄSER GmbH bedanken. Sie haben mich bei den Versuchen unterstützt, standen mir jederzeit mit praktischen Ratschlägen zur Seite und haben durch ihre freundschaftliche Zusammenarbeit dazu beigetragen, dass die Durchführung der Arbeit nicht nur erfolgreich, sondern auch angenehm und lehrreich war.

Ebenso möchte ich meinem Erstprüfer Prof. Dr.-Ing. Jörn Einfeldt danken, dessen Tipps und Anregungen mir bei der Erstellung meiner Arbeit geholfen haben.

Auch meiner Freundin Stephanie Chan möchte ich danken für die langen gemeinsamen Bibliothekstage, in denen wir uns gegenseitig motiviert und durch Austausch unterstützt haben.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken. Ihre seelische Unterstützung, ihr Rückhalt und ihr Vertrauen haben mir während der gesamten Zeit Kraft gegeben und mich vorangetrieben.

Inhaltsverzeichnis

ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	III
TABELLENVERZEICHNIS.....	IV
FORMELVERZEICHNIS	V
ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	VI
1 EINLEITUNG	1
1.1 MOTIVATION UND HINTERGRUND.....	1
1.2 ZIELSETZUNG DER ARBEIT	2
1.3 AUFBAU DER ARBEIT	3
2 (TECHNISCHE) GRUNDLAGEN.....	3
2.1 THERMISCHE ABFALLBEHANDLUNG UND ENTSTEHUNG VON HMV-SCHLACKE	4
2.2 ZUSAMMENSETZUNG UND EIGENSCHAFTEN HMV-SCHLACKE.....	6
2.3 KONVENTIONELLE AUFBEREITUNGSVERFAHREN VON SCHLACKE	7
2.4 AUFBEREITUNGSVERFAHREN VON SCHLACKE MIT DEM IRRT-VERFAHREN	10
2.5 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN	13
2.6 ANFORDERUNGEN AN GESTEINSKÖRNUNGEN IM BETONBAU.....	16
3 MATERIAL UND METHODEN	19
3.1 BESCHREIBUNG DER VERWENDETEN GESTEINSKÖRNUNGEN.....	20
3.2 BETONREZEPTUREN UND VERSUCHSANSÄTZE	20
3.2.1 AUSWAHL UND VARIATION DER ULTRALIT-GEHALTE.....	20
3.2.2 REFERENZMISCHUNG	21
3.3 DURCHFÜHRUNG BETONHERSTELLUNG	21

3.4 PRÜFMETHODEN	25
3.4.1 FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN.....	25
3.4.2 FESTBETONEIGENSCHAFTEN	26
3.4.3 UMWELTRELEVANTE PRÜFUNGEN.....	27
4 ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	27
4.1 DARSTELLUNG VERSUCHSERGEBNISSE.....	27
4.1.1 UMWELTRELEVANTE PARAMETER	34
4.2 EINFLUSS DES ULTRALIT-GEHALTES AUF DIE BETONEIGENSCHAFTEN	35
4.3 BEWERTUNG IM HINBLICK AUF NORMKONFORMITÄT.....	35
4.4 POTENZIALE UND GRENZEN DES EINSATZES VON ULTRALIT	36
5 SCHLUSSFOLGERUNG UND AUSBLICK.....	36
5.1 ZUSAMMENFASSUNG ERGEBNISSE	36
5.2 EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS	37
5.3 WEITERFÜHRENDE FRAGESTELLUNGEN UND FORSCHUNGSBEDARF	38
LITERATURVERZEICHNIS	VII
ANHANG A.....	IX
ANHANG B.....	X
ANHANG C.....	XVIII
EIGENSTÄNDIGKEITSERKLÄRUNG	XXVII

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Standorte der Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland.....	5
Abbildung 2: Zusammensetzung HMV-Schlacke prozentuale Stoffströme	7
Abbildung 3: Aufbereitungsverfahren von HMV-Schlacke in der MVR	9
Abbildung 4: Die 7 Level des IRRT-Verfahrens	11
Abbildung 5: Ausbreittisch für die Ausbreitmaß Prüfung	25
Abbildung 6: Verlauf der Ausbreitmaße mit steigenden UltraLit-Anteilen.....	29
Abbildung 7: Verlauf der Druckfestigkeiten mit steigenden UltraLit-Anteilen.....	33

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Regelanforderungen für die Verwendung von Gesteinskörnungen im Betonbau ..	18
Tabelle 2: Chemische Parameter für die Verwendung von Gesteinskörnungen im Beton.....	19
Tabelle 3: Mengenteile der Versuchsrezepturen	24
Tabelle 4: Prüfergebnisse des Ausbreitmaßes.....	28
Tabelle 5: Angaben zur Probekörperherstellung nach 7 Tagen	29
Tabelle 6: Prüfergebnisse der Druckfestigkeit nach 7 Tagen.....	30
Tabelle 7: Prüfergebnisse der Druckfestigkeit nach 28 Tagen.....	31
Tabelle 8: Fortführung der Prüfergebnisse der Druckfestigkeit nach 28 Tagen	32
Tabelle 9: Prüfergebnisse zu den Regelanforderungen nach DIN 1045-2	33
Tabelle 10: Prüfergebnisse der chemischen Parameter nach DIN 4226-101	34

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung der Kornrohichte	22
Formel 2: Berechnung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten	22
Formel 3: Berechnung der Feinanteile nach der Korngrößenverteilung	23

Abkürzungsverzeichnis

BGR	Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe
DIN	Deutsches Institut für Normung
EBV	Ersatzbaustoffverordnung
HMV	Hausmüllverbrennung
IRRT	Innovative Resource Recovery Technology
MV	Müllverbrennung
MVA	Müllverbrennungsanlage
MVR	Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm
POP	Persistent Organic Pollutants
UltraLit	Die bei dem IRRT-Verfahren entstehende hochwertig aufbereitete Gesteinskörnung
REACH	Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals

1 Einleitung

Die Einleitung dieser Arbeit gibt zunächst einen Überblick über die Ausgangssituation und die Motivation des Forschungsvorhabens. Dabei werden die aktuellen Herausforderungen im Umgang mit mineralischen Rohstoffen und Abfällen dargestellt und die Relevanz einer verbesserten stofflichen Verwertung von Hausmüllverbrennungsschlacke hervorgehoben. Anschließend werden die Zielsetzung der Arbeit sowie der inhaltliche Aufbau beschrieben, um die Herangehensweise und Struktur der Untersuchung nachvollziehbar zu machen.

1.1 Motivation und Hintergrund

Deutschland zählt, laut dem Bundesamt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR), zu den weltweit größten Rohstoffverbrauchern (Knappe u. a. 2012). Laut Statistik verbraucht jeder Bundesbürger in seinem Leben rund 1.000 Tonnen Rohstoffe, wovon etwa zwei Drittel auf mineralische Rohstoffe entfallen (Knappe u. a. 2012). Dementsprechend macht die Baustoffindustrie den weit überwiegenden Anteil der Rohstoffgruppen aus (Knappe u. a. 2012). Durch das Wachstum der Weltbevölkerung wird die Nachfrage an Rohstoffen zudem weiter steigen (Europäisches Parlament 2023).

Natürliche Baustoffe zählen zu der Gruppe der transportsensitiven Massengüter (Lübben und Eckardt 2024). Eine Folge des erschwerten Transportes ist, dass die Güter nur lokal gehandelt werden können, um weiterhin akzeptable Preise ermöglichen zu können. Somit haben Gebiete im Alpenraum ein Überangebot an Primärgestein und im Norden von Deutschland kommt es zu Engpässen. (Lübben und Eckardt 2024)

Durch das Recycling der Rohstoffe könnten Versorgungsrisiken wie Preisschwankungen, Verfügbarkeiten und Importabhängigkeiten gemindert werden (Europäisches Parlament 2023). Darüber hinaus neigen sich die Lagerstätten bestimmter Rohstoffe dem Ende zu und die Rohstoffe sind mit steigenden Anteilen an nicht verwertbaren Materialien gebunden, wodurch die Gewinnung der Rohstoffe zunehmend erschwert wird (Knappe u. a. 2012). Der Aufwand und der Eingriff in die Landschaft werden dadurch erhöht (Knappe u. a. 2012). Bei einem jährlichen Abbau mineralischer Baustoffe von etwa 80 Mio. Tonnen führt dies zu einem Flächeneingriff von 203 Hektar pro Jahr (Knappe u. a. 2012). Auch hier würde die Wiederverwendung und das Recycling von Rohstoffen die Nutzung der natürlichen Ressourcen verlangsamen, sowie die Zerstörung der Landschaften und Lebensräume verringern (Europäisches Parlament 2023). Der Verlust der biologischen Vielfalt wird ebenso stark begrenzt und die jährlichen

Treibhausgasemissionen reduziert, was den Zielen des Kreislaufwirtschaft Gesetzes entspricht (Europäisches Parlament 2023).

Die Europäische Union produziert jährlich 2,1 Milliarden Tonnen Abfall (Europäisches Parlament 2023). In Deutschland beträgt das Netto-Abfallaufkommen bereits 350 Mio. Tonnen pro Jahr. Mit 60% machen die Bau- und Abbruchabfälle, einschließlich der Straßenaufbrüche, den Großteil des Abfallaufkommens aus, wobei 14% des Abfallaufkommens auf Siedlungsabfälle zurückzuführen ist. (UBA 2023).

Die thermische Müllverwertung von Hausmüll stellt in Deutschland eine gängige Entsorgungsförm dar (Lübben und Eckardt 2024). In Deutschland wurden 2022 rund 22,7 Mio. Tonnen Abfälle in Müllverbrennungsanlagen (MVA) behandelt (ITAD e.V. und IGAM 2024). Dabei entsteht die sogenannte Hausmüllverbrennungsschlacke (HMF-Schlacke) oder auch Rostasche genannt, welche ein Gesamtvolumen von 6,05 Mio. Tonnen jährlich umfasst (ITAD e.V. und IGAM 2024). HMF-Schlacke enthält in angereicherter Form nahezu alle metallischen und mineralischen Komponenten, die ursprünglich dem Verbrennungsprozess zugeführt wurden (Lübben und Eckardt 2024).

Die Wiederverwendung der verbleibenden Mineralik aus der Verbrennung als Sekundärbaustoff erfolgt bislang nur in sehr begrenztem Umfang (Lübben und Eckardt 2024). Das Innovative Resource Recovery Technology (IRRT) Verfahren wurde seit 2012 im Rahmen öffentlich geförderter Forschungsprojekte entwickelt, mit dem Ziel, die stoffliche Verwertung von Schlacke signifikant zu verbessern. Die bei dem Verfahren entstehende hochwertig aufbereitete Gesteinskörnung auch UltraLit genannt bietet die Chance, natürliche Primärrohstoffe zu ersetzen, CO₂-Emmissionen zu reduzieren und gleichzeitig einen Beitrag zur Kreislaufwirtschaft zu leisten. (Lübben und Eckardt 2024)

1.2 Zielsetzung der Arbeit

Die vorliegende Bachelorarbeit soll einen Überblick über die herkömmlichen HMF-Schlacke Aufbereitungsprozesse liefern und den Unterschied zu der hochwertigeren Aufbereitung mittels IRRT-Verfahren darstellen.

Zudem soll in einem Praxisteil die Erhöhung des Anteils recycelter Gesteinskörnung aus HMF-Schlacke im Beton untersucht werden. Während aktuelle Anwendungen mit etwa 17% Beimischungen arbeiten (Lübben und Eckardt 2024), soll analysiert werden, welcher maximale Anteil möglich ist, ohne dabei die Anforderungen der relevanten Regelwerke zu verletzen. Hierbei sollen technische und umweltrelevante Prüfparameter mit den in den Normen definierten Grenzwerten verglichen werden. Abschließend soll in einem Ausblick Empfehlungen für die

Praxisanwendungen im gängigen Betonbau erstellt werden sowie ein Rahmen für den weiteren Forschungsbedarf gesteckt werden.

1.3 Aufbau der Arbeit

Innerhalb der Technischen Grundlagen wird der Zweck sowie die Funktionsweise der thermischen Abfallbehandlung beschrieben werden. Ebenso werden die Zusammensetzung und die Eigenschaften der HMV-Schlacke dargestellt und das Aufbereitungsverfahren nach dem Stand der Technik sowie nach dem neuen IRRT-Verfahren erklärt. Danach werden die allgemeinen rechtlichen Rahmenbedingungen abgesteckt und die zu erfüllenden Anforderungen an Gesteinskörnungen im Betonbau aufgeführt.

Unter dem Kapitel 3 Material und Methodik wird die in den Versuchen verwendete Gesteinskörnung erläutert. Eine Erklärung der Mischverhältnisse sowie zu der Betonherstellung und dem Zweck einer Referenzmischung wird ebenfalls gegeben. Abschließend zu dem Kapitel werden noch die angewandten Prüfmethoden für die Erfassung der Frisch- und Festbetoneigenschaften dargestellt.

Kapitel 4 befasst sich mit den Versuchsergebnissen, hier werden die mechanisch-technologischen Eigenschaften sowie die Untersuchungsergebnisse der umweltrelevanten Parameter dargestellt. Zudem wird der Einfluss des UltraLit-Gehalts, also der beim IRRT-Verfahren entstehenden aufbereiteten Gesteinskörnung, auf die Betoneigenschaften ausgewertet. Anschließend wird die Normkonformität überprüft, um die Potenziale und Grenzen des Einsatzes von UltraLit aufzuzeigen.

In der Schlussfolgerung und dem Ausblick werden die Versuchsergebnisse nochmals zusammengefasst, Empfehlungen für die Praxis erstellt und mögliche weiterführende Fragestellungen sowie der zukünftige weitere Forschungsbedarf aufgeführt.

2 (Technische) Grundlagen

In diesem Kapitel werden die technischen Grundlagen zur Entstehung, Zusammensetzung und Aufbereitung von HMV-Schlacke dargestellt. Zunächst wird der Prozess der thermischen Abfallbehandlung erläutert, um die Entstehung und Eigenschaften der Schlacke nachvollziehbar zu machen. Anschließend wird das konventionelle sowie das IRRT-Aufbereitungsverfahren beschrieben, die für die Rückgewinnung wertvoller Metalle und die Herstellung von Sekundärbaustoffen entscheidend sind. Ergänzend werden die rechtlichen Rahmenbedingungen für die Verwertung von HMV-Schlacke sowie die Anforderungen an Gesteinskörnungen im

Betonbau erläutert, um die technische und normative Grundlage für die weiteren Untersuchungen dieser Arbeit zu schaffen.

2.1 Thermische Abfallbehandlung und Entstehung von HMV-Schlacke

Etwa zwei Drittel der anfallenden Hausmüll- und Siedlungsabfallmengen können derzeit einer stofflichen Verwertung zugeführt werden, mit dem übrigbleibenden Rest können innerhalb der Müllverbrennungsanlagen Strom sowie Wärme produziert werden (ITAD e.V. 2025b). Eine vollständige Verwertung der Abfallmengen vor der thermischen Behandlung ist aufgrund von gefährlichen Substanzen nicht möglich. Diese Substanzen lassen sich in den Müllverbrennungsanlagen sowohl unschädlich machen als auch energetisch verwerten. Grundsätzlich dient die thermische Abfallbehandlung der Volumenreduzierung von Müll sowie dem aus dem Verkehr ziehen von gefährlichen Substanzen. (ITAD e.V. 2025b)

In Deutschland wird bereits vor der thermischen Abfallbehandlung der Abfall sortiert, so kann Glas und Papier zuvor recycelt werden (ITAD e.V. 2025b). Die restlichen Abfälle werden zu dem Müllbunker der Abfallbehandlungsanlage transportiert. Hier wird der Abfall mittels Greifarmen in gesicherte Öfen übergeben und darin verbrannt. Bei diesem Verbrennungsprozess erhitzt sich Wasser, welches über Rohre zu einer Turbine transportiert wird. Die im Wasserdampf enthaltene Energie treibt den Generator zur Stromerzeugung an. Es ist zudem möglich, den Dampf des erhitzten Wassers auch in Fernwärme umzuwandeln. (ITAD e.V. 2025b)

Die im Abgas enthaltenen Schadstoffe werden in der Rauchgasreinigung durch Wäscher, Elektrofilter, Katalysatoren sowie Filterschläuche entfernt und können nachfolgend entsorgt werden (ITAD e.V. 2025b). Nach dem Verbrennungsprozess bleibt von dem Abfall noch Asche und die entstandene Schlacke übrig (ITAD e.V. 2025b).

In Deutschland liegt der energetische Gesamt-Nutzungsgrad der Müllverbrennungsanlagen durchschnittlich bei 50%, jedoch ist anzumerken, dass bei einer besseren Anbindung der Anlagenstandorte mehr Fernwärmeenergie abgegeben werden könnte (UBA 2016). Zudem fällt bei den meisten Anlagen kein Abwasser an. Bereits in der Verbrennungsanlage werden Eisen- und Nichteisenmetalle im Zuge der Nachbereitung aus der Schlacke zurückgewonnen und stofflich verwertet. (UBA 2016)

Zusätzlich zu den Müllverbrennungsanlagen für Hausmüll- und Siedlungsabfälle gibt es noch sogenannte Ersatzbrennstoff-Kraftwerke, in diesen werden hochkalorisch aufbereitete Abfälle, also Abfälle mit einem hohen Brennwert, verbrannt (UBA 2016). Durch den geteilten Standort mit Industrieanlagen ist es möglich, diese mit Prozesswärme und elektrischer Energie zu

versorgen und somit die sonst notwendige Wärme und Energie aus Brennstoffen wie Kohle, Öl und Gas zu vermeiden (UBA 2016).

In Deutschland gibt es über 90 thermische Abfallbehandlungsanlagen, darunter die Müllverbrennungsanlagen und die Ersatzbrennstoff-Kraftwerke (ITAD e.V. 2025a). In der nachfolgenden Abbildung 1 sind die Standorte der in Deutschland vorhandenen Abfallbehandlungsanlagen aufgeführt.

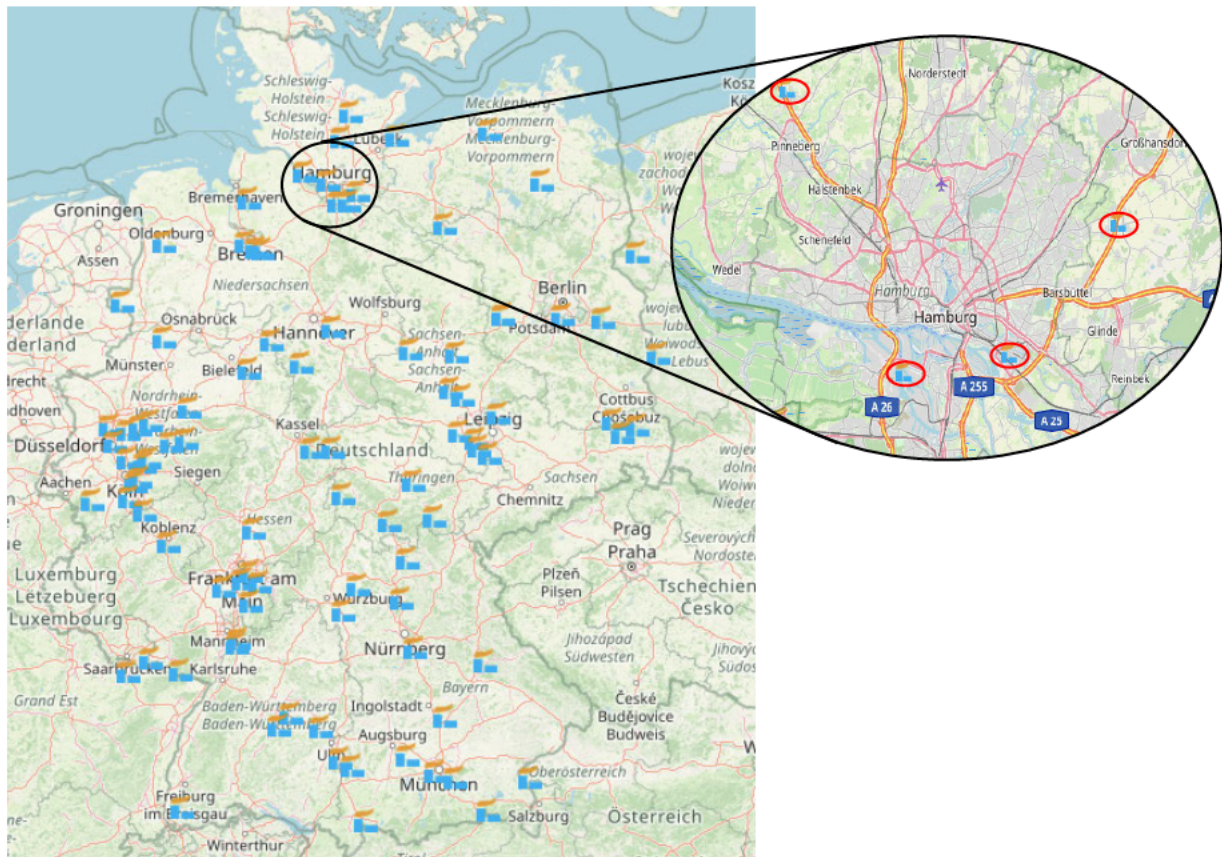


Abbildung 1: Standorte der Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD e.V. 2025a)

Innerhalb von Hamburg liegen die beiden Abfallbehandlungsanlagen Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm (MVR) und die des Zentrums für Ressourcen und Energie (ZRE) (ITAD e.V. 2025a). Am Rande von Hamburg bestehen zudem noch Anlagen von der Energy from Waste (EEW) in Stapelfeld und der Abfallverbrennungs- und Biokompost-Gesellschaft (AV-BKG) in Tornesch-Ahrenlohe (ITAD e.V. 2025a). Die hier aufgezeigten Standorte zählen zu den Mitgliedern, die von der Interessensgemeinschaft für thermische Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland (ITAD e.V.) vertreten werden (ITAD e.V. 2025a). Laut der Stadtreinigung Hamburg versorgen zusätzlich, zu den beiden zuvor genannten in Hamburg liegenden Abfallbehandlungsanlagen, noch die Müllverwertungsanlage Borsigstraße (MVB) und das Biogas- und Kompostwerk Bützberg (BKW) die Stadt Hamburg mit Energie und bieten eine umweltgerechte Entsorgung der Abfälle (Stadtreinigung Hamburg 2025).

2.2 Zusammensetzung und Eigenschaften HMV-Schlacke

Hausmüllverbrennungsasche fällt bei der Verbrennung von Hausmüll, hausmüllähnlichen Gewerbeabfällen und Sperrmüll an (Alwast und Riemann 2010) und läuft laut Abfallverzeichnisverordnung unter der Nummer 19 01 12 (Knappe u. a. 2012). Der Hausmüll macht hierbei einen Anteil von 56% aus und der Gewerbeabfall 37% (Alwast und Riemann 2010). Die restlichen 7% entstehen aus dem Sperrmüll (Alwast und Riemann 2010).

Zudem ist zu unterscheiden zwischen HMV-Rohaschen und HMV-Asche (Knappe u. a. 2012). Rohasche fällt als sogenannter Rostabwurf oder Rostdurchfall an und besteht aus einer Mischung verschiedener Materialien. Dazu gehören gesinterte Verbrennungsprodukte, also pulverförmige Materialien, die durch Erhitzen und Verdichten verfestigt werden sowie Eisenschrott und andere Metalle, Glas- und Keramikreste, mineralische Bestandteile sowie unverbrannte Rückstände aus dem Feuerraum der Müllverbrennungsanlage. Als HMV-Asche wird hingegen die bereits aufbereitete und gealterte HMV-Rohasche bezeichnet. Diese wird zumeist im Deponiebau, Bergversatz, Erd-, Tief-, Straßen- und Wegebau eingesetzt und dient zum Beispiel dem Bau von Lärmschutzwällen, Dämmen, Frostschutz- und Schottertragschichten, oder als hydraulisch gebundene Tragschicht. (Knappe u. a. 2012)

Die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) legt fest, dass die Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe nur nach umfassenden Gütesicherungen erfolgen darf (Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz 2021). Zudem ist katalogisch festgehalten, welche Ersatzbaustoffe in bestimmten Einbauweisen Anwendung finden dürfen (Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz 2021). Die HMV-Asche wird hierbei in zwei Verwertungsklassen kategorisiert (Knappe u. a. 2012). HMV-Aschen der Verwertungsklasse 2 sind der überwiegende Standard in Aufbereitungsanlagen und sind nur in stark limitierten Einbauweisen möglich. HMV-Asche der Klasse 1 ist bisher nur unter erheblichen Mehraufwand bei der Aufbereitung herstellbar gewesen und wurde daher kaum realisiert. Aus Vereinfachungsgründen wird HMV-Asche daher zumeist deponiert. (Knappe u. a. 2012)

Die Zusammensetzung der HMV-Asche, wird durch den der Verbrennung zugeführten Abfall bestimmt (Alwast und Riemann 2010). Durch saisonale Veränderungen und lokale abfallwirtschaftliche Gegebenheiten können die Anteile in der Zusammensetzung variieren (Alwast und Riemann 2010). In der folgenden Abbildung sind die prozentualen Stoffströme aufgeführt, aus denen sich die HMV-Schlacke zusammensetzt.

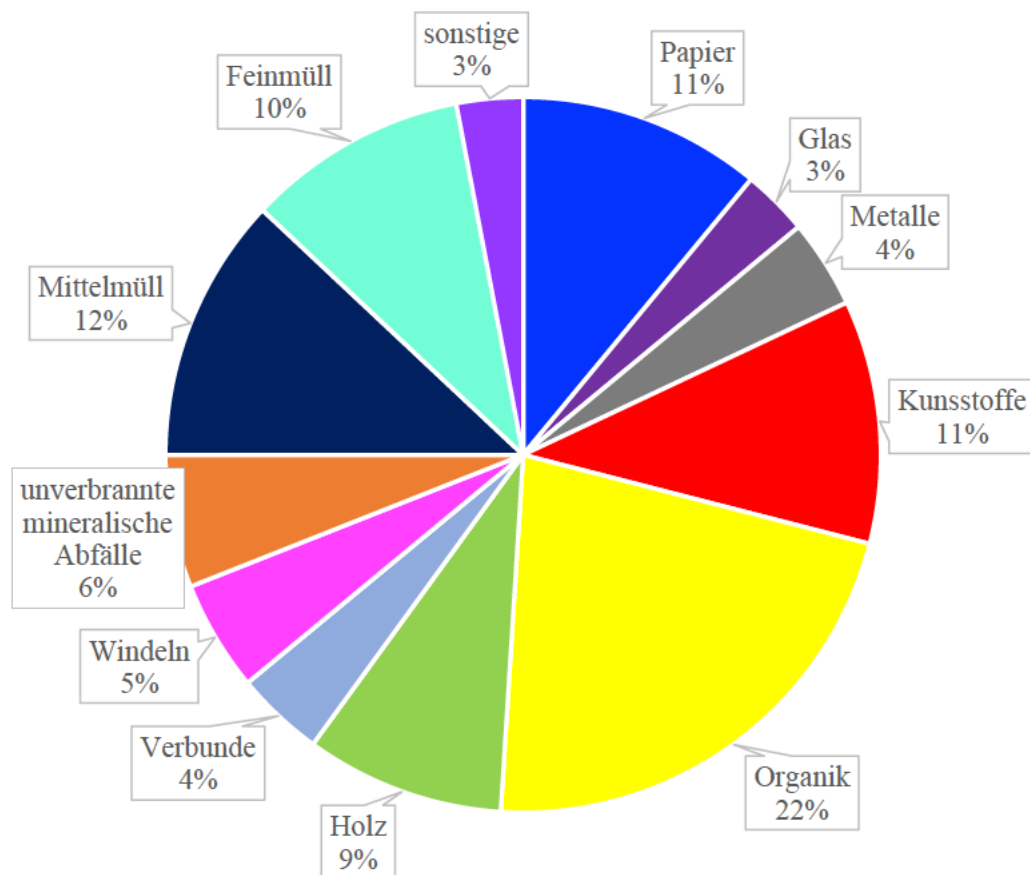


Abbildung 2: Zusammensetzung HMV-Schlacke prozentuale Stoffströme (Alwast und Riemann 2010)

Für die Verwendung im Betonbau ist es zudem wichtig, dass die Glas- und Aluminiumanteile möglichst gering ausfallen, da diese durch die Bildung von Aluminiumsilikaten zu Quellungen führen könnten und folglich den Beton beschädigen würden (Lübben und Eckardt 2024).

2.3 Konventionelle Aufbereitungsverfahren von Schlacke

Maßgeblich für die Erzeugung eines Sekundärbaustoffes aus HMV-Schlacke ist die Alterung (Alwast und Riemann 2010). Hierbei werden durch Hydrations-, Karbonisations- und Oxidationsprozesse leicht mobilisierbare Schwermetallverbindungen, die potenziell noch in der Rohschlacke vorhanden sein können, in schwerlösliche Verbindungen überführt. Durch die Lagerung bzw. Alterung reagiert metallisches Aluminium unter Wassereinwirkung zu Wasserstoff und Aluminiumhydroxid, die dazu beitragen, das Volumen zu stabilisieren und die Eluierbarkeit der Schadstoffe zu minimieren (Alwast und Riemann 2010).

Das Mindest-Leistungsprofil, welches bei der Aufbereitung von HMV-Schlacken eingehalten werden muss, um die benötigten bauphysikalischen Eigenschaften einhalten zu können, umfasst fünf Anforderungen (Alwast und Riemann 2010). Zunächst werden unverbrannte Materialien mithilfe einer Windsichtung entfernt. Anschließend erfolgt die Abtrennung von Eisen-

und Nichteisenmetallen durch Magnet- und Wirbelstromabscheider. Zum Klassieren und Einstellen einer gewünschten Korngrößenverteilung wird die Schlacke gesiebt und in einer Prallmühle gebrochen, um zu große Materialien zu zerkleinern. Die Volumenstabilisierung, sowie die Verringerung der Auslaugung von Salzen und Schwermetallen kann wie zuvor beschrieben durch die Alterung bzw. durch die mehrwöchige Lagerung erreicht werden. Der Aufbau der Aufbereitungsanlage und die Verschaltung der einzelnen Verfahrensschritte unterscheidet sich je nach Betreiber und den verfügbaren Absatzwegen für die aufbereitete Schlacke. (Alwast und Riemann 2010)

Anhand des Aufbereitungsverfahrens der Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm (MVR) kann die Aufbereitung der HVM-Schlacke, so wie sie größtenteils Anwendung auch in anderen Anlagen Deutschlands findet, detailliert dargestellt werden (siehe Abbildung 3) (Alwast und Riemann 2010). Allein die Reihenfolge der Verfahrensschritte kann sich zu anderen Anlagen unterscheiden. In der MVR wird die angelieferte Rohschlacke vorerst in zwei Fraktionen gesiebt, daraus entstehen die Fraktion 0 bis 32 mm und die größer 32 mm Fraktion. Aus der 0 bis 32 mm Fraktion werden darauffolgend die Eisenstückchen mittels Magnetabscheider entfernt sowie die Nichteisenmetalle mit einem Wirbelstromabscheider. Die größer 32 mm Fraktion wird vorerst durch eine Prallmühle zerkleinert und im Anschluss werden, ebenso wie bei der 0 bis 32 mm Fraktion, die Metalle mittels Magnet- und Wirbelstromabscheider entfernt. Es wird eine erneute Siebung auf 32 mm durchgeführt, um den geringen Anteil an Überkorn abzutrennen. Dieser geringe Anteil wird entweder erneut in der Müllverbrennungsanlage bearbeitet oder anderweitig entsorgt. Nachdem nun beide Fraktionen den Korngrößen 0 bis 32 mm entsprechen und weitgehend metallfrei sind, werden diese zusammengeführt. Durch eine weitere Siebung entstehen erneut zwei Fraktionen, die 0 bis 10 mm Fraktion und die größer 10 mm Fraktion. Bei der größer 10 mm Fraktionen sollen vorerst die Leichtanteile, die zumeist aus Unverbranntem bestehen, durch einen Windsichter entfernt werden. Diese Leichtanteile werden ebenso wie der Überkornanteil, entweder erneut in der Müllverbrennungsanlage verbrannt oder anderweitig entsorgt. Nachfolgend werden die beiden neu entstandenen Fraktionen über Bandwaagen zusammengeführt, um die gewünschte Korngrößenverteilung zu erreichen. Abschließend wird die aufbereitete Schlacke für 3 Monate zwischengelagert, um die Alterung zu vollziehen. Nach der Alterung ist es möglich, dass die Schlacke erneut die vorherig genannten Prozesse durchläuft, bis diese den Qualitäten des Endabnehmers entspricht. (Alwast und Riemann 2010)

In der nachfolgenden Abbildung 3 sind die Verfahrensschritte für die Aufbereitung der HVM-Schlacke, wie es in der Müllverwertungsanlage Rugenberger Damm (MVR) erfolgt, nochmals zusammengefasst.

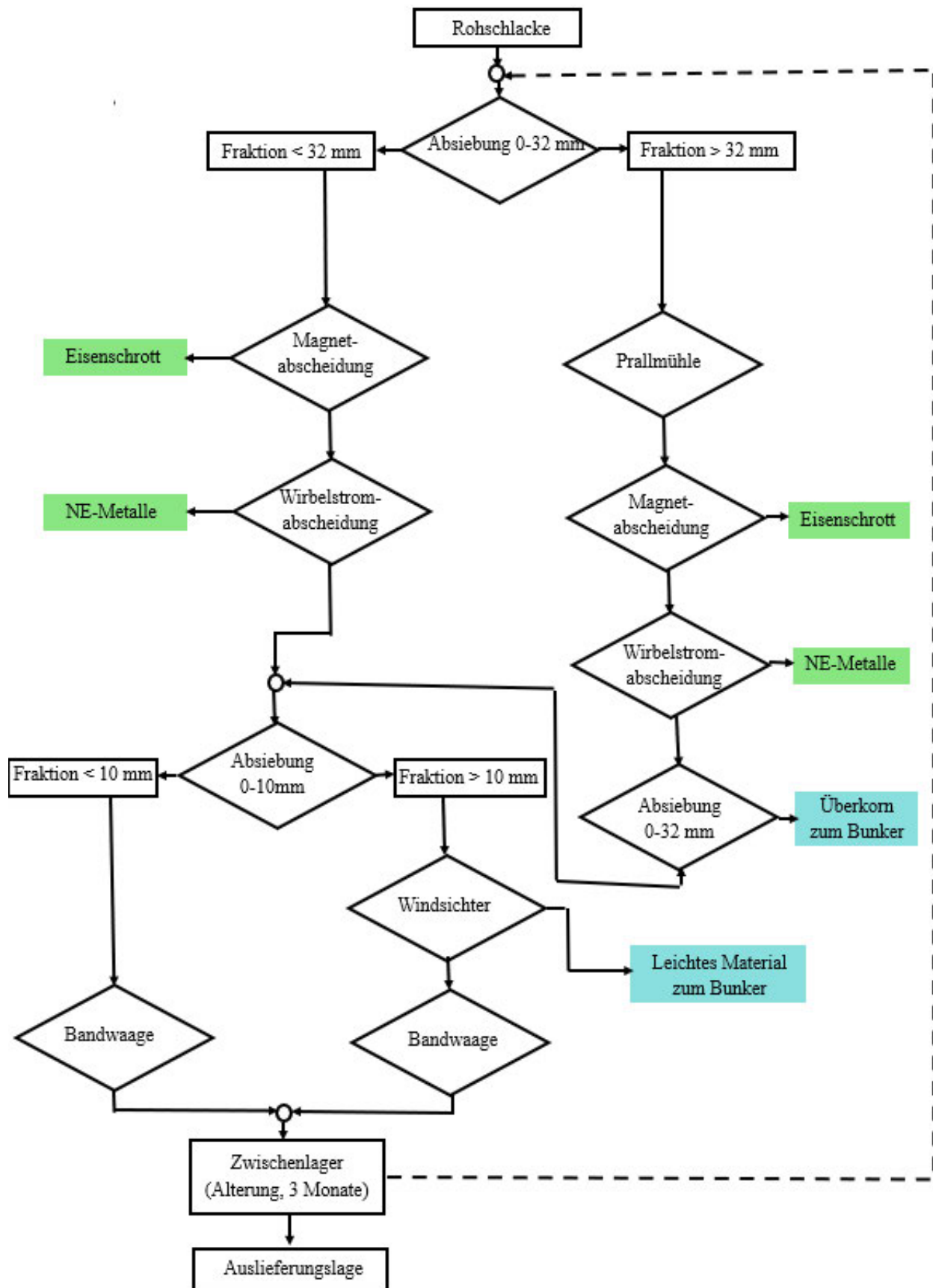


Abbildung 3: Aufbereitungsverfahren von HMV-Schlacke in der MVR (Alwast und Riemann 2010)

Allgemein besteht zudem die Möglichkeit, die Alterung vor oder wie bei der MVR nach der mechanischen Aufbereitung durchzuführen (Alwast und Riemann 2010). Allerdings ist anzumerken, dass die Alterung vor der Aufbereitung zu weniger Ausbeute der Metalle führen kann, aufgrund von Umwandlungsprozessen wie beispielsweise der Oxidation der Metalle (Alwast und Riemann 2010).

Aufgrund von dem breiten Kornspektrum und zu hohen Materialschichten auf den Wirbelstromabscheidern wird in den konventionellen HMV-Schlacken Aufbereitungsanlagen nicht das Optimum der Nichteisenmetall-Abtrennung erreicht (Lübben und Eckardt 2024). Die Nichteisenmetalle in den Korngrößen kleiner 2 mm verbleiben in dem HMV-Schlackengemisch, obgleich teilweise versucht wird, mit einem nachgeschalteten mobilen Nichteisenmetall-Abscheider einen höheren Output dieser Metalle zu erzielen. Zudem werden 31% der zu gewinnenden Nichteisenmetalle aus der Fraktion 1 bis 2 mm in dem Großteil der Schlacke Aufbereitungsanlagen bereits vor der Entfrachtung abgesiebt und entsorgt. (Lübben und Eckardt 2024)

2.4 Aufbereitungsverfahren von Schlacke mit dem IRRT-Verfahren

Innerhalb des IRRT-Verfahrens werden alle Aspekte für eine hochwertige Verwertung vereint, mit der maximalen Metallrückgewinnung wird ein bereits verhüttungsfertiger Rohstoff erzeugt (Lübben und Eckardt 2024). Die gewonnenen Metalle können also direkt Schmelz- bzw. Hüttenprozessen ohne weitere Behandlungen zugeführt werden und sonst erforderliche Metallaufbereiter entfallen. Das rückgewonnene Altglas kann in der Dämmstoffindustrie eingesetzt werden und zusätzlich wird eine zertifizierte Gesteinskörnung für den Einsatz im Betonbau hergestellt. Die zu deponierenden Abfälle können reduziert werden und durch hohe CO₂-Einsparungen von bis zu 400 kg CO₂ pro Tonne HMV-Schlacke leistet das Verfahren einen Beitrag zum Klimaschutz. Zudem besticht dieses Verfahren durch seine Wirtschaftlichkeit, da es ohne weitere Zuzahlungen betrieben werden kann. Das IRRT-Verfahren basiert auf 7 Level der Aufbereitung und kombiniert nasse sowie trockene Aufbereitungsschritte. (Lübben und Eckardt 2024)

In Abbildung 4 werden diese Level zusammengefasst.

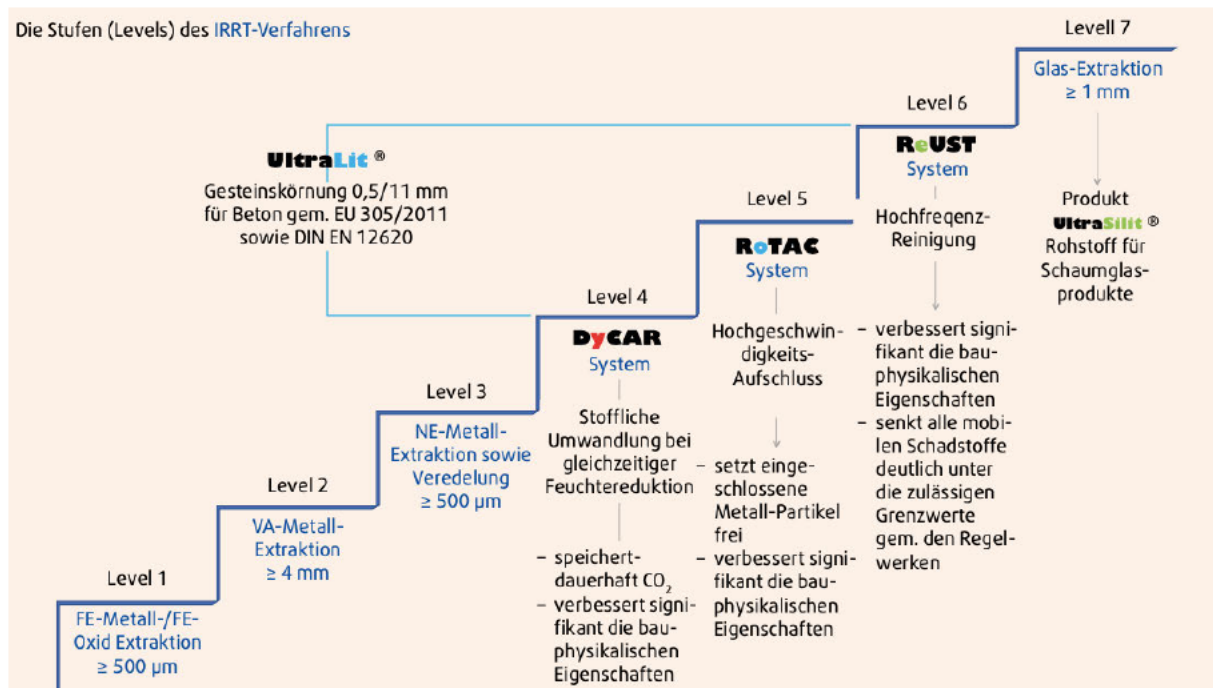


Abbildung 4: Die 7 Level des IRRT-Verfahrens (Lübben und Eckardt 2024)

Eingesetzt werden nur frisch aus dem Nassentschlacker entnommene HMV-Schlacken (Lübben und Eckardt 2024). Die 7 Level laufen nicht chronologisch nacheinander ab, sondern spiegeln die Komplexität des Verfahrens wieder. Innerhalb des Verfahrens wird eine Eisen- und Edelstahl-Entfrachtung durchgeführt. Das sogenannte DyCAR-System beschreibt einen Vorgang, bei welchem die Schlacke einer Trockentrommel zugeführt wird, um unter CO_2 -Zufuhr eine dynamische Carbonatisierung durchzuführen und somit die bauphysikalischen Eigenschaften zu verbessern. Bei dem Hochgeschwindigkeitsaufschluss werden instabile Konglomerate, also Gesteine, die durch Bindemittel verbunden sind, in ihre Bestandteile zerlegt. Dadurch können eingeschlossene natürlich vorkommende Metallpartikel freigelegt werden. Dieser Verfahrensschritt wird auch als ROTAC-System bezeichnet und verbessert ebenso die bauphysikalischen Eigenschaften. Durch eine Trockensiebung kann das Gemisch klassiert werden, hierbei wird die kleiner 0,5 mm Fraktion abgetrennt, die Grobfraction auf kleiner 8 mm oder kleiner 11 mm zerkleinert und dem Prozess erneut zugeführt. Bei den Fraktionen 0,5 bis 2 mm, 2 bis 4 mm und 4 bis 8 mm werden die Eisenoxide mittels dynamischen Magnetfelds abgetrennt. Die Nichteisenmetalle werden mit einem Wirbelstromabscheider abgetrennt, hierbei können bis zu 3% der Masse an HMV-Asche, die dem Prozess zugeführt wurde als reine Nichteisenmetall Fraktion abgetrennt werden. Möglich ist dies aufgrund der Trockenheit des Materials sowie dünnen Schichten des Materials auf den Beschickungsbändern und engen Kornspektren. Bei der größer 4 mm Fraktion wird mittels Induktions-Sortierung der Edelstahl abgetrennt. Für eine Veredelung werden die Nichteisenmetalle in Leicht- und Schwerfraktionen aufgetrennt. Bei der

Hochfrequenzreinigung mit Ultraschall, dem sogenannten ReUST-System, werden nochmals noch vorhandene instabile Schlackepartikel-Verbunde in die einzelnen Bestandteile abgesprengt. Die Glasanteile können ab 1 mm mit Luftdüsen extrahiert werden, das daraus gewonnene Glas wird als UltraSilit bezeichnet. (Lübben und Eckardt 2024)

Ein großer Vorteil des IRRT-Verfahrens ist es, dass keine Lagerflächen für die Alterung bzw. Carbonatisierung der Schlacke mehr notwendig ist, dieser Prozess wird durch die dynamische Carbonatisierung ersetzt (Lübben und Eckardt 2024). Die Schlacke kann innerhalb von 14 Tagen behandelt werden, so wie sie aus dem Nass-Entschlacker der Verbrennungsanlage entstammt. Ohne Lagerung entstehen zudem keine instabilen Konglomerate, welche mechanischen Belastungen nicht Stand halten würden. Dies gewinnt vor allem an Bedeutung, da die Schlacke ansonsten ungeeignet für den Einsatz als Sekundärgestein im Beton wäre. Zudem können bereits durch das ReUST-System 98% der im Beton störenden Leichtstoffe abgetrennt werden, diese machen bereits bei der 1 bis 4 mm Fraktion bis zu 2 M.-% aus. (Lübben und Eckardt 2024)

Bei dem IRRT-Verfahren ist zusätzlich der Wasserverbrauch innerhalb des Prozesses durch hohe Energiezufuhren deutlich verringert (Lübben und Eckardt 2024). Ein Grund hierfür ist, dass das Waschwasser bei der Hochfrequenz Reinigung bis zu 8-mal im Kreislauf wiederverwendet werden kann. Daraus ergibt sich ein Wasser zu Feststoffverhältnis von 0,3 zu 1. Der Waschvorgang kann in weniger als einer Minute erfolgen. (Lübben und Eckardt 2024)

Insgesamt kann das IRRT-Verfahren durch die hochwertige Aufbereitung einen Output von 50% zertifizierter Gesteinskörnung, auch UltraLit genannt, in einer Korngröße von 0,5 bis 11 mm erzielen (Lübben und Eckardt 2024). Zudem können 7,1% Eisenmetalle und 0,4% Edelstahl gewonnen werden. 2,5% Aluminium, sowie 0,7% der Nichteisenmetall-Schwerfraktion, wie beispielsweise Kupfer, Blei, Zink und Edelmetalle können in einer Reinheit von mehr als 85% gewonnen werden. Weitere 7,5% entsprechen der Gewinnung von UltraSilit, also Glas mit einer Reinheit von mehr als 95%. Der bei der dynamischen Carbonatisierung entstehende Wasserdampfanteil liegt bei rund 12 % und der Rest sind Filterstaub, Feinkorn kleiner 0,5 mm sowie Schlamm aus der Reinigung und Prozesswasser. Dieser Rest kann auf Deponien als hydraulisch gebundene Tragschicht eingebaut werden. Die abgetrennten Schadstoffe, die noch in den Reststoffen vorhanden sind, können dank der puzzolanischen Eigenschaft der trockenen Feinfraktion, also der Eigenschaft in Kombination mit Wasser Material zu binden, mit dem Prozesswasser verfestigt werden. Dadurch entsteht eine Schadstoffsinke, in der die Schadstoffe so stark eingebunden sind, dass die Reststoffe dennoch einer Deponie Klasse 1 entsprechen. (Lübben und Eckardt 2024)

Die erzeugten Rohstoffe können unmittelbar nach der Gewinnung verkauft werden, wodurch für eine IRRT-Aufbereitungsanlage ein vergleichsweise kleines Grundstück nötig ist (Lübben und Eckardt 2024). Die Wertschöpfung der Nichteisenmetalle kann die Mehrkosten für die aufwendigere Aufbereitung der Mineralik abdecken, wodurch unter anderem das Verfahren so wirtschaftlich wird, dass es einen Return of Investment in unter 48 Monaten für große IRRT-Anlagen erzielen kann. Bei herkömmlichen Verwertungsanlagen entstehen Behandlungs-, Verwertungs- bzw. Entsorgungskosten von bis zu 20 Euro pro Tonne HMV-Schlacke, diese Kosten werden von den Bürgern bezahlt sowie eine zusätzliche Brennstoffsteuer. Durch die Wirtschaftlichkeit des IRRT-Verfahrens können die Kosten der Brennstoffsteuer abgefangen werden und die bisherigen Kosten für die Aufbereitung, durch die Vermarktung der Erzeugnisse, gesenkt werden. (Lübben und Eckardt 2024)

2.5 Rechtliche Rahmenbedingungen

Die ersten gesetzlichen Grundlagen bezüglich der Abfallentsorgung in Deutschland wurden Anfang des 19. Jahrhunderts entwickelt (UBA 2023). Mit dem Abfallbeseitigungsgesetz im Jahre 1972 wurde eine erste bundeseinheitliche Regelung eingeführt. Die EU-Abfallrahmenrichtlinie fungiert als zentrale europäische Vorgabe für die Vermeidung, Verwertung und Beseitigung von Abfällen. (UBA 2023)

An oberster Priorität steht das Ziel, natürliche Ressourcen zu schonen und Abfälle umweltverträglich zu bewirtschaften, eines der zentralen Grundsätze dafür stellt die fünfstufige Abfallhierarchie dar (UBA 2023). Diese legt fest, dass Abfälle vorerst zu vermeiden sind. Da dies nicht in allen Bereichen möglich ist, sollen Vorbereitungen für die Wiederverwendung getroffen werden. Jegliche Abfälle sollen recycelt werden oder, falls nicht möglich, sonstig verwertet werden, beispielsweise in energetischen Verwertungen und Verfüllungen von Aufgrabungs- oder Abbaustätten. Die letzte Möglichkeit ist die Beseitigung von Abfällen. (UBA 2023)

Von Beginn an ist es sinnvoll, Abfälle getrennt zu sammeln, um die größtmögliche Ausschöpfung der stofflichen Potenziale der verschiedenen Abfallströme zu erzielen (UBA 2023). Verpflichtende Anforderungen für die getrennte Sammlung von Abfällen bezüglich Altpapier, Altglas, Kunststoffen und Bio-Abfällen sind bereits in dem Kreislaufwirtschaftsgesetz für Deutschland festgehalten (UBA 2023). In Deutschland gilt zudem das Kreislaufwirtschaftsgesetz als Grundlage für das Abfallrecht und verankert Instrumente der Produktverantwortung, wodurch auch die umweltverträgliche Verwertung und Beseitigung nach dem Gebrauch der Produkte sichergestellt werden soll (UBA 2023).

Zudem wird innerhalb des Kreislaufwirtschaftsgesetzes festgelegt, was ein Nebenprodukt ist und wann ein Produkt das Ende der Abfalleigenschaft erreicht (UBA 2022). Paragraph 4 regelt die Abgrenzung zwischen Abfällen und Nebenprodukten, die nicht dem Abfallrecht unterliegen. Hierin wird beschrieben, dass ein Nebenprodukt als solches bezeichnet werden darf, wenn der Stoff bei der Herstellung eines anderen Stoffes anfällt und nicht der Hauptzweck der Herstellung ist. Zudem sind 4 Voraussetzungen zu erfüllen, unter anderem muss eine Weiterverwendung des Stoffes sichergestellt werden und es soll auf eine über ein normales industrielles Verfahren hinausgehende Vorbehandlung verzichtet werden können. Die Erzeugung muss wie zuvor genannt ein integraler Bestandteil eines Herstellungsprozesses sein und die weitere Verwendung durch die Erfüllung aller Produkt-, Umwelt- und Gesundheitsschutzanforderungen sichergestellt werden, zudem muss der Stoff unschädlich für Mensch und Umwelt sein. (UBA 2022)

Auch für das Ende der Abfalleigenschaft sind laut Paragraph 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes 5 Kriterien zu erfüllen (UBA 2022). Der Stoff muss ein Verwertungsverfahren durchlaufen und für bestimmte Zwecke verwendet werden. Außerdem muss ein Markt bzw. eine Nachfrage des Stoffes bestehen sowie bestimmte technische und rechtliche Anforderungen erfüllt werden. Auch hier muss eine Unschädlichkeit der Verwendung sichergestellt werden. (UBA 2022)

Nach der Kommission der Europäischen Gemeinschaften, sowie dem Paragraph 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes trifft dies jedoch für HMV-Schlacke nicht zu, da diese ohne weitere Verarbeitung nicht verwendbar ist (Lübben und Eckardt 2024). Dies führt dazu, dass HMV-Schlacke weiterhin als Abfall betrachtet werden muss (Lübben und Eckardt 2024).

Auf EU-Ebene wurde bereits für bestimmte Arten von Schrott und Bruchglas definiert, unter welchen Randbedingungen diese das Ende der Abfalleigenschaft erreichen (UBA 2018b). Grundsätzlich muss die Verwertung von Abfällen schadlos erfolgen und eine Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf muss verhindert werden, so wird es auch in Paragraph 7 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes festgelegt. Um eine hohe Verwertungsklasse zu erreichen ist es zudem vorteilhaft, Bauprodukte herzustellen, welche nach der Nutzungsphase nicht als gefährliche Abfälle eingestuft werden. (UBA 2018b)

In einer Einzelfallprüfung eines Rechtsgutachtens in Hamburg wurde bereits einmal untersucht, ob die in Hamburg angewandte herkömmliche Aufbereitung von HMV-Schlacken ausreichend ist, um die Abfalleigenschaft für Fertigschlacke entfallen zu lassen (Lübben und Eckardt 2024). Nach den Prüfungen der Gutachter wurde festgelegt, dass die Aufbereitungsverfahren für HMV-Schlacken so leistungsfähig sind, dass die Anforderungen nach Paragraph 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes erfüllt werden. Eine generelle Regelung, ob HMV-Schlacken unter das

Abfallrecht fallen, gibt es jedoch bisher nicht. Demnach müssten hierfür Einzelfallprüfungen durchgeführt werden, die aber nicht veröffentlicht werden, wodurch keine Literatur zu Verfügung steht und weiterhin eine Grauzone bei der Einstufung der HMV-Schlacke besteht. (Lübben und Eckardt 2024)

Die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) setzt zudem Bedingungen für die schadlose Verwertung mineralischer Ersatzbaustoffe fest, die aus Bautätigkeiten, industriellen Herstellungsprozessen, oder aus Aufbereitungsanlagen stammen und anstelle von Primärrohstoffen eingesetzt werden (UBA 2018b). Mit den Regelungen der Ersatzbaustoffverordnung sollen hohe Verwertungsquoten erzielt und somit der Ressourcenschutz verfolgt werden (UBA 2018a). Zudem soll der Schutz von Boden und Grundwasser durch Schadstoffausträge aus mineralischen Ersatzbaustoffen langfristig sichergestellt werden (UBA 2018a). Möglich ist dies durch technische Voraussetzungen und materielle Anforderungen, die sich auf die Kernpunkte Güteüberwachung, Qualitätssicherungen und Angaben über konkrete Einbauweisen stützen (UBA 2018a).

Jedoch ist in der Ersatzbaustoffverordnung der Einsatz von HMV-Schlacke nur als Tragschicht für Dämme, Wälle und als Bauwerkshinterfüllungen zugelassen, hierbei wird die Umweltrelevanz der Schlacke ausschließlich anhand der wasserlöslichen Inhaltsstoffe bewertet (Lübben und Eckardt 2024). Für die Verwendung von Schlackenkomponenten in Beton oder Betonfertigteilen gelten jedoch andere Rahmenbedingungen, da in festen Betonbauteilen keine Partikel mehr durch Wasser mobilisiert werden können. Die Niederlande sind aufgrund dessen bereits dazu umgestiegen, nur die eluierbaren Schadstoffe in den Ausgangsmaterialien, sowie die Umweltverträglichkeit der fertigen Betonsteine zu prüfen. (Lübben und Eckardt 2024)

Sobald die aufbereitete HMV-Schlacke unter dem Begriff Bauprodukt gehandelt werden kann, müssen gesetzliche Regelungen in Bezug auf Schadstoffe in Bauprodukten aus dem Chemikalienrecht und dem Baurecht erfüllt werden (UBA 2018b). Diese werden zudem durch das Abfallrecht für Zusammensetzungen und Anwendungsmöglichkeiten beeinflusst (UBA 2018b).

Für die in Bauprodukten eingesetzten Chemikalien und Biozide gilt die Verordnung für die Registrierung, Bewertung, Zulassung und Beschränkung chemischer Stoffe, oder auch REACH-Verordnung genannt (UBA 2018b). Zudem gelten für die eingesetzten Chemikalien auch die Verordnung für persistente organische Schadstoffe, auch POP-Verordnung genannt und die Decopaint-Richtlinie. Letztere regelt den Gesamtgehalt an flüchtigen organischen Verbindungen (VOC) in bestimmten Farben und Lacken. (UBA 2018b)

Der Einsatz von Bioziden findet hauptsächlich bei Bauprodukten statt, um diese gegen tierische Schädlinge, Algen, Pilze und Mikroorganismen zu schützen und wird in der Biozid-Verordnung festgelegt (UBA 2018b). Diese verfolgt das Ziel, nur noch Biozide einzusetzen, welche

erwiesenermaßen wirksam und ohne unannehmbare Risiken für Mensch und Umwelt sind (UBA 2018b).

Laut der REACH-Verordnung müssen Chemikalien von Herstellern und Importeuren registriert werden (UBA 2018b). Dies erfordert Analysen zu den Risiken sowie zu den sicheren Verwendungsmöglichkeiten. Für die meisten Chemikalien, die Bauprodukten zugesetzt werden, liegen jedoch keine allgemeinen Angaben darüber vor, ob und in welchem Umfang ihr Einsatz möglich ist, wodurch es zu Einzelfallbewertungen kommt. Das Chemikalienrecht deckt zusätzlich Zulassungs- und Auskunftspflichten für besonders besorgniserregende Stoffe ab. (UBA 2018b) Die Musterbauordnung verlangt die Dokumentation von Rezepturen, Schadstoffgehalten und -emissionen sowie die Einhaltung der Umwelt- und Gesundheitsschutzkriterien (UBA 2018b). Sie wurde von den Ländern erarbeitet und dient den Landesministerien als Grundlage für die Landesbauordnung. Die Musterbauordnung dient dazu, unbeabsichtigt zugesetzte Stoffe zu erfassen, die entweder bei der Verarbeitung entstehen können, als Summenparameter wirksam werden oder aus natürlichen Baustoffen bzw. Abfällen unbekannter Zusammensetzung stammen. (UBA 2018b)

2.6 Anforderungen an Gesteinskörnungen im Betonbau

Für den Herstellungsprozess von Beton unter der Verwendung von Recycling-Gesteinskörnungen gibt es keinen Unterschied im Vergleich zu der Verwendung von Primärrohstoffen (Knappe u. a. 2012). Grundsätzlich gilt für die Herstellung, dass Gesteinskörnung in einer groben und einer feinen Fraktion vorliegen müssen. Dies kann sowohl Recycling-Gesteinskörnung sein, als auch Primärgestein, oder ein Gemisch aus beiden. Zusätzlich wird Zement und Zugabewasser benötigt. Letzteres könnte ebenfalls aus anderen Prozessen recycelt worden sein. (Knappe u. a. 2012)

Zudem ist es möglich Zusatzstoffe, wie beispielsweise Flugasche oder Füller, hinzuzufügen (Knappe u. a. 2012). Zusatzstoffe werden dem Beton zugeführt, um Eigenschaften zu verbessern oder zu erreichen und entsprechen feinen anorganischen oder organischen Stoffen (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Die anorganischen Zusatzstoffe werden in zwei Typen unterschieden, Typ I beschreibt die nahezu inaktiven Zusatzstoffe, so wie den zuvor benannten Füller. Zusatzstoffe mit puzzolanischen bzw. latenthydraulischen Eigenschaften, also der Eigenschaft unter Zufuhr von Wasser Verbunde herzustellen, werden dem Typ II zugeordnet. (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

Des Weiteren können ebenso Zusatzmittel dem Beton zugefügt werden, wie z.B. Fließmittel (Knappe u. a. 2012). Diese beeinflussen durch chemische und oder physikalische Wirkungen

den Beton und liegen entweder in flüssiger, pulverförmiger oder granulatartiger Form vor (Küchlin und Stratmann-Albert 2022).

Zur Einteilung von Gesteinskörnungen müssen vorerst einige grundlegende Begriffe erläutert werden. Eine Einteilung kann beispielsweise nach der Herkunft des Gesteins erfolgen, natürliche Gesteinskörnungen stammen aus natürlichen mineralischen Vorkommen und werden ausschließlich mechanisch behandelt (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Industriell hergestellte Gesteinskörnungen sind ebenfalls mineralischen Ursprungs und werden anschließend, mittels thermischer oder ähnlicher Prozesse, industriell hergestellt. Rezyklierte Gesteinskörnungen werden als solche bezeichnet, wenn sie aufbereitetem anorganischem oder mineralischem Material aus Altbaustoffen entspringen. (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

Die Kornform kann als Kies definiert werden und somit einem natürlich gerundeten Material entsprechen, oder als Splitt das demnach gebrochene Material ist (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Normale Gesteinskörnungen haben eine Kornrohddichte von größer 2000 kg/m^3 wohingegen leichte Gesteinskörnungen Kornrohddichten von kleiner 2000 kg/m^3 aufweisen. Abschließend wird nach der Feinheit eingeteilt, so haben grobe Gesteinskörnungen einen Größtkorn-Durchmesser von größer gleich 4 mm und das Kleinstkorn muss größer gleich 2 mm sein. Feine Gesteinskörnungen müssen einen kleineren Durchmesser als 4 mm aufweisen. Als Feinanteil werden Gesteinsanteile bezeichnet, die einen kleineren Durchmesser als $0,063 \text{ mm}$ aufweisen. Füller Stoffe dürfen nur einen Größtkorn Durchmesser von $0,125 \text{ mm}$ besitzen und mindestens 70% des Gesamtanteils müssen kleiner $0,063 \text{ mm}$ sein. (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

Eine Kornzusammensetzung ergibt sich aus einer Korngrößenverteilung, welche durch eine festgelegte Anzahl von Sieben und den sich daraus ergebenden Siebdurchgängen ausgedrückt wird (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Ein Korngemisch beschreibt eine Mischung, die aus groben und feinen Gesteinskörnungen besteht. Die Bezeichnung einer Gesteinskörnung erfolgt über ihre untere (d) und obere (D) Siebgröße, angegeben im Format d/D . Zulässig sind zudem geringe Anteile an Unterkorn ($< d$) und Überkorn ($> D$). (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

Für die Anforderungen an Gesteinskörnungen werden diese in verschiedene Kategorien eingeteilt, die bestimmte Eigenschaften beschreiben (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Diese Eigenschaften werden als Wertebereiche oder Grenzwerte angegeben. Welche Prüfungen erforderlich sind, hängt von der vorgesehenen Verwendung des Materials und von seiner Herkunft ab. Diese Kategorien unterteilen die geometrischen, chemischen, physikalisch-mechanischen sowie dauerhaften Eigenschaften. Zu den geometrischen Anforderungen zählen

Merkmale wie die Korngruppe, die Kornzusammensetzung und die Kornform. Auch der Feinanteil und der Muschelschalengehalt bei groben Gesteinskörnungen sind von Bedeutung. (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

Die chemischen Anforderungen beziehen sich insbesondere auf den Gehalt an wasserlöslichen Chloridionen, den säurelöslichen Sulfatgehalt sowie den Gesamtschwefelgehalt der Gesteinskörnung (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Für die physikalisch-mechanischen Eigenschaften werden vor allem der Widerstand gegen Zertrümmerung, der Verschleiß- und Polierwiderstand von groben Gesteinskörnungen sowie der Abriebwiderstand beurteilt. Die Dauerhaftigkeit wird durch Eigenschaften wie dem Frost-Tau-Widerstand, der Raumbeständigkeit und der Alkali-Kieselsäure-Reaktivität definiert. Abschließend werden noch sonstige Eigenschaften bezüglich erstarrungs- und erhärtungsstörender Stoffe sowie leichtgewichtiger organischer Verunreinigungen bewertet. (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

In der folgenden Tabelle 1 sind die Kategorien aufgeführt, für die Regelanforderungen bzw. Grenzwerte für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton nach DIN 1045-2 festgelegt wurden. Hierbei wurde sich bereits auf die Eigenschaften bezogen, welche zur Bewertung der im weiteren Verlauf der Bachelorarbeit untersuchten, rezyklierten Gesteinskörnung notwendig sind.

Tabelle 1: Regelanforderungen für die Verwendung von Gesteinskörnungen im Betonbau (Küchlin und Stratmann-Albert 2022)

Eigenschaft	Regelanforderung
Kornzusammensetzung	
Grobe Gesteinskörnung mit $D/d \leq 2$ oder $D \leq 11,2$	Gc85/20
Kornform	$\leq FI_{50}$ oder SI_{55}
Kornrohichte	$\geq 2000 \text{ kg/m}^3$
Max. Wasseraufnahme nach 10 min. bei Gesteinskörnungen $> 2 \text{ mm}$	$\leq 10 \text{ M.-%}$
Feinanteile	
Grobe Gesteinskörnung	$\leq f_4$
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen	
Grobe Gesteinskörnung, natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnung 0/8 und Korngemisch	$\leq 0,1 \text{ M.-%}$
Weitere Eigenschaften	
Frost-Tau-Widerstand	$\leq F_4$
Chloride	$\leq 0,04 \text{ M.-%}$
Säurelösliches Sulfat für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstückschlacken	$AS_{0,8}$
Gesamtschwefel für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstückschlacken	$\leq 1 \text{ M.-%}$

Zusätzlich zu den Regelanforderungen sind laut DIN 4226-101 weitere chemische Parameter festgelegt, die für das Eluat sowie für die im Feststoff gemessenen Werte gelten. In Tabelle 2 werden diese festgelegten Grenzwerte und Parameter zusammengefasst.

Tabelle 2: Chemische Parameter für die Verwendung von Gesteinskörnungen im Beton (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2017)

Eigenschaft	Einheit	Grenzwerte
Eluat		
pH-Wert	[-]	12,5
Elektrische Leitfähigkeit	[μ S/cm]	3.000
Chlorid	[mg/l]	150
Sulfat	[mg/l]	600
Arsen	[μ g/l]	50
Blei	[μ g/l]	100
Cadmium	[μ g/l]	5
Chrom ges.	[μ g/l]	100
Kupfer	[μ g/l]	200
Nickel	[μ g/l]	100
Quecksilber	[μ g/l]	2
Zink	[μ g/l]	400
Phenolindex	[μ g/l]	100
Feststoff		
Mineralöl Kohlenwasserstoffe (C ₁₀ - C ₄₀)	[mg/kg]	1.000
PAK nach EPA	[mg/kg]	25
EOX	[mg/kg]	10
PCB	[mg/kg]	1

Da die Ersatzbaustoffverordnung andere Ziele in den Fokus setzt, kann diese nicht als Maßstab für die Qualität des erzeugten Baustoffs UltraLit verwendet werden, weswegen sich an der DIN EN 12620 orientiert wurde (Lübben und Eckardt 2024). Diese fasst alle Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton zusammen (Lübben und Eckardt 2024).

3 Material und Methoden

In diesem Kapitel werden die im Rahmen dieser Arbeit eingesetzten Materialien sowie die angewandten Methoden zur Betonherstellung und -prüfung beschrieben. Zunächst erfolgt eine Darstellung der verwendeten Gesteinskörnungen sowie weiterer Ausgangsstoffe. Anschließend werden die entwickelten Betonrezepturen und die zugrunde liegenden Versuchsansätze erläutert. Darauf folgt eine Beschreibung der Herstellung der Betonproben im Labor sowie der durchgeführten Prüfverfahren zur Bestimmung der Frisch- und Festbetoneigenschaften. Abschließend werden die angewandten Methoden zur umwelttechnischen Bewertung des eingesetzten Materials aufgeführt.

3.1 Beschreibung der verwendeten Gesteinskörnungen

Das Ausgangsmaterial stammt aus einer Rohschlacke von einer Hausmüllverbrennungsanlage in Hamburg. Die Lagerung dieser Schlacke erfolgte nur kurzzeitig, da die Aufbereitungsanlage einem Prototyp entspricht. Diese berücksichtigt bereits die Aspekte der IRRT-Technologie und wird unter realen Einsatzumgebungen betrieben. Der Standort der Aufbereitungsanlage der H.U.R. Hamburg GmbH befindet sich in Bispingen. Die Rohschlacke wird in Big Bags gelagert und das aufbereitete Material hingegen in Schüttungen. Die aus der Aufbereitung der HMV-Schlacke gewonnene zertifizierte Gesteinskörnung UltraLit lag in den Korngruppen 1/2 mm sowie 2/4 mm und 4/8 mm vor. Je Korngruppe standen 20 kg des Materials zur Verfügung.

Die Kies Gesteinskörnungen wurden von der OAM Baustoff GmbH zur Verfügung gestellt und stammen aus dem Werk Mühlberg der Elbekies GmbH. Für die Herstellung des Betons, im Rahmen des Untersuchungsumfanges dieser Bachelorarbeit, wurden von dem Kies die Korngruppen 2/8 mm und 8/16 mm verwendet.

Der für die Mischung verwendete Sand sowie der Zement wurden von der Dyckerhoff GmbH bereitgestellt. Als Bindemittel kam ein Hochofenzement der Festigkeitsklasse CEM III/A 42,5 N-LH zum Einsatz.

3.2 Betonrezepturen und Versuchsansätze

In diesem Abschnitt werden die entwickelten Betonrezepturen sowie die zugrunde liegenden Versuchsansätze beschrieben. Es wurden verschiedene Mischungsvarianten konzipiert, die sich im Anteil des eingesetzten Ersatzmaterials unterscheiden. Im Folgenden wird zunächst die Auswahl der UltraLit-Gehalte erläutert, bevor anschließend die Referenzmischung beschrieben wird.

3.2.1 Auswahl und Variation der UltraLit-Gehalte

Für die Wahl der UltraLit Variationen wurden Substitutionsgehalte von 20 %, 30 %, 40 % und 50 % ausgewählt. Grundlage hierfür waren sowohl praktische als auch fachliche Überlegungen. Zum einen stand nur eine begrenzte Menge an UltraLit-Material zur Verfügung, wodurch die Anzahl der untersuchten Variationen auf vier begrenzt wurde. Zum anderen sollten die gewählten Substitutionsvariationen eine deutliche Abstufung der Ergebnisse ermöglichen, um Unterschiede in den Frisch- und Festbetoneigenschaften klar erkennen zu können.

Darüber hinaus basierte die Auswahl der Gehaltsstufen auf Erfahrungswerten aus früheren Untersuchungen. Diese zeigten, dass der Einsatz von UltraLit bis zu einem Anteil von etwa 40 %

in der Regel zu günstigen Ergebnissen führte, während höhere Substitutionsraten häufig zu negativen Auswirkungen auf die Festigkeit des Betons führen konnten. Um diese Tendenz zu überprüfen und gleichzeitig den Grenzbereich zu erfassen, wurde zusätzlich ein Versuch mit 50 % UltraLit-Anteil durchgeführt.

3.2.2 Referenzmischung

Die Herstellung einer Referenzmischung ohne Substitution ist sinnvoll, um die grundlegenden Eigenschaften eines Betons mit konventionellen Gesteinskörnungen zu bestimmen. Diese Mischung dient als Vergleich für alle Varianten mit unterschiedlichen Anteilen an UltraLit. Durch die Referenzmischung können Veränderungen in relevanten Parametern eindeutig auf den Einsatz des Substituts zurückgeführt werden. Zudem lässt sich mit einer Referenzmischung sicherstellen, dass die verwendeten Prüfverfahren und Mischparameter zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefern.

3.3 Durchführung Betonherstellung

Die Herstellung der Betonmischungen erfolgte im Rahmen von Laborversuchen. Ziel war es, Betone mit unterschiedlichen Anteilen der aufbereiteten Gesteinskörnung UltraLit herzustellen und hinsichtlich ihrer physikalischen Eigenschaften zu vergleichen. Vor der eigentlichen Betonherstellung wurden verschiedene Vorversuche durchgeführt, um Materialkennwerte zu ermitteln und ein Mischungsverhältnis berechnen zu können.

Die Gesteinskörnungen wurden zunächst mit einem Riffelteiler auf die benötigten Probenmengen reduziert, um repräsentative und homogene Teilproben zu erhalten. Anschließend erfolgte die Bestimmung der Kornrohddichte, hierfür wurden je Korngruppe zwei Teilproben angelegt und gewaschen, um anhaftende Körner zu entfernen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2022). Körner die kleiner 0,063 mm waren wurden verworfen. Die Teilproben umfassten für die Korngruppe mit einem Größtkorn von 16 mm ungefähr 1000 g, für Korngruppen mit einer oberen Korngröße von 8 mm wurden ca. 500 g je Teilprobe entnommen und die kleinsten Korngruppen mit oberen Korngrößen von 4 mm oder kleiner hatten Teilproben mit einer Mindestmasse von 250 g. Nach dem Waschen wurden die Teilproben in einer Wärmekammer bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend zum Auskühlen in einem geschlossenen Raum gelagert. Die Rohddichte wurde mittels Pyknometer-Verfahren bestimmt, hierfür wurde das Pyknometer und der mit Silikonfett bestrichene Trichter gewogen und folgend darauf mit einer Teilprobe befüllt. Nach befüllen des Pyknometers mit Wasser bis zum Halsabschnitt

wurde eingeschlossene Luft durch Anschließen an ein Vakuum entfernt. Danach wurde der Trichter auf das Pyknometer aufgesetzt und erneut mit Wasser bis knapp unterhalb der Markierung des Trichters befüllt. Die Pyknometer werden für eine Stunde in einem Wasserbad bei $22 \pm 3 \text{ }^{\circ}\text{C}$ gelagert und anschließend mit Wasser bis zur Markierung aufgefüllt. Die Außenseiten des Pyknometers wurden abgetrocknet und eine weitere Wägung durchgeführt. (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2022)

Die Rohdichte der Gesteinskörnung ergibt sich dabei aus der folgenden Gleichung:

$$\rho_p = \frac{M_2 - M_1}{V - \frac{(M_3 - M_2)}{\rho_w}} \quad (1)$$

Formel 1: Berechnung der Kornrohichte (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2022)

Hierbei entspricht M_1 der Masse des leeren Pyknometers mit Trichter, M_2 der Masse des Pyknometers gefüllt mit der trockenen Teilprobe und dem Trichter, M_3 der Masse des Pyknometers nach dem Wasserbad und dem Trichter und mit V wird das Volumen des Pyknometers bezeichnet, ρ_w steht für die Dichte von Wasser (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2022). Nach der Bestimmung der Rohdichte können die Teilproben unter Entfernung von überschüssigem Wasser erneut in einer Wärmekammer bis zur Massenkonstanz getrocknet werden, um die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung zu bestimmen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2022).

Zusätzlich wurde die Bestimmung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten an je einer Teilprobe pro Korngruppe der UltraLit Gesteinskörnungen, nach den Vorgaben der DIN 1045-2, durchgeführt. Von den trockenen Teilproben wurden die Massen bestimmt und anschließend für 10 Minuten unter Wasser bei Raumtemperatur gelagert (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2023). Die Proben wurden darauffolgend mit einem schwach feuchtem Baumwolltuch abgetrocknet, bis die Oberflächen der Gesteinskörnungen mattfeucht erschienen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2023).

Die Wasseraufnahme lässt sich dann folgendermaßen berechnen:

$$W = \frac{m_f - m_{g,od}}{m_{g,od}} \cdot 100 \quad (2)$$

Formel 2: Berechnung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2023)

Hierbei entspricht m_f der Masse der Probe nach 10 Minuten in Wasser und $m_{g,od}$ der Trockenmasse (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2023).

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung der eingesetzten Ausgangsstoffe (Sand, Kies und UltraLit) wurden zunächst Teilproben entnommen. Diese Analysen waren erforderlich, um anschließend die einzelnen Korngruppen prozentual so zu kombinieren, dass sich für jeden

Substitutionsanteil eine Ziel-Durchgangssummenkurve ergibt. Die Teilproben wurden vorerst bis zur Massenkonzanz getrocknet und anschließend gewaschen, um Feinteile unter 0,063 mm zu entfernen (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2021). Dazu wurden die Proben in einem Behälter mit Wasser bedeckt und auf ein Schutzsieb gegeben, das auf einem 0,063-mm-Sieb auflag. Ein Gefäß unterhalb des Siebs diente zum Auffangen der durchströmenden Aufschlämmung. Die Proben wurden gewaschen bis das austretende Wasser klar war und danach erneut bis zur Massenkonzanz getrocknet. Nach der Trocknung konnten die Teilproben einem Siebturm mit Auffangschale zugeführt werden. Die Siebe des Siebturms müssen hierbei von oben nach unten so angeordnet werden, dass die Öffnungsweiten abnehmen. Nachdem der Siebturm geschüttelt wurde, wurden die Analysensiebe nacheinander abgenommen und per Hand nachgesiebt. Material, welches beim nachsieben noch durch die Maschen des Siebes hindurchfiel, wurde auf das nächste Sieb des Siebturms überführt. Die Rückstände, welche sich auf den Sieben angesammelt haben, wurden abschließend gewogen. Die auf jedem Sieb verbleibenden Rückstandsmassen werden als prozentuale Anteile der Anfangstrockenmasse berechnet. Anschließend wird der aufsummierte prozentuale Durchgangsanteil der Anfangstrockenmasse durch die jeweiligen Analysensiebe bestimmt (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2021).

Der prozentuale Durchgangsanteil, durch das 0,063 mm Analysensieb, kann durch folgende Gleichung erfolgen:

$$f = \frac{(M_1 - M_2) + P}{M_1} \cdot 100 \quad (3)$$

Formel 3: Berechnung der Feianteile nach der Korngrößenverteilung (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2021)

M_1 entspricht der Masse der Teilprobe zu Beginn, M_2 der Masse des Rückstandes auf dem 0,063-mm-Sieb und P beschreibt die Masse des Materials in der Auffangschale (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2021).

Vor Beginn der Hauptversuche wurden die grundlegenden Materialuntersuchungen durchgeführt, um die Eigenschaften der eingesetzten Gesteinskörnungen zu bestimmen. Dazu zählten die Bestimmung der Rohdichte, der Wasseraufnahme sowie die Analyse der Korngrößenverteilung. Diese Voruntersuchungen dienten dazu, die Zusammensetzung der Mischungen für die späteren Betonmischungen festlegen zu können. Die Zielkorngrößenverteilung der hergestellten Betonmischungen wurde so gewählt, dass sie innerhalb des Grenzbereichs der A/B 16-Kurve nach DIN 1045-2 liegt. Durch Variation der prozentualen Anteile von den Korngrößenverteilungen des Sandes, dem Kies und dem UltraLit wurde die Zusammensetzung schrittweise angepasst, um eine möglichst gleichmäßige Verteilung innerhalb dieses Bereichs zu erreichen.

Die Kurven der Korngrößenverteilungen, sowie der Grenzbereiche der A/B 16 Kurve nach DIN 1045-2 sind dem Anhang A zu entnehmen.

Zur Festlegung der Mischungszusammensetzung wurde eine Stoffraumrechnung durchgeführt. Dabei werden die Volumenanteile der einzelnen Betonausgangsstoffe (Zement, Wasser und Gesteinskörnungen) auf Grundlage ihrer Rohdichten berechnet. Ziel der Stoffraumrechnung ist, die Zusammensetzung des Frischbetonvolumens rechnerisch zu ermitteln. Die Mengenteile der Versuchsrezepturen sind der Tabelle 3 zu entnehmen. Zudem wurden zu den berechneten Anteilen der prozentuale Wassergehalt der Gesteinskörnungen hinzugerechnet, um den tatsächlichen Wasseranteil in der Mischung zu berücksichtigen.

Tabelle 3: Mengenteile der Versuchsrezepturen

Merkmal	Versuchsrezepturen				
Bezeichnung	V0	V20	V30	V40	V50
Stoffraumrechnung Gehalt/Anteil in	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³
CEM III/A 42,5 N-LH	385	385	385	385	385
Sand	655	561	561	561	561
Kies 2/8	559	522	448	280	149
Kies 8/16	635	508	454	490	490
UltraLit 1/2	-	76	34	51	34
UltraLit 2/4	-	78	139	87	156
UltraLit 4/8	-	85	187	340	408
Wasser	193	193	193	193	193

Die Herstellung der Mischungen erfolgte chargenweise in einem Betoneimermischer. Der Mischvorgang wurde unter gleichbleibenden Umgebungsbedingungen durchgeführt, um eine möglichst hohe Vergleichbarkeit zwischen den einzelnen Mischungen sicherzustellen. Die einzelnen Komponenten wurden von grob nach fein in den Mischer gegeben. Zu Beginn wurde lediglich ein Drittel der berechneten Wassermenge zugegeben, um den Wasseraufnahmeprozess der Gesteinskörnungen zu ermöglichen. Dadurch konnte sich das Material zunächst sättigen, bevor der Zement und das restliche Wasser hinzugegeben wurden. Die Mischung wurde kurz durchmischt und für etwa zehn Minuten ruhen gelassen. Danach wurden der Zement und das Restwasser schrittweise zugegeben und die Mischung für rund 15 Minuten gerührt, bis eine homogene Betonmischung vorlag. Je Mischverhältnis wurden 4 Würfel-Probekörper hergestellt, bei der Referenzmischung wurden 5 Probekörper hergestellt aufgrund von überproduzierter Betonmischung.

3.4 Prüfmethoden

Zur Bewertung der hergestellten Betone wurden verschiedene Prüfverfahren angewendet, um sowohl die Frisch- als auch die Festbetoneigenschaften zu bestimmen. Die Auswahl der Prüfmethoden orientierte sich an den einschlägigen Normen und ermöglicht eine vergleichbare Beurteilung der unterschiedlichen Mischungen. Im Folgenden werden zunächst die Verfahren zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften vorgestellt, anschließend die Prüfungen der Festbetoneigenschaften und schließlich die umweltrelevanten Untersuchungen beschrieben.

3.4.1 Frischbetoneigenschaften

In Deutschland wird für die Prüfungen der Frischbetoneigenschaften bevorzugt das Prüfverfahren des Ausbreitmaßes verwendet (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Um diese Prüfung durchführen zu können, ist die Verwendung eines Ausbreittisches unerlässlich (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019c). Dieser besteht aus einem beweglichen Tisch mit einer ebenen Platte, welche eine Metalloberfläche aufweisen muss. Die Platte ist mit Scharnieren an einem starren Rahmen befestigt, auf welchen diese aus einer festgelegten Höhe fallengelassen werden kann. Mittig des Ausbreittisches ist parallel zu den Tischkanten ein Kreuz markiert, sowie ein Kreis mit einem Durchmesser von 210 ± 1 mm. Die Fallhöhe der Platte wird mittels Anschläge auf eine Höhe von 40 ± 1 mm begrenzt. Mit einem Handgriff kann dann die Platte bis zu den Anschlägen angehoben werden und dann fallengelassen werden. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019c)

Abbildung 5 gibt den Aufbau des Ausbreittisches nochmals wieder.

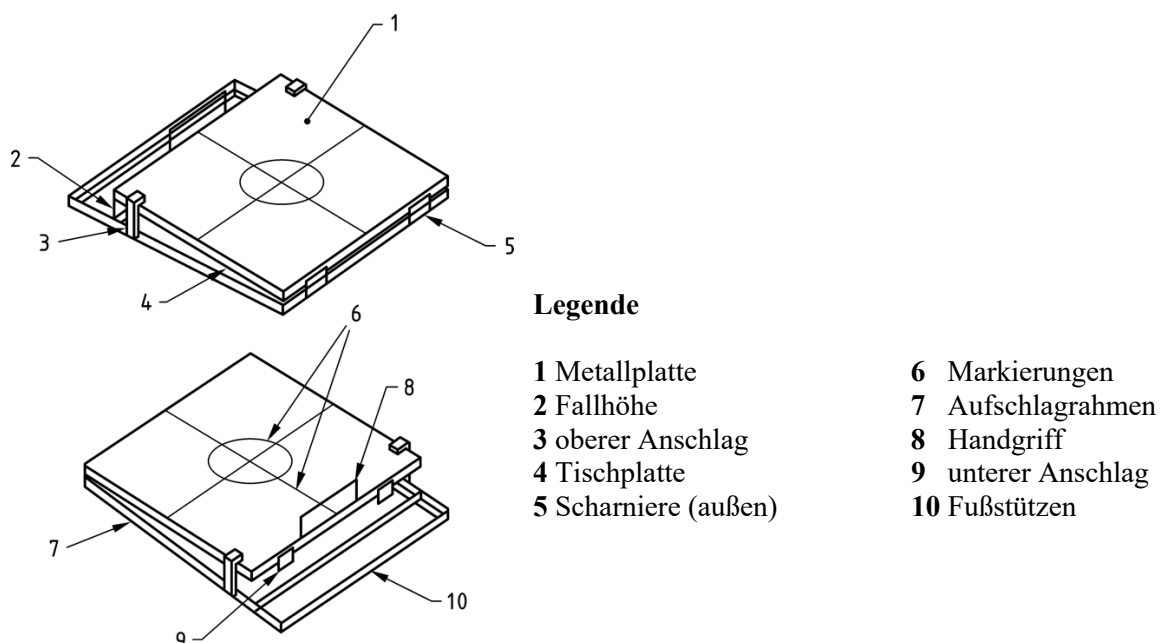


Abbildung 5: Ausbreittisch für die Ausbreitmaß Prüfung (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019c)

Zusätzlich zu dem Ausbreittisch wird zudem ein Hohlkegel sowie ein Stößel aus einem harten Werkstoff mit einem quadratischen Querschnitt benötigt (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019c). Bei der Durchführung des Prüfverfahrens wird vorerst der Ausbreittisch und der Kegel mit einem Tuch angefeuchtet, ohne dabei überschüssige Feuchte zu verursachen. Anschließend wird der Kegel mittig auf der Tischplatte anhand der Kreuzmarkierungen ausgerichtet. Nun wird der Kegel mit der Betonmischung vorerst bis ungefähr zu Hälfte aufgefüllt, diese erste Schicht wird mit dem Stößel durch zehn leichte Stöße ausgeglichen. Danach wird der Kegel mit einem leichten Überstand aufgefüllt und dieser Überstand wird dann, mit dem Stößel oder einer Kelle, bündig mit der Oberkante des Kegels abgestrichen. Die Tischplatte ist nun von überschüssigem Beton zu säubern und der Kegel wird senkrecht angehoben. Innerhalb von 10 Sekunden nach Anheben des Kegels wird der Tisch stabilisiert und die Platte langsam bis zu den Anschlägen angehoben und daraufhin auf den unteren Anschlag fallengelassen. Der Vorgang des Anhebens und Fallenlassens der Platte wird insgesamt 15-mal durchgeführt. Abschließend wird der nun ausgebreitete Beton parallel zu den Kreuzmarkierungen ausgemessen und die beiden Messungen auf 10 mm gerundet. Von den beiden Messergebnissen wird ein Mittelwert gebildet, der dem Ausbreitmaß des Betons entspricht. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019c)

3.4.2 Festbetoneigenschaften

Für die Prüfung der Festbetoneigenschaften wurden Würfel-Körper hergestellt. Vor dem Befüllen der Würfelformen wurden die Innenflächen mit einem Entschalungsmittel bedeckt, um das Anhaften des Betons an der Form zu verhindern (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019a). Unmittelbar nach dem Einbringen des Betons in die Formen wurde dieser auf einem Rütteltisch verdichtet. Hierbei wurde ein übermäßiges Rütteln vermieden, um das Freisetzen von eingeführten Luftporen zu vermeiden. Überstehender Beton wurde mit einer Kelle bündig zum oberen Rand der Form abgestrichen. Die befüllten Formen wurden für 24 Stunden in einem geschlossenen Raum gelagert und mit einer PE-Folie abgedeckt, um ein Austrocknen zu verhindern. Nach den 24 Stunden wurden die Würfel-Körper entformt und für weitere 6 Tage auf Rosten in einem Wasserbad gelagert. Anschließend wurden die Probekörper nach dem Wasserbad für 21 Tage in einem geschlossenen Raum auf Rosten gelagert. (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019a)

Nach dem Herstellen und Lagern der Probekörper wurde die Druckfestigkeit ermittelt (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019b). Hierfür wurden die Würfel-Körper bis zum Bruch in einer Druckprüfmaschine belastet. Es wurde darauf geachtet, dass die Probekörper mittig auf

der unteren Druckplatte auflagen und die Belastungsgeschwindigkeit auf $0,6 \pm 0,2$ MPa/s eingestellt wurde. Nach Aufbringen der Ausgangsbelastung wird diese stoßfrei auf den Probekörper aufgebracht und stetig mit der eingestellten Geschwindigkeit erhöht, bis die Höchstlast erreicht wird. Die Druckfestigkeit ergibt sich dabei aus der Höchstkraft beim Bruch dividiert durch die Fläche des Probenquerschnitts, auf den die Druckbeanspruchung gewirkt wurde (DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019b).

3.4.3 Umweltrelevante Prüfungen

Im Rahmen dieser Arbeit wurden keine eigenständigen umweltrelevanten Untersuchungen der Gesteinskörnung UltraLit durchgeführt. Zur Bewertung der umweltrelevanten Parameter wurde auf bereits vorliegende Prüfergebnisse zurückgegriffen. Die Feststoffgehalte sowie die Eluatkonzentrationen von UltraLit wurden von dem asphalt-Labor durch die Eurofins Umwelt Nord GmbH in Schwentimental untersucht. Die entsprechenden Analyseergebnisse sind im Untersuchungsbefund Nr. 6750 + 7079/23 dokumentiert, welcher als Anhang B dieser Arbeit beigelegt ist.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bilden die Grundlage für die umwelttechnischen Bewertungen und dienen dem Nachweis, dass die eingesetzte Gesteinskörnung die Grenzwerte gemäß DIN 4226-101 Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen einhält.

4 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die im Rahmen der Laborversuche ermittelten Ergebnisse vorgestellt und der Einsatz der Gesteinskörnung UltraLit im Beton diskutiert. Zunächst werden die gemessenen Werte der Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie der umweltrelevanten Parameter dargestellt und beschrieben. Anschließend erfolgt eine Auswertung der Resultate im Hinblick auf die Einflüsse des UltraLit-Gehaltes, die Einhaltung normativer Anforderungen sowie die Beurteilung der Potenziale und Grenzen des Materials.

4.1 Darstellung Versuchsergebnisse

Der Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Ausbreitmaß-Prüfungen zu entnehmen. Angestrebt wurde ein plastischer Konsistenzbereich der Klasse F2 mit den Sollwerten 350 bis 410 mm. Den Prüfergebnissen ist zu entnehmen, dass nahezu alle Betonmischungen den Grenzbereich einhalten. Einzig die Betonmischung der Probekörper 1 und 2 mit dem Substitutionsanteil von 50%

UltraLit unterschreitet diesen Bereich. Jedoch werden steife Betone erst der Konsistenzklasse F1 zugeordnet, wenn diese ein Ausbreitmaß von ≤ 340 mm erfüllen. Das ist hier nicht der Fall, weswegen die Abweichungen unter Anwendung des kaufmännischen Rundens dennoch der Klasse F2 zuzuordnen sind.

Tabelle 4: Prüfergebnisse des Ausbreitmaßes

Versuchsmischung	Ausbreitmaß [mm]	Soll [mm]
V0/1	385	350 - 410
V0/2	370	
V0/3	370	
V0/4	370	
V0/5	370	
V20/1	375	
V20/2	375	
V20/3	395	
V20/4	395	
V30/1	380	
V30/2	380	
V30/3	365	
V30/4	365	
V40/1	355	
V40/2	355	
V40/3	360	
V40/4	360	
V50/1	345	
V50/2	345	
V50/3	365	
V50/4	365	

Die Abbildung 6 zeigt den Verlauf der Ausbreitmaße in Abhängigkeit vom Anteil an UltraLit im Beton. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ausbreitmaße mit zunehmendem UltraLit-Gehalt abnehmen. Dies deutet darauf hin, dass die Verarbeitbarkeit des Betons bei höheren Anteilen von UltraLit tendenziell reduziert ist, was möglicherweise auf die höhere Wasserbindungskapazität der HMV-Schlacke zurückzuführen ist.

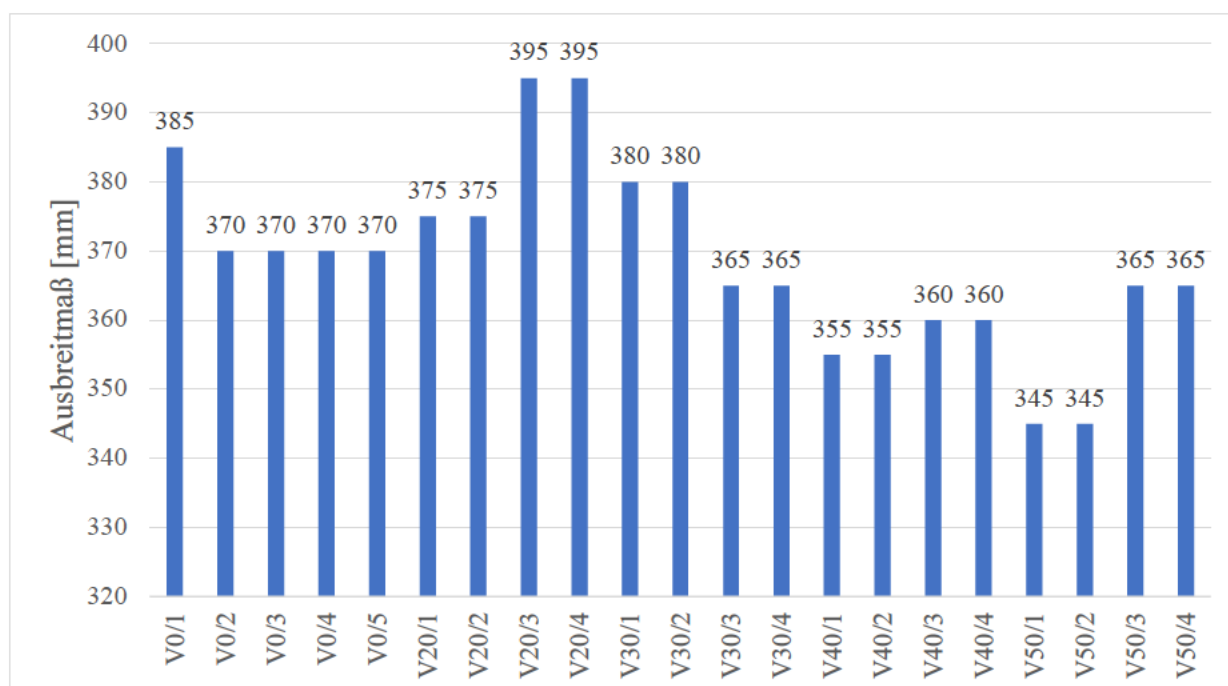


Abbildung 6: Verlauf der Ausbreitmaße mit steigenden UltraLit-Anteilen

Für einen ersten Eindruck der Druckfestigkeiten der hergestellten Betonmischungen wurde bereits nach 7 Tagen eine Druckfestigkeitsprüfung durchgeführt. Hierfür wurden jeweils die Probekörper 1 der Mischungen verwendet. Für die Mischung ohne Substitution wurden die ersten beiden Probekörper geprüft.

Anzumerken ist, dass die Probekörper der V0 Mischungen nach der Lagerung in Wasser eine zusätzliche Trockenlagerzeit hatten. Angaben zur Probekörperherstellung sowie zu den Ergebnissen der Druckfestigkeitsprüfungen nach 7 Tagen Aushärtungszeit sind den Tabellen 5 und 6 zu entnehmen.

Tabelle 5: Angaben zur Probekörperherstellung nach 7 Tagen

Angaben zur Probekörperherstellung nach DIN EN 12390-2							
Probekörper		V0/1	V0/2	V20/1	V30/1	V40/1	V50/1
Herstelldatum		28.08.25		01.09.25		03.09.25	
Verdichtungsart		Vibrationsrütteltisch					
Nennmaße der Form		150 x 150 x 150					
Die Probekörper wurden bis zum Prüfzeitpunkt unter Wasser gelagert.							

Tabelle 6: Prüfergebnisse der Druckfestigkeit nach 7 Tagen

Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3							
Probekörper		V0/1	V0/2	V20/1	V30/1	V40/1	V50/1
Prüfdatum		09.09.25				10.09.25	
Prüfalter	[d]	12		8		7	
Verfahren des Abgleichens		nicht erforderlich					
Probekörpermaße							
x _m	[mm]	150	150	150	150	150	150
y _m	[mm]	150	150	150	150	150	150
z _m	[mm]	150	151	152	151	153	152
Rohdichte	[kg/m ³]	2350	2350	2270	2230	2260	2200
Bruchlast	[kN]	837	911	704	592	609	571
Druckfestigkeit							
f _{c,cube}	[MPa]	34,2	37,0	30,9	26,1	26,6	25,0

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen nach 28 Tagen sind den Tabellen 7 und 8 zu entnehmen. Aufgrund der Trockenlagerzeit wurden die geprüften Festigkeiten der Probekörper, auf die Referenz-Wasserlagerung mit einem Faktor von 0,92 für Normalbeton umgerechnet (Küchlin und Stratmann-Albert 2022). Mit $f_{c,dry}$ wird die Druckfestigkeit nach Trockenlagerung bezeichnet und mit $f_{c,cube}$ die auf die Wasserlagerung umgerechnete Druckfestigkeit.

Angestrebt wurde ein Normalbeton der Druckfestigkeitsklasse C30/37, für welchen eine Mindestdruckfestigkeit für Würfel von 37 MPa vorgeschrieben ist (DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2023). Zu erkennen ist, dass die Druckfestigkeit mit steigendem Substitutionsanteil abnimmt. Der Mittelwert f_{cm} der 20% Substitutionsmischungen lässt sich der gewünschten Klasse zuordnen. Die Druckfestigkeiten von der Referenzmischung sind vergleichbar zu der festeren Druckfestigkeitsklasse C35/45, wohingegen die Mischung mit einer Substitution von 30%, 40% und 50% der weicheren Klasse von C25/30 entspricht.

Tabelle 7: Prüfergebnisse der Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Angaben zur Probekörperherstellung nach DIN EN 12390-2										
Probekörper		V0/3	V0/4	V0/5	V20/2	V20/3	V20/4	V30/2	V30/3	V30/4
Herstell- datum		28.08.25			01.09.25				03.09.25	
Verdich- tungsart		Vibrationsrütteltisch								
Nennmaße der Form		150 x 150 x 150								
Die Probekörper wurden nach der Herstellung entsprechend zur DIN EN 12390-2 gelagert.										
Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3										
Prüfdatum		25.09.25			29.09.25				01.10.25	
Prüfalter	[d]	28								
Verfahren des Abglei- chens		nicht erforderlich								
Probekörpermaße										
x _m	[mm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150
y _m	[mm]	150	150	150	150	150	150	150	150	150
z _m	[mm]	151	151	152	151	151	152	151	152	151
Rohdichte	[kg/m³]	2330	2330	2320	2240	2210	2230	2190	2180	2180
Bruchlast	[kN]	1160	1191	1197	944	894	924	851	871	868
Druckfestigkeit										
f _{c,dry}	[MPa]	51,2	52,6	52,5	41,7	39,5	40,6	37,6	38,2	38,1
Faktor (nach DIN 1045-2)	[-]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
f _{c,cube}	[MPa]	47,1	48,4	48,3	38,4	36,3	37,4	34,6	35,1	35,1
f _{cm}	[MPa]	47,9			37,4			34,9		

Tabelle 8: Fortführung der Prüfergebnisse der Druckfestigkeit nach 28 Tagen

Angaben zur Probekörperherstellung nach DIN EN 12390-2							
Probekörper		V40/2	V40/3	V40/4	V50/2	V50/3	V50/4
Herstellda- tum		03.09.25					
Verdich- tungsart		Vibrationsrütteltisch					
Nennmaße der Form		150 x 150 x 150					
Die Probekörper wurden nach der Herstellung entsprechend zur DIN EN 12390-2 gelagert.							
Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3							
Prüfdatum		01.10.25					
Prüfalter	[d]	28					
Verfahren des Abglei- chens		nicht erforderlich					
Probekörpermaße							
x _m	[mm]	150	150	150	150	150	150
y _m	[mm]	150	150	150	150	150	150
z _m	[mm]	153	153	153	153	152	151
Rohdichte	[kg/m³]	2220	2160	2170	2170	2160	2180
Bruchlast	[kN]	963	856	818	835	875	802
Druckfestigkeit							
f _{c,dry}	[MPa]	42,3	37,6	35,9	36,6	38,4	35,2
Faktor (nach DIN 1045-2)	[-]	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92	0,92
f _{c,cube}	[MPa]	38,9	34,6	33,0	33,7	35,3	32,4
f _{cm}	[MPa]	35,5			33,8		

Die Abbildung 7 zeigt die Entwicklung der Druckfestigkeit nach 28 Tagen in Abhängigkeit vom UltraLit-Anteil im Beton. Erkennbar ist, dass die Druckfestigkeit mit zunehmendem Anteil an Ultra-Lit abnimmt. Dies lässt darauf schließen, dass höhere Mengen an H MV-Schlacke die Festigkeit des Betons negativ beeinflussen können.

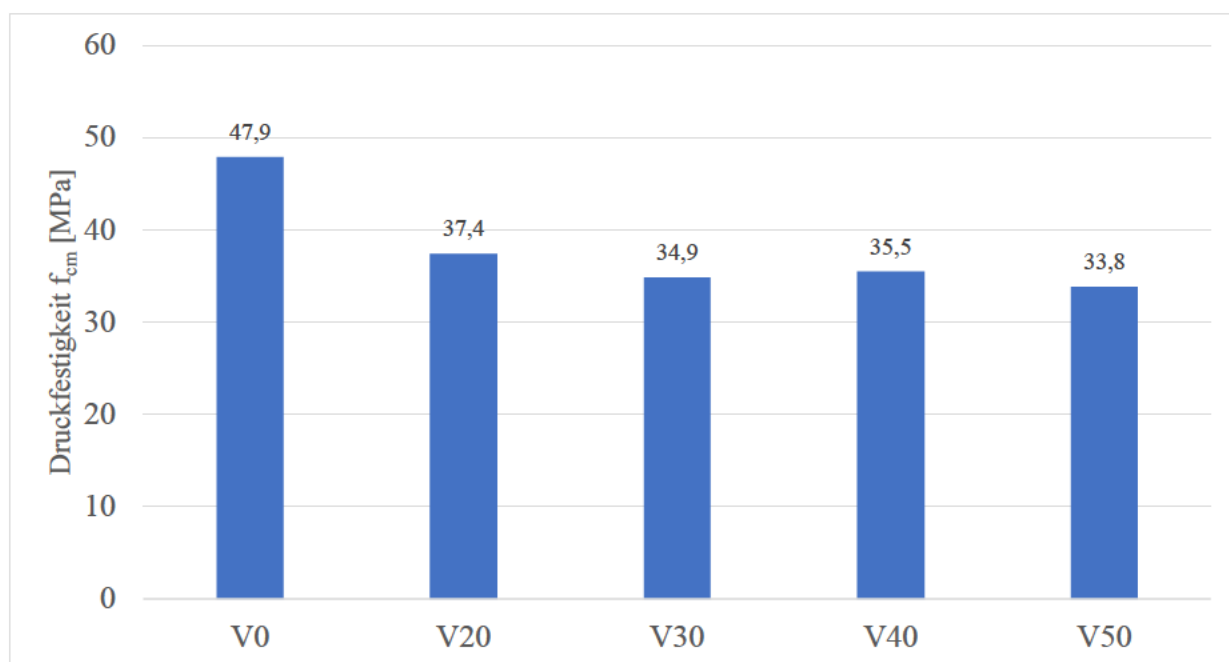


Abbildung 7: Verlauf der Druckfestigkeiten mit steigenden UltraLit-Anteilen

Die Prüfungen bezüglich der Regelanforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN 1045-2 wurden bereits von dem asphalt-labor, innerhalb des Untersuchungsbefunds Nr. 6750 + 7079/23, durchgeführt. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse ist der nachfolgenden Tabelle 9 zu entnehmen. Die Prüfergebnisse zeigen, dass die untersuchten Korngruppen 1/4 und 4/11,2 der Gesteinskörnung UltraLit alle der in der DIN 1045-2 aufgeführten Anforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen erfüllen.

Tabelle 9: Prüfergebnisse zu den Regelanforderungen nach DIN 1045-2 (Lobach 2023)

Eigenschaft	Regelanforderung	UltraLit Körnung 1/4	UltraLit Körnung 4/11,2
Kornzusammensetzung			
Grobe Gesteinskörnung mit $D/d \leq 2$ oder $D \leq 11,2$	Gc85/20	Gc85/20	Gc85/20
Kornform	$\leq FI_{50}$ oder SI_{55}	-	FI_{15} / SI_{15}
Kornrohichte	$\geq 2000 \text{ kg/m}^3$	2470 kg/m^3	2330 kg/m^3
Wasseraufnahme	$\leq 10 \text{ M.-%}$	$3,9 \text{ M.-%}$	$6,6 \text{ M.-%}$
Feinanteile			
Grobe Gesteinskörnung	$\leq f_4$	$f_{1,5}$	$f_{1,5}$
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen			
Grobe Gesteinskörnung, natürlich zusammengesetzte Gesteinskörnung 0/8 und Korngemisch	$\leq 0,1 \text{ M.-%}$	$< 0,01 \text{ M.-%}$	$< 0,01 \text{ M.-%}$

Eigenschaft	Regelanforderung	UltraLit Körnung 1/4	UltraLit Körnung 4/11,2
Weitere Eigenschaften			
Frost-Tau-Widerstand	≤ F ₄	-	F ₂
Chloride	≤ 0,04 M.-%	0,0083 M.-%	0,016 M.-%
Säurelösliches Sulfat für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstückschlacken	AS _{0,8}	AS _{0,8}	AS _{0,8}
Gesamtschwefel für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstückschlacken	≤ 1 M.-%	0,303 M.-%	0,468 M.-%

4.1.1 Umweltrelevante Parameter

Wie zuvor erwähnt, wurden die Untersuchungen bezüglich der umweltrelevanten Parameter nach den Anforderungen der DIN 4226-101, bereits von dem asphalt-labor durch die Eurofins Umwelt Nord GmbH in Schwentinental getätigt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind der Tabelle 10 zu entnehmen. Auch hier wurden die Korngruppen 1/4 und 4/11,2 der Gesteinskörnung UltraLit untersucht. Die Ergebnisse zeigen, dass die Grenzwerte bei allen Parametern eingehalten werden. Bei den Ergebnissen bezüglich der polycyclischen aromatischen Kohlenwasserstoffe nach der Liste der US-Environmental Protection Agency, sowie den Polychlorierten Biphenylen konnten die Nachweisgrenzen innerhalb der Untersuchungen nicht erreicht werden. Demnach wurden diese Parameter als nicht bestimmbar eingestuft, da der in den Gesteinskörnungen enthaltene Anteil zu gering war.

Tabelle 10: Prüfergebnisse der chemischen Parameter nach DIN 4226-101 (Lobach 2023)

Eigenschaft	Einheit	Grenzwerte	UltraLit Körnung 1/4	UltraLit Körnung 4/11,2
Eluat				
pH-Wert	[-]	12,5	10,8	10,9
Elektrische Leitfähigkeit	[μS/cm]	3.000	499	391
Chlorid	[mg/l]	150	16	26
Sulfat	[mg/l]	600	140	95
Arsen	[μg/l]	50	2	2
Blei	[μg/l]	100	< 1	24
Cadmium	[μg/l]	5	< 0,3	< 0,3
Chrom ges.	[μg/l]	100	34	5
Kupfer	[μg/l]	200	5	6
Nickel	[μg/l]	100	< 1	< 1
Quecksilber	[μg/l]	2	< 0,2	< 0,2
Zink	[μg/l]	400	< 10	< 10
Phenolindex	[μg/l]	100	< 10	< 10

Eigenschaft	Einheit	Grenzwerte	UltraLit Körnung 1/4	UltraLit Körnung 4/11,2
Feststoff				
Mineralöl Kohlenwasserstoffe (C ₁₀ – C ₄₀)	[mg/kg]	1.000	< 40	< 40
PAK nach EPA	[mg/kg]	25	n.b.	n.b.
EOX	[mg/kg]	10	< 1,0	< 1,0
PCB	[mg/kg]	1	n.b.	n.b.

4.2 Einfluss des UltraLit-Gehaltes auf die Betoneigenschaften

Ein Anstieg des UltraLit-Gehalts führte zu einer leichten Abnahme der Druckfestigkeit. Während die Referenzmischung nach 28 Tagen eine Festigkeit von 48 MPa erreichte, lag der Wert bei der Mischung mit 50 % UltraLit bei rund 34 MPa. Unter Anwendung des kaufmännischen Rundens kann jedoch gesagt werden, dass bis zu einem Anteil von 40 % die Druckfestigkeit im Bereich der Anforderungen an Normalbeton der Festigkeitsklasse C30/37 liegt. Die Ergebnisse der Untersuchungen der Betoneigenschaften zeigen, dass die Erfahrungswerte aus früheren Untersuchungen bestätigt werden konnten. Der Grenzbereich, ab welchem die Druckfestigkeit abnimmt, konnte mit der Substitutionsmischung von 50% widerspiegelt werden.

4.3 Bewertung im Hinblick auf Normkonformität

Die im Rahmen dieser Arbeit erzielten Prüfergebnisse wurden im Hinblick auf die Anforderungen der DIN 1045-2, sowie der DIN 4226-101 bewertet. Dabei zeigte sich, dass die Betonmischungen mit Anteilen bis zu 40 % UltraLit die geforderten Regelanforderungen weitgehend erfüllen. Insbesondere hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften und der Druckfestigkeiten nach 28 Tagen konnten keine signifikanten Abweichungen von den angestrebten Anforderungen aufgewiesen werden. Bei höheren Substitutionsanteilen, wie den hier untersuchten 50%, traten hingegen erste Abweichungen von den Sollwerten auf. Dennoch zeigen die Ergebnisse, dass UltraLit, als rezyklierte Gesteinskörnung, in den untersuchten Korngruppen grundsätzlich den Anforderungen für den Einsatz im Beton gemäß DIN 1045-2 bzw. DIN 4226-101 entsprechen. Damit kann festgestellt werden, dass UltraLit bis zu einem Substitutionsanteil von 40%, bezüglich der in dieser Arbeit aufgestellten Anforderungen, normkonform eingesetzt werden kann.

4.4 Potenziale und Grenzen des Einsatzes von UltraLit

Die Versuchsergebnisse verdeutlichen, dass UltraLit ein hohes Potenzial als nachhaltige Alternative zu Primärgesteinskörnungen aufweist. Das nach EU-Taxonomie-Verordnung Artikel 13 als Green Technology ausgezeichnete IRRT-Verfahren trägt somit dazu bei, dass mit dem Einsatz der aufbereiteten Gesteinskörnung UltraLit natürliche Ressourcen geschont und CO₂-Emissionen reduziert werden können (Lübben und Eckardt 2024). Es trägt somit zu einer verbesserten Umweltbilanz des Betons bei (Lübben und Eckardt 2024).

Die Grenzen des Einsatzes ergeben sich hauptsächlich aus der sinkenden Druckfestigkeit mit steigendem Substitutionsanteil. Zusätzlich zu den aufgezeigten Grenzen bezüglich der Betoneigenschaften gibt es weiterhin Hindernisse aufgrund fehlender Rechtsvorschriften (Lübben und Eckardt 2024). Vorhandene Regelwerke sind entweder nicht für HMV-Schlacken vorgesehen oder nur auf anderweitige Verwendungen dieser ausgelegt, so wie beispielsweise die Ersatzbaustoffverordnung (Lübben und Eckardt 2024).

Insgesamt zeigt sich, dass der Einsatz von UltraLit in der Betonherstellung ein vielversprechender Ansatz für ressourcenschonendes Bauen ist.

5 Schlussfolgerung und Ausblick

In diesem Kapitel werden die zentralen Ergebnisse der Untersuchungen zusammengefasst und im Hinblick auf ihre Bedeutung für den praktischen Einsatz der Gesteinskörnung UltraLit im Beton bewertet. Darüber hinaus werden Empfehlungen für die Anwendung in der Praxis sowie Ansätze für weiterführende Forschungsarbeiten vorgestellt. Ziel ist es, die gewonnenen Erkenntnisse in einen fachlichen und anwendungsorientierten Zusammenhang einzuordnen und mögliche Entwicklungspotenziale aufzuzeigen.

5.1 Zusammenfassung Ergebnisse

Im Rahmen dieser Arbeit konnte gezeigt werden, dass UltraLit, eine aus HMV-Schlacke gewonnene Gesteinskörnung, für den Einsatz im Beton grundsätzlich geeignet ist. Die Untersuchungen ergaben, dass Betonmischungen mit einem UltraLit-Anteil bis 40 % die Anforderungen an das Ausbreitmaß als auch die Druckfestigkeiten erfüllen.

Ab einem Substitutionsanteil von 50 % zeigte sich jedoch ein Rückgang der Festigkeit und eine geringfügige Abnahme der Verarbeitbarkeit. Ersichtlich war dies durch die geringer werdenden Ausbreitmaße. Die Prüfungen der Umweltrelevanz bestätigten zudem, dass die Gesteinskörnung UltraLit die Grenzwerte gemäß DIN 4226-101 einhält und somit keine Bedenken

hinsichtlich der Schadstofffreisetzung bestehen. Auch die Regelanforderungen bezüglich Gesteinskörnungen für Beton nach DIN 1045-2 in Verbindung mit DIN EN 12620 wurden erfüllt, weshalb UltraLit als zertifizierte Gesteinskörnung im Beton eingesetzt werden kann.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass UltraLit ein technisch und ökologisch wertvoller Zuschlagstoff ist, der zur Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft im Bauwesen beitragen kann.

5.2 Empfehlungen für die Praxis

Laut Leitfaden zum Einsatz von Recycling-Beton ist es Betonherstellern erlaubt, bis zu 45% der Gesteinskörnungen durch Recyclingmaterialien zu ersetzen (Lübben und Eckardt 2024). Hierfür muss die Erfüllung der Anforderungen nach DIN EN 12620, DIN 4226-101 und der DIN 4226-102 vorausgesetzt sein (Lübben und Eckardt 2024). Die Erfüllung dieser Anforderungen trifft bei UltraLit zu (Lübben und Eckardt 2024). Zudem zeigten die Ergebnisse, dass Substitutionen bis 40% ohne nachteilige Auswirkungen der Betoneigenschaften eingesetzt werden können.

Niedrige Preise für Primärrohstoffe erschweren den Absatz von Sekundärbaustoffen (Knappe u. a. 2012). Betreiber von Kies- und Sandgruben erzielen zudem nicht nur Einnahmen durch den Verkauf von Primärmaterialien, sondern auch durch das Verfüllen der Gruben. Dadurch werden die Preise für Primärrohstoffe indirekt weiter gesenkt, während die Kosten für Qualitätssicherungsmaßnahmen gering bleiben. Insgesamt führt dies zu einer nachteiligen Marktsituation für Sekundärbaustoffe. Außerdem führt dies dazu, dass bei öffentlichen Ausschreibungen für Bauarbeiten bevorzugt Primärbaustoffe ausgeschrieben werden. Fehlende Akzeptanz von Sekundärbaustoffen wird zusätzlich dadurch begründet, dass Recyclingbaustoffe immer Kontrollen unterliegen, welche teilweise für Primärgestein nicht gelten. So wird eine Vermarktung dadurch erschwert, dass ein gewisses Image in Bezug auf Schadstoffe und Recyclingmaterialien besteht. Schlechte Erfahrungen von Bauherren bei vorherigen Anwendungen von Sekundärmaterialien bestimmen teilweise jahrzehntelang die Einstellung gegenüber Recyclingmaterialien. Für eine Steigerung der Akzeptanz ist es unverzichtbar, eine Gleichbehandlung von Baustoffen aus Primär- und Sekundärmaterialien zu gewährleisten. (Knappe u. a. 2012)

Aufgrund der guten Umweltverträglichkeit und der teilweise lokalen Rohstoffverknappung stellt UltraLit eine nachhaltige Ergänzung zu herkömmlichen Zuschlägen dar.

5.3 Weiterführende Fragestellungen und Forschungsbedarf

Die im Rahmen dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse bilden eine Grundlage für zukünftige Untersuchungen, verdeutlichen jedoch auch den noch bestehenden Forschungsbedarf.

Insbesondere sollten weiterführende Untersuchungen zu den Wechselwirkungen zwischen Zusatzstoffen und Zusatzmitteln in Kombination mit Beimischungen von UltraLit durchgeführt werden. Da in der Praxis nahezu jeder Beton unter Verwendung solcher Mittel hergestellt wird, um unter anderem die Verarbeitbarkeit zu verbessern, ist es entscheidend, deren Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften genauer zu analysieren. Hierzu zählen insbesondere Untersuchungen zur Verarbeitbarkeit, also zur Konsistenz und zur Druckfestigkeit.

Zudem bestehen bereits Forschungs- und Entwicklungsarbeiten bezüglich der Verwendung der Feinfraktion als Bindemittelzusatz im Beton (Lübben und Eckardt 2024). Erste Ergebnisse zeigten hierbei bereits, dass die Druckfestigkeit in Prismen-Versuchen um mehr als 30% gesteigert werden konnte (Lübben und Eckardt 2024). Mit dem Einsatz der Feinfraktion könnten weitere 12% der Frischschlacke als Bindemittel unter dem Namen SubCEM verwertet werden (Lübben und Eckardt 2024).

Auch das Prozesswasser von dem IRRT-Verfahren wird derzeit noch mit Filterstaub, dem Feinkorn, sowie Schlämmen aus der Reinigung deponiert (Lübben und Eckardt 2024). Denkbar wären auch hier Untersuchungen bezüglich der Schadstoffgehalte in dem Prozesswasser und dem möglichen Einsatz als Zugabewasser für Beton. Dies könnte dazu beitragen, die Ressourceneffizienz des gesamten Prozesses zu erhöhen.

Sinnvoll könnte zudem sein, für den Einsatz des UltraLits eine vergleichende Ökobilanz des Betons durchzuführen, um eine vollständige Nachhaltigkeitsbilanz zu erstellen. Zudem sollte die Übertragbarkeit der Laborergebnisse auf reale Bauanwendungen bewertet werden.

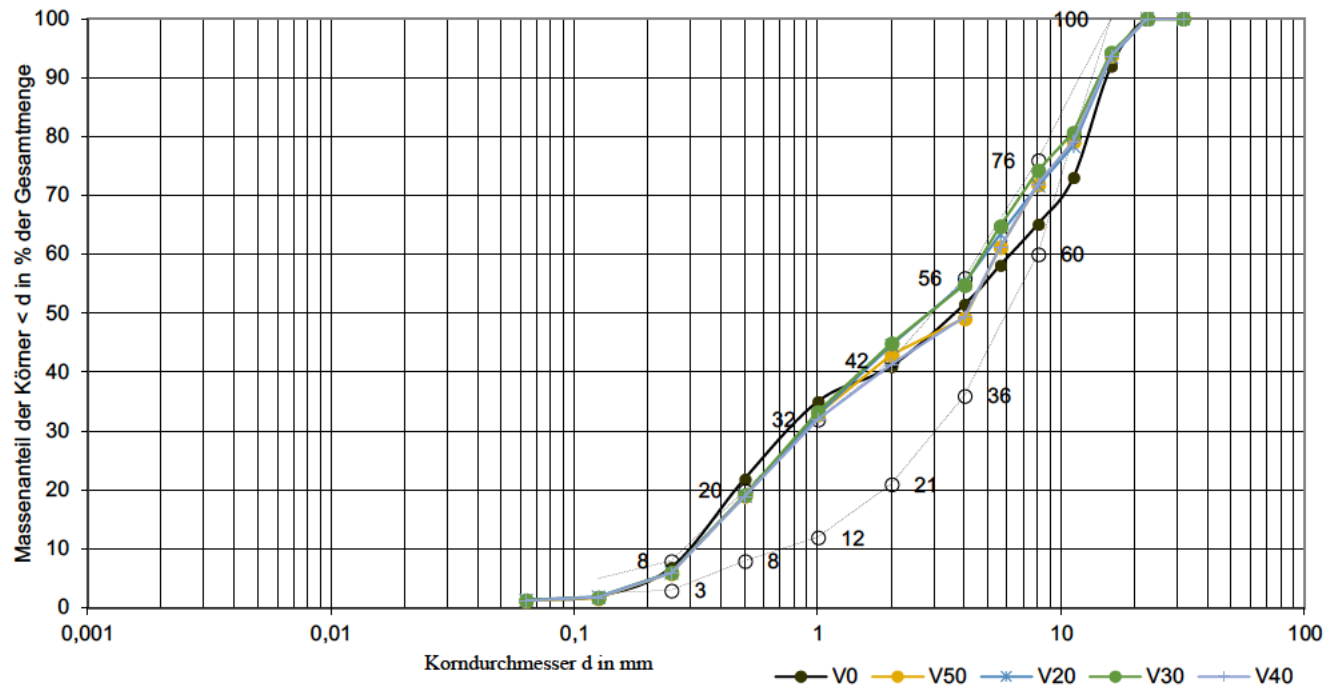
Untersuchungen bezüglich der wirtschaftlichen Aspekte, wie etwa die Kosteneffizienz und die Marktakzeptanz von UltraLit im Vergleich zu Primärrohstoffen sind ebenfalls von Bedeutung. Eine enge Zusammenarbeit zwischen Forschung, Industrie und Normungseinrichtungen könnte dazu beitragen, die Akzeptanz und Marktfähigkeit solcher alternativen Baustoffe zu erhöhen.

Literaturverzeichnis

- Alwast, Holger, und Axel Riemann. 2010. *Verbesserung der umweltrelevanten Qualitäten von Schlacken aus Abfallverbrennungsanlagen*. Oktober. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4025.pdf>.
- Bundesministerium für Justiz und Verbraucherschutz. 2021. „ErsatzbaustoffV - Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke“. Juli 9. <https://www.gesetze-im-internet.de/ersatzbaustoffv/BJNR259810021.html>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2017. *Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN_EN_12620_ - Teil_101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen*. DIN 4226-101. Version DIN 4226-101:2017-08. DIN Media GmbH, August. <https://doi.org/10.31030/2664038>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2021. *Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 1: Bestimmung der Korngrößenverteilung – Siebverfahren*. DIN EN 933-1. Version 933-1:2021. Juli. <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE30090342>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2022. *Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme*. DIN EN 1097-6. Version 1097-6:2022. Mai. <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE30091797>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e. V. 2023. *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton*. DIN 1045-2. August. <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE30098771>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019a. *Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*. DIN EN 12390-2. Version DIN EN 12390-2 (2019-10). Oktober. <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE30080969>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019b. *Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern*. DIN EN 12390-3. Version DIN EN 12390-3 (2019-10). Oktober. <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE30080970>.
- DIN Deutsches Institut für Normung e.V. 2019c. *Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß*. DIN EN 12350-5. Version DIN EN 12350-5 (2019-09). September. <https://www.nautos.de/W7I/search/item-detail/DE30080965>.
- Europäisches Parlament. 2023. „Kreislaufwirtschaft: Definition und Vorteile“. Themen | Europäisches Parlament, Juni 1. <https://www.europarl.europa.eu/topics/de/article/20151201STO05603/kreislaufwirtschaft-definition-und-vorteile>.
- ITAD e.V. 2025a. „Unsere Mitgliedsanlagen“. ITAD e.V. <https://www.itad.de/ueber-uns/anlagen>.

- ITAD e.V. 2025b. „Wie funktioniert die Thermische Abfallbehandlung?“
<https://www.itad.de/wissen/artikel-3>.
- ITAD e.V., und IGAM. 2024. *Umfrage Aufbereitung von Hausmüllverbrennungsasche*. August.
<https://www.itad.de/wissen/faktenblaetter/faktenblatt-umfrage-hmva-itad-igam-2022.pdf>.
- Knappe, Florian, Günter Dehoust, Ulrich Petschow, und Gerhard Jakubowski. 2012. *Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente*. Juli. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4305.pdf>.
- Küchlin, Dagmar, und Regina Stratmann-Albert. 2022. *Betonntechische Daten*. Heidelberg Materials. <https://www.betontechnische-daten.de/de>.
- Lobach. 2023. *Untersuchung von Betonzuschlag nach DIN EN 12620:2002+A1:2008 „Gesteinskörnung für Beton“*. Untersuchungsbefund Untersuchungsbefund Nr. 6750+7079/23. Asphalt-labor Arno J. Hinrichsen GmbH & Co.
- Lübben, Stefan, und Jörg Eckardt. 2024. „IRRT: Innovatives Recycling macht MV-Schlacke zur Goldgrube“. *MÜLL und ABFALL*, Nr. 4 (April). <https://doi.org/10.37307/j.1863-9763.2024.04.08>. Auch im Anhang C zu finden
- Stadtreinigung Hamburg. 2025. „Müllverwertung“. Stadtreinigung Hamburg.
<https://www.stadtreinigung.hamburg/entsorgung-recycling/muellverwertung/>.
- UBA. 2016. „Thermische Behandlung“. Umweltbundesamt, April 20. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/entsorgung/thermische-behandlung>.
- UBA. 2018a. „Mineralische Ersatzbaustoffe können Primärrohstoffe ersetzen“. Umweltbundesamt, Mai 7. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/mineralische-ersatzbaustoffe-koennen>.
- UBA. 2018b. „Rechtliche Regelungen für Bauprodukte“. Umweltbundesamt, Juli 16.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/wirtschaft-konsum/produkte/bauprodukte/rechtliche-regelungen-fuer-bauprodukte>.
- UBA. 2022. „Abfallrecht“. Umweltbundesamt, Mai 23. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfallwirtschaft/abfallrecht>.
- UBA. 2023. „Abfall- und Kreislaufwirtschaft“. Umweltbundesamt, Juni 22. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/abfall-kreislaufwirtschaft>.

Anhang A



Anhang B

Untersuchungsbefund Nr. 6750+7079/23

vom: 20.12.2023/Lo/gie

asphalt-labor

Arno J. Hinrichsen GmbH & Co.KG

Anerkannte Prüfstelle gemäß „RAP Stra“ für alle
Arten von Baustoffprüfungen an Baustoffen und
Baustoffgemischen im Straßenbau.

Auftraggeber: H. U. R. Hamburg GmbH
Ballindamm 3
20095 Hamburg

Betrifft: **Untersuchung von Betonzuschlag**
nach DIN EN 12620:2002+A1:2008
„Gesteinskörnungen für Beton“

Werk: Bispingen

Materialart: HMV-Asche (aufbereitet)

Lieferkörnung: 1/4 und 4/11,2

Probenahme: am 28.09.2023 gemäß DIN EN 932-1 durch Herrn Lobach,
asphalt-labor

Entnahmestelle: Halde

Anforderungen: DIN 1045-2, Anhang U; DIN EN 12620; DIN 4226-101;
MVV TB, Ausgabe 2020/1; DAfStB-Richtlinie
„Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten
Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“

Der Untersuchungsbefund umfasst 8 Seiten.

Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
Dipl.-Ing. Lühje
Dipl.-Ing. Heinrichs
Dipl.-Ing. Lobach

Dr.-Hermann-Lindrath-Straße 1
D-23812 Wahlstedt
Telefon (0 45 54) 99 200
Telefax (0 45 54) 99 20 30

Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
Geschäftsführer:
Ulrich Lühje, Thomas Lobach

bup Mitglied im Bundesverband
unabhängiger Institute für
bautechnische Prüfungen e.V.

1. Untersuchungen nach DIN EN 12620**1.1 Korngrößenverteilung**

Prüfverfahren: DIN EN 933-1:2012 (waschen und Siebung)

Sieb- weite [mm]	Durchgang in M.-%					
	1/4		4/11,2			
	Ist	Soll	Ist	Soll	Ist	Soll
0,063	0,3		0,4			
0,125						
0,25						
0,50	1	0-5				
1,0	14	0-20				
2,0	76		1	0-5		
2,8	93		1			
4,0	100	85-99*	16	0-20		
5,6	100	98-100	49			
8,0	100	100	78			
11,2			99	85-99		
16,0			100	98-100		
22,4			100	100		
Kategorie	Gc85/20		Gc85/20			

*) Nach DIN EN 12620 darf der Durchgang durch D größer 99% sein, wenn der Hersteller die typische Korngrößenverteilung aufzeichnet und angibt.

1.2 Feinanteile

Prüfverfahren: DIN EN 933-1:2012 (waschen und Siebung)

Lieferkörnungen	mm	1/4	4/11,2	
Anteile an abschl. Bestandteilen	M.-%	0,3	0,4	
Kategorie		f _{1,5}	f _{1,5}	

Seite 3

zum Untersuchungsbefund Nr. 6750+7079/23

vom 20.12.2023

asphalt-labor

Arno J. Hinrichsen GmbH & Co. KG

Anerkannte Prüfstelle gemäß „RAP Stra“ für alle
Arten von Baustoffprüfungen an Baustoffen und
Baustoffgemischen im Straßenbau.

1.3 Kornform

Prüfverfahren: DIN EN 933-4:2015

Lieferkörnung	mm	4/11,2		
Kornformkennzahl (SI)		6		
Kategorie		SI ₁₅		

1.4 Plattigkeitskennzahl

Prüfverfahren: DIN EN 933-3:2012

Lieferkörnung	mm	4/11,2		
Plattigkeitskennzahl (FI)		6		
Kategorie		FI ₁₅		

1.5 Organische Verunreinigungen

Prüfverfahren: DIN EN 1744-1:2009+A1:2012, Abschnitt 15.1

Lieferkörnung	mm	1/4					
Farbe der Prüflüssigkeit zur Farbbezugslösung		heller					
Kategorie		-					

1.6 Leichtgewichtige organische Verunreinigungen

Prüfverfahren: DIN EN 1744-1:2009+A1:2012, Abschnitt 14.2

Lieferkörnung	mm	1/4	4/11,2	
aufschwimmende Bestandteile	M.-%	< 0,01	< 0,01	
Anforderung		≤ 0,1	≤ 0,1	

1.7 Anteil gebrochener und gerundeter Körner

Prüfverfahren: DIN EN 933-5:2023

-entfällt-

1.8 Muschelschalengehalt

Prüfverfahren: DIN EN 933-7:1998

-entfällt-

Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
Dipl.-Ing. Lütjhe
Dipl.-Ing. Heinrichs
Dipl.-Ing. Lobach
bup Mitglied im Bundesverband
unabhängiger Institute für
bautechnische Prüfungen e.V.

Dr.-Hermann-Lindrath-Straße 1
D-23812 Wahlstedt
Telefon (0 45 54) 99 200
Telefax (0 45 54) 99 20 30

Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
Geschäftsführer:
Ulrich Lütjhe, Thomas Lobach

1.9 Chloridgehalt - Ultralit

Prüfverfahren: DIN EN 1744-1:2009+A1:2012

Lieferkörnungen	mm	1/4	4/11,2	Rohschlacke
Chloridgehalt C	M.-%	0,0083 ^A	0,016 ^A	0,46 ^B
Anforderung (Stahlbeton)		≤ 0,04	≤ 0,04	-
Anforderung (Beton ohne Bewehrung)		≤ 0,15	≤ 0,15	-

^{A)} gemäß Prüfbericht Nr. AR-23-XF-005114-01, Eurofins Umwelt Nord GmbH; Probenahme vom 28.09.2023^{B)} gemäß Prüfbericht Nr. AR-23-XF-005448-01, Eurofins Umwelt Nord GmbH; Probenahme vom 28.09.2023**1.10 Säurelösliche Sulfate - Ultralit**

Prüfverfahren: DIN EN 1744-1:2009+A1:2012, Abschnitt 12

Lieferkörnungen	mm	1/4	4/11,2	Rohschlacke
säurelösliches Sulfat SO ₄	M.-%	0,71 ^A	0,72 ^A	3,7 ^B
Kategorie		AS _{0,8}	AS _{0,8}	-

^{A)} gemäß Prüfbericht Nr. AR-23-XF-005114-01, Eurofins Umwelt Nord GmbH; Probenahme vom 28.09.2023^{B)} gemäß Prüfbericht Nr. AR-23-XF-005448-01, Eurofins Umwelt Nord GmbH; Probenahme vom 28.09.2023**1.11 Gesamtschwefel - Ultralit**

Prüfverfahren: DIN EN 1744-1:2009+A1:2012, Abschnitt 11

Lieferkörnungen	mm	1/4	4/11,2	Rohschlacke
Gesamtschwefel S	M.-%	0,303 ^A	0,468 ^A	1,17 ^B
Anforderung		< 1	< 1	-

^{A)} gemäß Prüfbericht Nr. AR-23-XF-005114-01, Eurofins Umwelt Nord GmbH; Probenahme vom 28.09.2023^{B)} gemäß Prüfbericht Nr. AR-23-XF-005448-01, Eurofins Umwelt Nord GmbH; Probenahme vom 28.09.2023**1.12 Rohdichte und Wasseraufnahme**

Prüfverfahren: DIN EN 1097-6:2022

Lieferkörnungen	mm	1/4	4/11,2	4/11,2
Prüfkörnungen	mm	1/4	4/11,2	4/11,2
Gemäß DIN EN 1097-6		Abschn. 8	Anh. A	Abschn. 8
Trockenrohdichte ρ_p	Mg/m ³	-	2,39	-
Scheinbare Rohdichte ρ_a	Mg/m ³	2,62	-	2,55
Rohdichte auf ofentrockener Basis ρ_{rd}	Mg/m ³	2,37	-	2,18
Rohdichte auf wassergesättigter Basis ρ_{ssd}	Mg/m ³	2,47	-	2,33
Wasseraufnahme WA ₂₄	%	3,9	-	6,6
Kategorie		-	-	-

Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
Dipl.-Ing. Lütjke
Dipl.-Ing. Heinrichs
Dipl.-Ing. Lobach

Dr.-Hermann-Lindrath-Straße 1
D-23812 Wahlstedt
Telefon (0 45 54) 99 200
Telefax (0 45 54) 99 20 30

Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
Geschäftsführer:
Ulrich Lütjke, Thomas Lobach

bup Mitglied im Bundesverband
unabhängiger Institute für
bautechnische Prüfungen e.V.

1.13 Widerstand gegen Frost

Prüfverfahren: DIN EN 1367-1:2007

Lieferkörnung	mm	4/11,2		
Prüfkörnung	mm	4/8		
Absplitterungen nach 10 FTW	Probe 1	M.-%	2,2	
	Probe 2	M.-%	2,2	
	Probe 3	M.-%	2,2	
	i.M.	M.-%	2,2	
Kategorie			F ₂	

1.14 Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung

Prüfverfahren: DIN EN 1367-6:2008

Lieferkörnung	mm	4/11,2		
Prüfkörnungen	mm	4/8		
Absplitterungen nach dem FTW- Versuch M.-%	Probe 1		5,0	
	Probe 2		4,9	
	Probe 3		5,0	
	im Mittel		5,0	
Soll			≤ 8	

1.15 Stoffliche Zusammensetzung

Prüfverfahren: TP Gestein-StB, Teil 3.1.4

Stoffgruppe	Ist [M.-%] 4/11,2	Soll [M.-%]
Asche / Schlacke	44,9	-
Glas / Keramik	39,4	-
Metalle	0,0	≤ 5,0
davon Eisen	0,0	-
Sonstiges	15,6	-
Unverbranntes	0,1	≤ 0,5

Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
Dipl.-Ing. Lütjhe
Dipl.-Ing. Heinrichs
Dipl.-Ing. Lobach

Dr.-Hermann-Lindrath-Straße 1
D-23812 Wahlstedt
Telefon (0 45 54) 99 200
Telefax (0 45 54) 99 20 30

Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
Geschäftsführer:
Ulrich Lütjhe, Thomas Lobach

bup Mitglied im Bundesverband
unabhängiger Institute für
bautechnische Prüfungen e.V.

1.16 Feststoffgehalte und Eluatkonzentrationen

Die Prüfungen erfolgten durch die Eurofins Umwelt Nord GmbH, Schwentinental, Prüfbericht-Nr. AR-23-XF-005448-01 vom 15.12.2023 (Rohschlacke) sowie Nr. AR-23-XF-005114-01 vom 29.11.2023 (Ultralit).

1.16.1 Kennwerte nach DIN 4226-101 - Rohschlacke

Die Obergrenzen für die Eluatkonzentration und die Feststoffgehalte von rezyklierten Gesteinskörnungen sind den „Anforderungen an bauliche Anlagen ABuG“ der „Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen“, MVV TB, Ausgabe 2020/1, Anlage 10, entnommen. Diese Grenzwerte entsprechen im Wesentlichen den Vorgaben der DIN 4226-101. Lediglich der in der DIN 4226-101 angegebene Kennwert EOX ist in der MVV TB nicht enthalten.

	Parameter	Dimension	Rohschlacke AGR	Obergrenze
Eluatkonzentration	Arsen (As)	µg/l	< 1	50
	Blei (Pb)	µg/l	4.190	100
	Cadmium (Cd)	µg/l	< 0,3	5
	Chrom, gesamt (Cr)	µg/l	17	100
	Kupfer (Cu)	µg/l	416	200
	Nickel (Ni)	µg/l	3	100
	Quecksilber (Hg)	µg/l	< 0,2	2
	Zink (Zn)	µg/l	900	400
	Chlorid (Cl ⁻)	mg/l	340	150
	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/l	550	600
	Phenolindex	mg/l	0,02	0,1
	pH-Wert	-	12,8	7,0-12
	Leitfähigkeit	µS/cm	7.970	3000
	Kohlenwasserstoffe (C10 - C40)	mg/kg	71	1000
Feststoffgehalt	PAK ₁₆	mg/kg	n. b.	25
	EOX	mg/kg	< 1,0	10
	PCB ₆	mg/kg	n. b.	1

n.b. = nicht bestimmbar

Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
Dipl.-Ing. Lütjhe
Dipl.-Ing. Heinrichs
Dipl.-Ing. Lobach

Dr. Hermann-Lindrath-Straße 1
D-23812 Wahlstedt
Telefon (0 45 54) 99 200
Telefax (0 45 54) 99 20 30

Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
Geschäftsführer:
Ulrich Lütjhe, Thomas Lobach

bup

Mitglied im Bundesverband
unabhängiger Institute für
bautechnische Prüfungen e.V.

1.16.1 Kennwerte nach DIN 4226-101 - Ultralit

	Parameter	Dimen- sion	Ultralit 1/4	Ultralit 4/11,2	Obergrenze
Eluatkonzentration	Arsen (As)	µg/l	2	2	50
	Blei (Pb)	µg/l	< 1	24	100
	Cadmium (Cd)	µg/l	< 0,3	< 0,3	5
	Chrom, gesamt (Cr)	µg/l	34	5	100
	Kupfer (Cu)	µg/l	5	6	200
	Nickel (Ni)	µg/l	< 1	< 1	100
	Quecksilber (Hg)	µg/l	< 0,2	< 0,2	2
	Zink (Zn)	µg/l	< 10	< 10	400
	Chlorid (Cl ⁻)	mg/l	16	26	150
	Sulfat (SO ₄ ²⁻)	mg/l	140	95	600
	Phenolindex	mg/l	< 0,01	< 0,01	0,1
	pH-Wert	-	10,8	10,9	7,0-12
	Leitfähigkeit	µS/cm	499	391	3000
	Kohlenwasserstoffe (C10 - C40)	mg/kg	< 40	< 40	1000
Feststoffgehalt	PAK ₁₆	mg/kg	n.b.	n.b.	25
	EOX	mg/kg	< 1,0	< 1,0	10
	PCB ₆	mg/kg	n.b.	n.b.	1

n.b. = nicht bestimmbar

Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
Dipl.-Ing. Lühje
Dipl.-Ing. Heinrichs
Dipl.-Ing. Lobach

Dr.-Hermann-Lindrath-Straße 1
D-23812 Wahlstedt
Telefon (045 54) 99 200
Telefax (045 54) 99 20 30

Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
Geschäftsführer:
Ulrich Lühje, Thomas Lobach

bup

Mitglied im Bundesverband
unabhängiger Institute für
bautechnische Prüfungen e.V.

2. Beurteilung**Beurteilung nach DIN EN 12620 in Verbindung mit den DIN 1045-2, Anhang U und
DIN 4226-101**

Aufgrund der festgestellten Ergebnisse können die Gesteinskörnungen in nachfolgende Kategorien eingestuft werden:

Korngruppe	1/4	4/11,2	
Korngrößenverteilung	Gc85/20	Gc85/20	
Feinanteile	f _{1,5}	f _{1,5}	
Kornform	-	SI ₁₅	
Plattigkeit	-	FI ₁₅	
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen	< 0,01	< 0,01	
Chloridgehalt	≤ 0,04	≤ 0,04	
Säurelösliche Sulfate	AS _{0,8}	AS _{0,8}	
Gesamtschwefel	≤ 1	< 1	
Rohdichte ρ _{ssd} [Mg/m³]	2,47	2,33	
Widerstand gegen Frost	-	F ₂	
Frost-Tausalz-Beanspruchung	-	≤ 8 M.-%	
Stoffliche Zusammensetzung	-	erfüllt	
Feststoffgehalt und Eluatkonzentration (Ultralit)	entspricht DIN EN 4226-101	entspricht DIN EN 4226-101	

asphalt-labor**Arno J. Hinrichsen GmbH & Co. KG**

 Dipl.-Ing. Lobach
 Prüfstellenleitung

 Prüfstellenleitung: Dipl.-Ing. Steiniger
 Dipl.-Ing. Lütjhe
 Dipl.-Ing. Heinrichs
 Dipl.-Ing. Lobach

 Dr.-Hermann-Lindrath-Straße 1
 D-23812 Wahlstedt
 Telefon (0 45 54) 99 200
 Telefax (0 45 54) 99 20 30

 Prüfungen an Böden · Bitumen · Gesteinskörnungen · Asphalt
 Hydraulisch gebundene Gemische · Schichten ohne Bindemittel
 mail@asphalt-labor.de · www.asphalt-labor.de
 Amtsgericht Kiel HRA 259 SE Prüfstelle des BÜV Nord e.V.

 Hinrichsen Verwaltungsges. mbH
 Amtsgericht Kiel HRB 181 SE
 Geschäftsführer:
 Ulrich Lütjhe, Thomas Lobach

bup Mitglied im Bundesverband
 unabhängiger Institute für
 bautechnische Prüfungen e.V.

IRRT: innovatives Recycling macht MV-Schlacke zur Goldgrube

IRRT: innovative recycling turns waste incinerator bottom ash into a gold mine

Dr. Stefan Lübken und Jörg Eckardt



Dr. Stefan Lübken war 30 Jahre lang Mitarbeiter der Stadtreinigung Hamburg im Bereich Innovation und hat seit 2011 diverse Forschungsvorhaben zu MV-Schlacken durchgeführt um die Recyclingrate bei den NE-Metallen zu erhöhen und insbesondere um die Mineralien zu einem hochwertigen Sekundärrohstoff aufzubereiten.



Jörg Eckardt ist Geschäftsführer der JE-C GmbH, einem Ingenieur- und Beratungsbüro für die Ressourcen-, Energie- und Abfallwirtschaft. Mit 33 Berufsjahren verfügt er über ein breites Wissen und umfangreiche Erfahrungen in der Entwicklung, Konstruktion und dem Bau von komplexen Anlagen für die Behandlung von Abfällen.

Zusammenfassung

Das IRRT® (Innovative Resource Recovery Technology)-Verfahren zur Aufbereitung von MV-Schlacken wurde im Rahmen von F&E-Vorhaben entwickelt. Mehr als 68 % der frisch ausgetragenen Schlacke können nach der Aufbereitung als Wertstoffe bzw. Produkte mit Erlös vermarktet werden. Aus der Fraktion $\geq 0,5$ mm werden mind. 95 % der Metalle und mind. 85 % des Glases zurückgewonnen. Die extrahierten NE-Metalle sind qualitativ so hochwertig, dass sie direkt an Schmelzbetriebe vermarktet werden. Das extrahierte Glas wird als UltraSilit® an die Schaumglasindustrie veräußert. Die von Störstoffen befreite Mineralien wird mit dem ReUST-System so hochwertig aufbereitet, dass die finalen Produkte UltraLit® $\geq 0,5$ mm alle Anforderungen gem. den Regelwerken Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620:2002+A1:2008 erfüllt. Für die erzeugten Wertstoffe Fe-Metalle, NE-Metalle getrennt nach Schwer- und Leichtfraktion, Glas als UltraSilit® und Gesteinskörnung als UltraLit® gibt es eine rege Nachfrage. Die Reststoffe werden mit dem produzierten Bindemittel SubCEM zu einem verfestigten Abfall hydraulisch gebunden und auf DK-I Deponien verwertet. Die Erlöse aus der Wertstoffvermarktung übersteigen die Behandlungskosten deutlich und ermöglichen die Refinanzierung der Investition in wenigen Jahren. Bisher wurden 65 Mg MV-Schlacke in der IRRT®-Anlage (TRL 6) aufbereitet. Durch die hohen Recyclingquoten sowie der Bindung von CO₂ können mit dem Verfahren mehr als 400 kg CO₂ je Mg MV-Schlacke vermieden werden.

Abstract

The IRRT® (Innovative Resource Recovery Technology) process for processing MV slag was developed as part of R&D projects. After processing, more than 68 % of the freshly discharged slag can be marketed as recyclable materials or products with revenue. At least 95 % of the metals and at least 85 % of the glass are recovered from the fraction $\geq 0,5$ mm. The extracted non-ferrous metals are of such high quality that they are marketed directly to smelting companies. The extracted glass is sold to the foam glass industry as UltraSilit®. The minerals, freed from contaminants, are processed with the ReUST system to such a high quality that the final products UltraLit® $\geq 0,5$ mm meet all requirements in accordance with the regulations for aggregates for concrete in accordance with DIN EN 12620:2002+A1:2008.

There is a lively demand for the recyclable materials produced: ferrous metals, non-ferrous metals separated into heavy and light fractions, glass as UltraSilit® and aggregate as UltraLit®. The residues are hydraulically bound into solidified waste using the produced binder SubCEM and recycled at DK-I landfills. The proceeds from the marketing of recyclable materials significantly exceed the treatment costs and enable the investment to be refinanced in just a few years. To date, 65 Mg of MV slag have been processed in the IRRT® plant (TRL 6). Due to the high recycling rates and the binding of CO₂, the process can avoid more than 400 kg of CO₂ per Mg of MV slag.

1. Veranlassung/Hintergrund

Müllverbrennungsschlacke [auch Hausmüllverbrennungsschlacke oder Rostasche genannt] ist das mengenmäßig bedeutendste Endprodukt der thermischen Müllverwertung. Ca. 25 % des Abfall-Inputs in eine Müllverbrennungsanlage kommt am Ende als Müllverbrennungsschlacke (MV-Schlacke) wieder aus der Anlage heraus. Darin enthalten sind in angereicherter Form (fast) alle metallischen und mineralischen Bestandteile, die in den Verbrennungsprozess hineingegeben worden sind. Seit es in Deutschland derartige Verbrennungsanlagen gibt (seit 1896) wird die mehr oder weniger aufbereitete MV-Schlacke als Trag- oder früher sogar Deckschicht im Straßen- und Wegebau verwendet.

Die althergebrachte Verwertung von MV-Schlacke als Tragschicht ist ein Auslaufmodell. Wir brauchen heute höherwertige Verwendungen, da wir zunehmend Engpässe in der Versorgung mit natürlichen Baustoffen wie Kies und Sand haben. Diese Engpässe mögen regional sehr unterschiedlich sein, da mineralischer Baustoff ein transportsensitives Massengut ist und daher nur lokal gehandelt werden kann, wenn die Preise im akzeptablen Rahmen bleiben sollen. So gibt es z. B. Gebiete im Alpenraum, in denen mehr Primärgestein anfällt, als als Baustoff wieder verwendet werden kann [15, 26]. In anderen Gebieten, z. B. Norddeutschland, bekommt man zunehmend Probleme mit

der Versorgung mit Sand und Kies aus Kiesgruben für Baumaßnahmen [20, 22, 27].

Nach einer Umfrage von ITAD und IGAM [12] fielen in Deutschland in 2020 etwa 6,05 Mio. t ($\pm 100\%$) Frischschlacke (HMVA, wie sie im Schlackebunker der MVA anfällt) an. Daraus wurden 5,62 % Fe-Metalle, 0,33 % VA-Metalle/Grobmetalle und 2,24 % NE-Metalle abgetrennt und hochwertig verwertet. Nur 13,1 % wurden so aufbereitet, dass eine Abstreuung in technische Bauwerke möglich war. Der Rest wurde auf Deponien mehr oder weniger minderwertig verwertet bzw. entsorgt (s. Abb. 1).

Bezüglich der Verwertbarkeit der MV-Schlacke muss erst einmal davon ausgegangen werden, dass es sich bei diesem Stoff um Abfall handelt. Gemäß Kommission der EG [7] sowie § 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG 2023, [13]) kann ein Stoff nur dann ein Nebenprodukt sein, wenn – neben anderen Eigenschaften – dieser Stoff direkt und ohne weitere Verarbeitung verwendet werden kann. Dieses ist bei der MV-Schlacke, so, wie sie in der Verbrennungsanlage aus dem Ofen ausgetragen wird, nicht der Fall. MV-Schlacke ist also kein Nebenprodukt, sondern Abfall. Erst nach diversen Verarbeitungsschritten ist die MV-Schlacke derart von Schadstoffen entfrachtet und stabilisiert, dass ihre Verwendung als Tragschicht möglich ist. Über Rechtsgutachten hatte die Stadtreinigung Hamburg klären lassen, ob durch die in Hamburg übliche Aufbereitung der MV-Schlacke das Abfallende erreicht wird. Die Gutachter kamen dabei zu dem Ergebnis, dass das Aufbereitungsverfahren so leistungsfähig ist, dass alle Anforderungen des § 5 KrWG und auch des Artikel 6 Abs. 1 der Abfall-Rahmenrichtlinie erfüllt werden und die Abfalleigenschaft für die Fertigschlacke entfällt [29].

In § 5 des Kreislaufwirtschaftsgesetzes ist geregelt, wann ein Stoff seine Abfalleigenschaft verliert. Durch Rechtsverordnung hat die EU bereits vor ca. 10 Jahren für einige Stoffe genau geregelt, dass sie nicht unter das Abfallrecht fallen (bestimmte Fe- und Cu-Schrotte, bestimmte Arten von Bruchglas [4]). Bei MV-Schlacke gibt es eine derartige generelle Regelung nicht und es wäre somit eine Einzelfallprüfung, ob die aufbereitete MV-Schlacke alle geforderten Kriterien erfüllt, um ihre Abfalleigenschaft zu verlieren. Da die Ergebnisse von möglicherweise durchgeführten Einzelfallprüfungen nicht veröffentlicht werden, findet man in der Literatur keine Hinweise, ob irgendwo einer aufbereiteten MV-Schlacke zertifiziert wurde, dass sie nicht mehr dem Abfallrecht unterliegt. Es scheint nach wie vor eine Grauzone bei der Einstufung der Fertigschlacken zu existieren.

Die in Deutschland anfallende MV-Schlacke wurde in den vergangenen Jahrzehnten nicht optimal verwertet, sie wurde eher kostengünstig – gegen Zuzahlung seitens des Erzeugers – „weggedrückt“. In den meisten Bundesländern landete sie zu erheblichen Teilen als Deponiebaustoff auf Deponien zur Oberflächengestaltung, insbesondere in Hamburg kann sie aber als Tragschicht im grundwasserfernen Straßen- und Wegbau sowie bei sonstigen Tiefbaumaßnahmen eingesetzt werden. Die Aufbereitung der MV-Schlacke ist dabei meist nicht optimal. Die Entfrachtung von NE-Me-

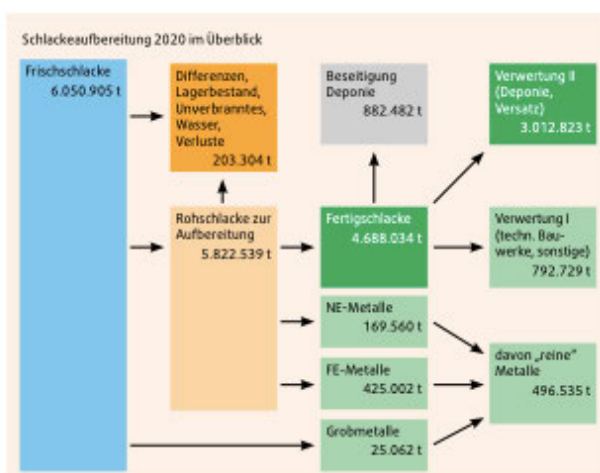


Abbildung 1
Verbleib der fertig
aufbereiteten MV-
Schlacke in Deutsch-
land im Jahr 2020 [12]

tallen ist bei etlichen MV-Anlagen auf dem Stand ihrer Erbauung stehengeblieben, wesentliche NE-Bestandteile insbesondere die $\leq 2,0$ mm werden nicht entnommen und verbleiben im MV-Schlacken-Gemisch. Wertvolle Ressourcen gehen nahezu unwiederbringlich verloren [2]. Gelegentlich wird durch nachgeschaltete, oft mobile NE-Abscheider versucht, dieses Problem zu lösen. Aber auch dieser Ansatz erreicht nicht das Optimum der NE-Abtrennung. Aufgrund eines zu breiten Kornspektrums in Verbindung mit zu hohen Materialschichten auf den Wirbelstromscheidern können kleinere NE-Partikel nur unzureichend abgetrennt werden. Die Ergebnisse des ATR-Projektes haben sehr deutlich aufzeigen können, dass sich Investitionen in gute NE-Scheider und die Auftrennung in mindestens drei, besser vier gestaffelte Kornspektren aufgrund deutlich steigender NE-Metallerträge schnell amortisieren [2].

In herkömmlichen Aufbereitungsanlagen wird nach der rudimentären Metallentfrachtung die verbleibende Mineralik mit ihrem hohem Glasanteil, somit die Hauptmenge der HMVA, minderwertig verwertet. Es wird nicht die Chance genutzt, die Mineralik weitgehend von Schad- und Störstoffen zu entfrachten, um sie danach als hochwertigen Sekundärbaustoff im Beton zu verwenden.

Das Problem bei der Verwendung von Komponenten aus MV-Schlacke im Beton beginnt schon damit, dass es keine Regelwerke dafür gibt. In der Ersatzbaustoffverordnung ist der Einsatz von MV-Schlacke lediglich als Tragschicht, für Dämme, Wälle oder Bauwerkshinterfüllungen zugelassen. Dabei wird die Umweltrelevanz dieser aufbereiteten MV-Schlacke anhand der Gehalte an wasserlöslichen Inhaltsstoffen bewertet. Wenn jedoch aufwändig aufbereitete Komponenten der MV-Schlacke in Beton oder Betonfertigteile eingebracht werden, so gelten gänzlich andere Rahmenbedingungen. Dort gibt es kein perkolierendes Wasser mehr, welches Schadstoffe austragen könnte. Hier sind andere Sichtweisen und angemessene Regelwerke notwendig. REMEX [21] weist darauf hin, dass man in den Niederlanden bereits so weit ist, nur die eluierbaren Schadstoffe im Ausgangsmaterial und am Ende

die Umweltverträglichkeit des fertigen Betonsteins zu prüfen. In den Niederlanden hat man mit dieser Vorgehensweise bereits langjährige Erfahrungen.

Disruptive Maßnahmen und das Zulassen von Innovationen sind in Deutschland dringend erforderlich!

Erste, umfassende Arbeiten zum Erreichen einer hochwertigen Verwertung erfolgten unter ZWAHR bereits ab 2005 [30]. Durch intensives Waschen versuchte er die Salzfrachten in der mehrere Monate gelagerten MV-Schlacke sowie deren Reaktivität zu reduzieren. Ziel war damals der Einsatz der gereinigten MV-Schlacke im Asphalt oder im Beton. Aber beide Wege funktionierten nicht, da die Asphaltindustrie kein Interesse an dem Material hatte und beim Einsatz im Beton der hohe Glas- und Aluminiumanteil durch die Bildung von Alumosilikaten zu Quellungen führte und den Beton zerstörte [19, 24]. Eine Technik zur effizienten Abtrennung des Glases aus der MV-Schlacke stand damals noch nicht zur Verfügung.

Im ATR-Projekt [2] konnte gezeigt werden, dass durch innovative Verfahren bei der Metallseparation der Anteil der zurückgewonnenen reinen NE-Metalle von bundesweit durchschnittlich 1,3 % [14] auf 2,6 % gesteigert werden konnte. Dabei stammten 31 % der gewonnenen NE-Metalle aus der Fraktion 1–2 mm, welche in etlichen deutschen Schlackenaufbereitungsanlagen bereits vor der NE-Entfrachtung abgesiebt und entsorgt wird [2].

Aufbauend auf diesen Erfahrungen, bei denen es um die Optimierung der Abtrennung von NE-Metallen ging, haben einige der damaligen Partner in verschiedenen, vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben weiter daran gearbeitet, die getrockneten und während der NE-Metallabtrennung in verschiedene Korngrößenbereiche aufgetrennten Mineralikströme maximal von Metallen zu befreien. Die Sauberkeit der im ATR-Projekt entstandenen Mineralik war Auslöser für das OPTIMIN-Projekt, in welchem es um die Herstellung einer sauberen Mineralik und deren Einsatz als Sekundärrohstoff im Beton ging [17]. Nach ersten Hinweisen von ZWAHR [30] und später von BUNGE [5], welche herausstellten, dass nur der Feinanteil in der MV-Schlacke für das mittelfristige Verfestigen der gelagerten MV-Frischschlacke verantwortlich ist, wurde in OPTIMIN untersucht, wie hoch die Kornfestigkeit bei Einsatz von frischer, ungelagerter MV-Schlacke im Vergleich zu mindestens sechs Wochen gelagerter MV-Schlacke ist. Dabei zeigte sich deutlich, dass durch die Lagerung eher instabile Konglomerate entstehen, welche einer mechanischen Belastung (z. B. bei der Verdichtung von Tragschichten) nicht standhalten und daher auch für den Einsatz als Sekundärgestein im Beton ungeeignet sind [17].

Aufgrund dieser Erkenntnisse hat man sich daher hauptsächlich mit Frischschlacke befasst, um die von Metallen und Glas weitgehend befreite Mineralik zu einem hochwertigen Betonzuschlagstoff aufzubereiten. Die positiven Erfahrungen aus dem ATR-Projekt hinsichtlich der Metallabtrennung und -reinigung wurden ebenfalls weiterentwickelt und führten zum Bau einer großtechnischen Metallveredelungsanlage in Krefeld [23]. Die Befassung mit der Feinfraktion der MV-Schlacke (< 0,5 mm) zeigte deren unter bestimmten Umstän-

den ausgeprägte puzzolanische Eigenschaft, welche Wünsche entstehen lässt, daraus einen Zement-Ersatz oder zumindest Zement-Zuschlagstoff herzustellen (Forschungsarbeiten dazu: [8, 11, 25]). Beim Zement-Ersatz gibt es jedoch aufgrund der hohen Schadstoffgehalte der Feinfraktion bislang keinen Verwertungsweg in Deutschland, der die bestehenden Regelwerke erfüllt und daher zulässig ist.

Die in den vergangenen Jahren gesammelten Erfahrungen führten im Rahmen von Forschungsvorhaben des Bundes seit 2012 zur Entwicklung der IRR*-Technologie (Innovative Resource Recovery Technology), in welcher alle Aspekte zusammengeführt werden sollen: maximale Metallrückgewinnung hin zu verhüttungsfertigem Rohstoff, Herstellung einer zertifizierten Gesteinskörnung für den Einsatz im Beton, hohe CO₂-Einsparung und bedeutender Beitrag zum Klimaschutz, Rückgewinnung von Altglas für die Dämmstoffindustrie, deutliche Reduzierung der zu deponierenden Abfälle und letztendlich ein wirtschaftliches Verfahren, welches ohne Zuzahlung auskommt. Gemäß EU-Taxonomie-Verordnung Artikel 13 ist das Verfahren als ökologisch nachhaltige Wirtschaftstätigkeit (GREEN-Technology) einzustufen [9].

2. Verfahrensbeschreibung

Bei der herkömmlichen MV-Schlackenaufbereitung werden lediglich die beiden Schritte der Fe- und NE-Abtrennung vorgenommen, für die spätere Verwendung in einer Tragschicht kommt die mehrwöchige Lagerung und ggfs. eine Einstellung der Siebkennlinie hinzu. Die erforderlichen großen Hallen für die Lagerung (Carbonatisierung) treiben die Behandlungskosten in die Höhe.

Im IRR*-Verfahren gibt es sieben Levels der Aufbereitung, der Output kann dabei sofort und ohne Lagerung verwendet werden. Im Verfahren werden trockene und nasse Aufbereitungsschritte kombiniert. Die in Abbildung 2 dargestellten Levels laufen nicht chronologisch nacheinander ab, die Levels sollen hingegen die zunehmende Komplexität der Behandlungsschritte darstellen.

Im Verfahren wird ausschließlich frisch aus dem Naßentschlacker entnommene MV-Schlacke eingesetzt. Diese durchläuft nach einer ersten Fe- und VA-Entfrachtung (Level 1 und 2) eine Trockentrommel, in welcher parallel eine durch CO₂-Zufuhr unterstützte dynamische Carbonatisierung zur Verbesserung der bauphysikalischen Eigenschaften abläuft (Level 4, DyCAR-System). Das getrocknete Material durchläuft danach einen Hochgeschwindigkeitsaufschluss, in welchem instabile Konglomerate in ihre festen Bestandteile zerlegt und eingeschlossene gediegene Metallpartikel freigelegt werden (Level 5, RoTAC-System). Durch diesen Aufschluss werden die bauphysikalischen Eigenschaften der Mineralikpartikel signifikant verbessert. Im nächsten Step wird der Stoffstrom klassiert (Trockensiebung in speziellen Siebanlagen). Die Fraktion < 0,5 mm wird dabei an mehreren Stellen abgesteuert, die Grobfraktion – je nach späterer Verwendung – zerkleinert auf ≤ 8 mm oder ≤ 11 mm und wieder in den Prozess gegeben.

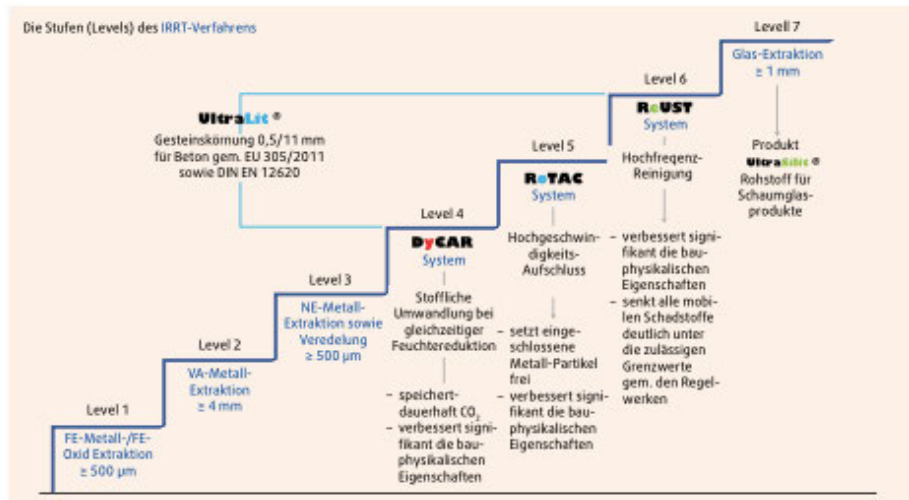


Abbildung 2
Die Levels des IRRT-Verfahrens (sie laufen nicht chronologisch von Level 1 bis 7 ab)



Abbildung 3
Schlackepartikel „porentief rein“ nach der Hochfrequenz-Reinigung (ReUST-System)

Die erwünschten Fraktionen (meist 0,5/2, 2/4, 4/8) durchlaufen anschließend die Abtrennung der Fe-Oxide im dynamischen Magnetfeld sowie die darauffolgende Abtrennung der NE-Metalle über Wirbelstromabscheider (Level 3). Aufgrund der Trockenheit des Materials, den dünnen Materialschichten auf den Beschickungsbändern der Aggregate sowie den engen Kornspektren werden hier konstant über 3 % des Inputs [nasse MV-Schlacke] als reine NE-Metallfraktion abgetrennt. Aus den Fraktionen $> 4 \text{ mm}$ wird die VA-Fraktion über Induktions-Sortierung abgetrennt. Über Lufttische erfolgt die sogenannte Veredelung, die Auftrennung der NE-Fraktion in eine Leicht- und eine Schwerfraktion.

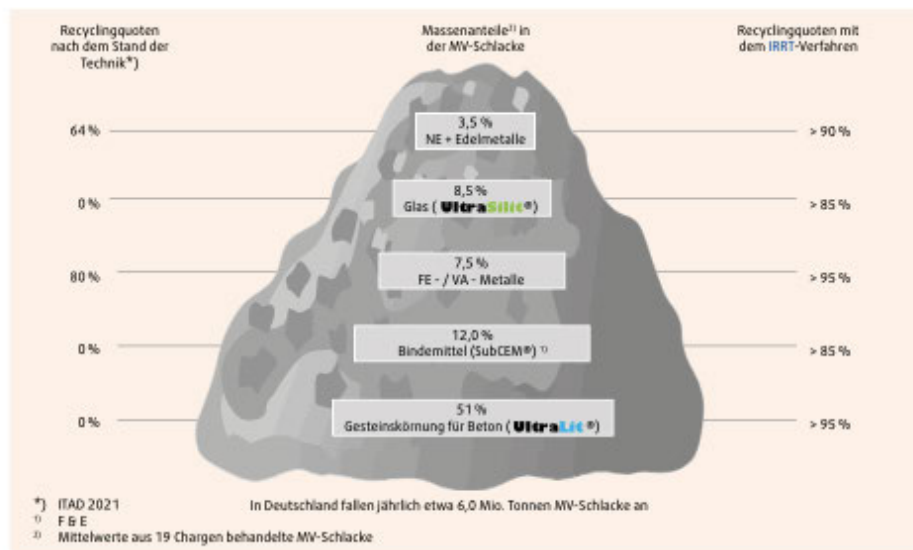
Die von Metallen weitestgehend befreiten MV-Schlackefraktionen werden im Level 6 einer Hochfrequenz-Reinigung mittels Ultraschall unterzogen (ReUST-System). Durch diese intensive Reinigung werden nochmals möglicherweise instabile Bestandteile von den versinterten Schlackepartikeln abgesprengt und damit die bauphysikalischen Eigenschaften der Mineralik weiter verbessert. Sämtliche mobilisierbaren Fein- und Anhaftungen und Schadstoffe werden aus den Partikeln herausgewaschen mit der Folge, dass nach der Reinigung im Eluat alle Grenzwerte der geltenden Regelwerke eingehalten werden (siehe Tabelle 1). In Abbildung 3 ist die „porentiefe Reinheit“ der Gesteins-

körnung sichtbar, welche unter dem Produktnamen UltraSilit® vermarktet werden soll.

Im ReUST-System werden zudem mindestens 98 % der im Beton sehr störenden Leichtstoffe (insbesondere Katzenstreu, Ölbindemittel, Porenbeton, Bims) durch das Aufschwimmen während der Reinigung abgetrennt. Bis zu 2 Masseprozent entfallen in der Fraktion 1/4 auf diese Leichtstoffe. Der Wasserverbrauch in diesem Verfahren ist extrem gering. Durch die hohe Energiezufuhr bei der Ultraschallreinigung kann das Waschwasser so lange im Kreislauf geführt werden, bis es mindestens acht Mal zur Reinigung verwendet wurde. So kommt für die Wäsche ein Wasser- zu Feststoffverhältnis von 0,3 : 1 zustande, welches bei herkömmlichen Waschverfahren bei etwa 5 : 1 liegt. Die Wäsche erfolgt im kontinuierlichen Betrieb, der reine Waschvorgang dauert weniger als eine Minute. Durch den extrem geringen Wasserbedarf ist das IRRT®-Verfahren sehr ökologisch.

Als letzte Aufbereitungsstufe erfolgt im Level 7 die Glasextraktion ab 1 mm . In optischen Sortieranlagen vom Typ CLARITY werden die Glaspartikel aus den verschiedenen Fraktionen mittels Luftdüsen herausgeschossen. Das gewonnene Glas ist so rein, dass es unter dem Produktnamen UltraSilit® direkt als Rohstoff für Schaumglasprodukte eingesetzt werden kann.

Abbildung 4
Das Potenzial des
IRRT®-Verfahrens,
Vergleich zum Stand
der Technik



Seit 2018 wird eine großtechnische Versuchsanlage im TRL 6-Maßstab (technologischer Reifegrad: Prototyp in Einsatzumgebung) mit MV-Schlacken aus mehreren mitteleuropäischen Ländern beschickt. Die Verfahrenstechnik wurde so bereits an diversen Schlackenqualitäten erprobt und wird immer weiter optimiert.

Die Aufbereitung von MV-Schlacke in der Versuchsanlage erbrachte im Mittel der vergangenen Jahre folgende Output-Ströme:

- 50,0 % zertifizierte Gesteinskörnung 0,5/1 mm – UltraLit®
- 12,0 % Wasserdampf aus der dynamischen Carbonatisierung
- 7,1 % Fe-Metalle
- 7,5 % hochreines Glas (Reinheit > 95 %) – UltraSilit®
- 2,5 % sauberes Aluminium (Reinheit > 85 %)
- 0,7 % saubere NE-Schwerfraktion (Kupfer, Blei, Zink, Edelmetalle, Reinheit > 85 %)
- 0,4 % VA-Metalle

Der Rest (Filterstaub, Feinkorn < 0,5 mm, Schlamm aus der Reinigung) geht zusammen mit dem Prozesswasser als erdfeuchte Masse zur Verwertung auf die Deponie und kann dort als hydraulisch gebundene Tragschicht eingebaut werden. Die Einzelfraktionen dieses Reststoffes enthalten alle im vorangegangenen Reinigungsverfahren (Level 1 bis 7) abgetrennten Schadstoffe. Durch das Zusammenführen der schadstoffbelasteten trockenen Feinfraktion mit ihren puzzolanischen Eigenschaften mit dem Prozesswasserschläm kommt es zu einer Verfestigung dieser Reststoffe auf der Deponie. Es entsteht eine Schadstoffsänke, in der die Schadstoffe so gut eingebunden sind, dass das Material den Einbaubedingungen einer DK-1-Deponie entspricht.

Obwohl mit dem oben beschriebenen Verfahren ein Weg für die Verwertung der schadstoffangereicherten Feinfraktion zur Verfügung steht, wird weiter an einer höherwertigen Verwertung geforscht. So ist ein Binde-

mittel entwickelt worden, welches als Zusatz im Beton die Druckfestigkeit der Probekörper in Prismen-Versuchen um mehr als 30 % erhöhen konnte. Ca. 12 % der Frischschlacke könnten über diesen Weg als Bindemittel (Name SubCEM®) verwertet werden. Aufgrund der rückläufigen Mengen an Steinkohlenflugasche (SFA) kann hier ein neuer Absatzmarkt entstehen. Die Forschungs- und Entwicklungsarbeiten dazu laufen.

Die Abb. 4 zeigt die mittleren Gehalte [%] an Wertstoffen wie NE- und Edelmetalle, Glas, Fe-/VA-Metalle, Bindemittel sowie Gesteinskörnungen für Beton in MV-Schlacken sowie den Vergleich der Recyclingquoten (Recovery Rates).

3. Laborergebnisse

Im Rahmen der Forschung war es das Ziel, einen hochwertigen Ersatz für Sand bzw. Kies für den Einsatz im Beton zu erzeugen, welcher nicht mehr dem Abfallrecht unterliegt. Da das alte LAGA-Merkblatt 20 oder auch die neue Ersatzbaustoff-Verordnung andere Ziele im Fokus haben, sind sie als Maßstab für die Qualität des erzeugten Baustoffs nicht geeignet. An erster Stelle wurde sich an der DIN EN 12620 orientiert, da sie alle Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton zusammenfasst. In Tabelle 1 sind die Laborwerte eines externen, für Baustoffprüfungen zertifizierten Labors von vier MV-Schlacken aus vier unterschiedlichen Verbrennungsanlagen zusammengestellt.

Die in Tabelle 1 gelb markierten Eigenschaften/Parameter sind den Werten der Rohschlacke in Tabelle 2 gegenübergestellt.

Im Rahmen der Fremdüberwachung wurden alle Sollwerte für Gesteinskörnung in Beton problemlos eingehalten. Die Leistungsfähigkeit des innovativen Verfahrens wird anhand dieser Ergebnisse sichtbar.

Der Vergleich der Daten für UltraLit® mit denen der Rohschlacke in Tabelle 3 zeigt sehr deutlich,

Eigenschaft/Parameter	Dimension	Anforderung	Regelwerk	Soll	UltraLit®
Chloridgehalt (Stahlbeton)	M-%	chemisch	DIN EN 1744 - 1 : 2009 + A1 : 2012	< 0,04	0,015
Gesamtschwefel (M%)	M-%	chemisch	DIN EN 1744 - 1 : 2009 + A1 : 2012	< 1	0,38
Magnesiumsulfatversuch	M-%	chemisch	DIN EN 1367 - 2 : 2009		MS ₉₀
Sulfate säurelöslich	M-%	chemisch	DIN EN 1744 - 1 : 2009 + A1 : 2012	≤ 0,8	0,50/AS _{2,8}
Feinanteile < 63µm	M-%	geometrisch	DIN EN 933 - 1 : 2012		f _{1,5}
Kornformkennzahl	/	geometrisch	DIN EN 933 - 4 : 2008		SI ₀
Kornzusammensetzung	M-%	geometrisch	DIN EN 933 - 1 : 2012		G _{85/20}
Plattigkeitskennzahl	/	geometrisch	DIN EN 933 - 3 : 2012		Fl ₀
Frost-Tausalz-Widerstand	M-%	physikalisch	DIN EN 1367 - 6 : 2008	< 8	3,1
Frost-Tau-Widerstand	M-%	physikalisch	DIN EN 1367 - 1 : 2007		F ₁ /F ₂
Los-Angeles-Wert	LA-K	physikalisch	DIN EN 1097 - 2 : 2020		LA ₁₀
Micro-Deval-Koeffizient	MD-K	physikalisch	DIN EN 1097 - 1 : 2011		M _{10/20}
Rohdichte	Mg/m³	physikalisch	DIN EN 1097-6 : 2022		2,37
Schlagzertrümmerungswert	M-%	physikalisch	DIN EN 1097 - 2 : 2020		SZ ₂₀
Wasseraufnahme	%	physikalisch	DIN EN 1097-6 : 2022		5,5 %
Leichtgew. org. Verunreinig.	M-%		DIN EN 1744 - 1 : 2009 + A1 : 2012	< 0,1	0,04
Stoffliche Zusammensetzung	M-%		TP Gestein-SiB, Teil 3.1.4 Metalle	< 5,0	0,05
Stoffliche Zusammensetzung	M-%		TP Gestein-SiB, Teil 3.1.4 Unverbr.	< 0,5	0,125

Tabelle 1
Charakterisierung von MV-Schlacken aus vier verschiedenen Müllverbrennungsanlagen, jeweils mit den Körnungen 1/4 und 4/11 nach fertiger Aufbereitung zu UltraLit® nach DIN 12620 in Verbindung mit DIN 1045-2, Anhang U. Dargestellt sind Mittelwerte bzw. Qualitätsklassen, die alle untersuchten Proben erreicht haben.

Bauphysik			
Parameter	Rohschlacke/ gealterte Schlacke	UltraLit	Anforderungen
Leichtgewichtige schwimmende Bestandteile	0,3 M-%	0,04 M-%	≤ 0,1 M-%
Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel	9,6 M-%	0,8-2,2 M-%	≤ 4,0 M-%
Umweltchemie			
Parameter	Rohschlacke/ gealterte Schlacke	UltraLit	Anforderungen
Chloridgehalt im Feststoff	0,46 M-%	0,015 M-%	≤ 0,04 M-% [Stahlbeton] ≤ 0,15 M-% [Beton o. Bewehrung]
Säurelösliche Sulfate im Feststoff	3,7 M-%	0,50 M-%	≤ 0,8 M-%
Gesamtschwefel im Feststoff	1,17 M-%	0,38 M-%	≤ 1,0 M-%

Tabelle 2
Gegenüberstellung der relevanten bauphysikalischen und umweltchemischen Parameter für den Einsatz der Gesteinskörnung im Beton

welch enormen Reinigungseffekt das gesamte IRRT®-Verfahren mit allen sieben Stufen erreicht. Vergleiche zum Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel (DIN EN 1367-1) zeigen für UltraLit® regelmäßig Werte entsprechend der Kategorien 1 oder 2, der Sollwert von unter 4 % Absplitterung wird mit stets unter 2,5 % sicher eingehalten. Bei herkömmlich aufbereiteter MV-Schlacke liegt die Absplitterung stets über 8 % und übersteigt den zulässigen Sollwert somit um das Doppelte [18]. Diese Mineralik aus der herkömmlichen Aufbereitung ist für die Verwendung in Beton daher gänzlich ungeeignet. Abbildung 5 zeigt Rechtecksteine aus großtechnischer Fertigung mit 17 % UltraLit®-Anteil im Unterbeton.

Eigenschaft	Dimension	Soll	UltraLit	Rohschlacke 11 Wochen ge- lagert
Arsen	µg/l	50	Max. 2	<1
Blei	µg/l	100	Max. 24	4190
Cadmium	µg/l	5	<0,3	<0,3
Chrom, gesamt	µg/l	100	10,3	17
Kupfer	µg/l	200	17,4	416
Nickel	µg/l	100	Max. 2	3
Quecksilber	µg/l	2	<0,2	<0,2
Zink	µg/l	400	Max. 20	900
Chlorid	mg/l	150	24,2	340
Sulfat	mg/l	600	118	550

Tabelle 3
Charakterisierung von MV-Schlacken aus vier verschiedenen Müllverbrennungsanlagen, jeweils mit den Körnungen 1/4 und 4/11 nach fertiger Aufbereitung zu UltraLit® nach DIN 4226-101. In der Spalte „UltraLit“ sind jeweils Mittelwerte dargestellt, bzw. Maximalwerte, wenn Einzelwerte unter der Nachweisgrenze lagen oder über die Nachweisgrenze, wenn alle Messwerte unter der Nachweisgrenze lagen. Eine Rohschlacke gemäß DIN 4226-101 zu untersuchen ist untypisch, da diese DIN Gesteinskörnungen für Beton beschreiben soll. Da carbonatisierte Schlacken nicht im Beton eingesetzt werden, gibt es für diesen Zweck normalerweise keine derartigen Untersuchungen. Es handelt sich daher hier um eine Einzelprobe [1].



Abbildung 5
Rechtecksteine aus großtechnischer Fertigung mit 17 % UltraLit® im Unterbeton

Korrekturfahne

Abbildung 6
Die finalen Produkte
UltraLit® und Ultra-
Silit®



4. Wirtschaftliche Effekte der Aufbereitung

Ein erster großer Vorteil in der IRR-Technologie besteht in der Annahme von Frischschlacke, die innerhalb von 14 Tagen behandelt wird, so, wie sie aus dem Nass-Entschlacker der Verbrennungsanlage kommt. Es sind keine Lagerflächen für die Carbonatisierung/Alterung der Schlacke erforderlich. Die erzeugten Wertstoffe/Rohstoffe können unmittelbar nach ihrer Entstehung in den Verkauf gehen. Für eine Aufbereitungsanlage wird daher nur ein vergleichsweise kleines Grundstück benötigt.

Durch die Steigerung der Recyclingquoten wird ein erhebliches Wertschöpfungspotenzial erreicht (s. Abb. 4). Die anschließende Veredelung der NE-Metalle bis zur Verhüttungsqualität ermöglicht die direkte Belieferung der Schmelzen unter Umgehung der bislang immer erforderlichen Metallaufbereiter. Die bereits in 2019 bei einem Schlackeaufbereiter eingesetzte Technologie der NE-Metallreinigung und Trennung in eine Schwer- und eine Leichtfraktion führte zu deutlichen wirtschaftlichen Vorteilen [10] und wurde hier nochmals weiterentwickelt. Mit der heutigen IRR-Technologie lassen sich je Mg MV-Schlacke Metalle im Wert von deutlich über 90 EURO gewinnen. Das extrahierte saubere Glas (UltraSilit®) sowie die gereinigte Gesteinskörnung (UltraLit®) lassen sich mit Erlös vermarkten. Die zusätzliche Wertschöpfung auf der Seite der NE-Metalle deckt die Mehrkosten für die aufwändige Aufbereitung der Mineralien hin zur zertifizierten Gesteinskörnung vollständig ab. Das Verfahren ist insgesamt so wirtschaftlich, dass die Bilanzdaten aus Studien der Jahre 2021–2023 für große IRR*-Aufbereitungsanlagen einen ROI von unter 48 Monaten ergaben.

Bei der herkömmlichen Verwertung der MV-Schlacken vom Metallentrachten mit anschließender Deposition oder aber einer weitergehenden Aufbereitung für Tragschichten entstehen Behandlungs- und Verwertungs- bzw. Entsorgungskosten von über 20 EURO pro Mg MV-Schlacke. Diese werden letztendlich auf den Abfallerzeuger, also den Bürger, abgewälzt. Mit Einführung der Brennstoffsteuer für Abfälle ab 2024 kommen nochmals neue Kosten in Höhe von bis zu 27,85€/Mg Abfall hinzu, welche am Ende ebenfalls vom Bürger zu zahlen sind [3]. Bei Umstieg zu einer Schlackenaufbereitung nach IRR-Technologie können

die neuen Kosten für die Brennstoffsteuer abgefangen und zudem die bisherigen Kosten für die Aufbereitung/Verwertung/Entsorgung durch die zusätzlichen Erlöse aus der Vermarktung der Erzeugnisse/Rohstoffe signifikant gesenkt werden.

5. Bedeutung der umfassenden Aufbereitung für den Klimaschutz

Mit dem IRR*-Verfahren können mindestens 50% des Inputs an Frischschlacke als Gesteinskörnung für Beton gemäß DIN (EN) 12620 sowie mindestens 7,5% als Rohstoff für die Dämmstoffindustrie (Schaumglas) gewonnen werden. Ca. 7,5% des Inputs werden als Fe-/VA-Metalle verwertet, entsprechend einer Recyclingquote von mind. 95%. Ca. 3,2% des Inputs werden als NE-Metalle (inkl. Edelmetalle) verwertet, entsprechend mind. 90%iger Recyclingquote. Somit können bereits jetzt mehr als 68% des Inputs an MV-Schlacke hochwertig verwertet werden. In dieser Bilanzierung ist die Herstellung eines Bindemittels (SubCEM*) aus MV-Schlacke noch nicht enthalten. Je Mg Input MV-Schlacke können dadurch über 400 kg CO₂ vermieden werden. Die Herleitung dieses Wertes unterbleibt an dieser Stelle aus Platzgründen. Das CO₂-Einsparpotenzial beinhaltet auch die dauerhafte Speicherung von CO₂ beim IRR*-Verfahren.

6. Rechtliche Aspekte

Nach jahrelangen Entwicklungsarbeiten seit 2012 sowie die durch den Bund geförderten Forschungsprojekte im Rahmen der nationalen Ressourceneffizienz steht nun eine hochwertige und umweltchemisch unbedenkliche Gesteinskörnung als Sekundärbaustoff zur Verfügung, welche bislang jedoch lediglich als Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620:2002+A1:2008 zertifiziert ist. Auch die Anforderungen der Bauproduktenverordnung gemäß EU 305/2011 und der DIN 4226-101:2017-08 „Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 – Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen“ werden erfüllt. Da die vorhandenen Regelwerke entweder für MV-Schlacke gar nicht vorgesehen sind oder aber nur auf deren Verwendung in technischen Bauwerken ausgelegt sind (Ersatzbaustoffverordnung), gibt es keine Rechtsvorschriften, nach denen ein bundesweit

oder gar EU-weit gültiger Weg geregelt ist, wie man aus MV-Schlacke einen Sekundärbaustoff machen kann, der als Erzeugnis oder Produkt frei vom Verdacht erregenden Abfall-Begriff gehandelt werden darf. Der Leitfaden zum Einsatz von R-Beton [28] besagt jedoch, dass Betonhersteller bis zu 45 % der Gesteinskörnung durch Recyclingmaterial ersetzen dürfen, wenn dieses den Normen DIN EN 12620, DIN 4226-101 und DIN 4226-102 entspricht. Dieses trifft auf UltraLit® zu.

7. Zusammenfassung

Ein innovatives Verfahren zur Aufbereitung von Müllverbrennungs-Schlacken wurde entwickelt und soll als IRRT® (Innovative Resource Recovery Technology)-Verfahren an den Markt gebracht werden. Im Verfahren wird frisch ausgetragene Schlacke so weit aufbereitet, dass mindestens 68 % davon als Wertstoffe bzw. Produkte mit Erlös vermarktet werden können. Die getrocknete Schlacke wird einem mechanischen Aufschluss unterzogen, der mechanisch instabile Fragmente zerschlägt und die in den Sinterprodukten eingeschlossenen edeligen Metalle für die Extraktion freilegt. Metalle werden aus der Körnung > 0,5 mm zu mit einer Recyclingquote > 95 % und einer Reinheit > 85 % zurückgewonnen. Glas wird aus der MV-Fraktion > 1 mm mit einer Recyclingquote > 85 % und einer Reinheit von > 95 % zurückgewonnen und als UltraSilt® für die Schaumglasherstellung vermarktet. Die für den Einsatz im Beton schädlichen Störstoffe werden durch neuartige Verfahren extrahiert. Im ReUST-System erfolgt die Reinigung der MV-Granulate unter die geforderten Grenzwerte gem. den Regelwerken. Gleichzeitig werden alle mechanisch instabilen Bestandteile von den mineralischen Partikeln abgesprengt, sodass am Ende eine schadstoffarme Gesteinskörnung entsteht, die beste Werte für das Anforderungsprofil: Beständigkeit gegen Frost-Tau-Wechsel aufweist und als Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620:2002+A1:2008 zertifiziert ist. Aufgrund der – im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren – erheblichen Steigerung der Rückgewinnungsraten (Recovery Rates) für NE-Metalle in hoher Reinheit können alle Aufbereitungskosten und Kosten für die Reststoffentsorgung von den Erlösen durch die Vermarktung der Rohstoffe/Erzeugnisse deutlich kompensiert werden. Die Abbildung 6 zeigt das Produkt/Erzeugnis „Gesteinskörnung für Beton“ der Körnung 1/11 mm und das Produkt/Erzeugnis „RC-Glas“ der Fraktion 4/12 mm.

Bislang wurden MV-Schlacken von 14 deutschen und 5 ausländischen Müllverbrennungsanlagen in der vorhandenen Technikumsanlage in Begleitung der Auftraggeber aufbereitet. Die Chargen umfassten dabei stets Mengen von mindestens 1.500 kg je Verbrennungsanlage. Insgesamt wurden bislang 65 Mg MV-Schlacke in der Anlage behandelt, wodurch umfassende Erkenntnisse aus der Praxis vorliegen. Für die Vermarktung der Metalle und des Glases (UltraSilt®) gibt es sichere Absatzwege und auch für die Gesteinskörnung (UltraLit®) gibt es bereits Anfragen von Betonstein- und Transportbetonwerken.

Aufgrund der hohen Rückgewinnungs- und Verwertungsraten und dem in einer anfänglich kurzen Car-

bonatisierungsphase technisch injiziertem CO₂, können je Tonne MV-Schlacke mehr als 400 kg CO₂ vermieden werden. Mit dem IRRT®-Verfahren steht ein hocheffizientes, wirtschaftliches, innovatives Aufbereitungsverfahren für MV-Schlacken zur Verfügung, welches am Ende ≥ 50 % des Inputs als zertifizierte Gesteinskörnung (UltraLit®), $\geq 7,5$ % als hochreines Glas (UltraSilt®), $\geq 3,2$ % als reine NE-Fraktion und $\geq 7,5$ % als Fe-/VA-Fraktion für die Bedürfnisse des Marktes bereitstellt. Die Nachfragen nach diesen Wertstoffen – gegen Erlös – ist gegeben. Eine großtechnische IRRT®-Anlage ist in Planung.

Literatur

- [1] Asphalt-Labor (2023): Untersuchungsbefund Nr. 6750+7079/23 vom Asphalt-Labor, Wahlstedt vom 20.12.2023
- [2] ATR (2015): BMBF-Forschungsvorhaben FKZ 033R086: ATR – Aufschluss, Trennung und Rückgewinnung von ressourcenrelevanten Metallen aus Rückständen thermischer Prozesse mit innovativen Verfahren, 516 S., Download am 1.02.2024 https://opus4.kobv.de/opus4-bam/files/52157/TIBKAT_1748479865.pdf
- [3] BMUV (2022): Auswirkungen des nationalen Brennstoffemissionshandels auf die Abfallwirtschaft. – Studie beauftragt vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 56 S.
- [4] BMUV (2023): Eckpunktepapier des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz vom 29.12.2023 für die geplante Verordnung zum Ende der Abfalleigenenschaft für bestimmte mineralische Ersatzbaustoffe (Abfallende-Verordnung)
- [5] Bunge, R. (2016): Aufbereitung von Abfallverbrennungsaschen – Eine Übersicht. – In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3, S. 141–161, TK-Verlag Neuruppin
- [6] Creuwels, H., v.d. Wegen, G., Heijndijk, E., Kappetein, J. (2016): Aufbereitete Asche aus Abfallverbrennungsanlagen als Zuschlagstoff bei der Herstellung von Betonpflastersteinen. – In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 3, S. 223–232, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
- [7] EG 2007: Kommission der Europäischen Gemeinschaften: Mitteilung der Kommission an den Rat und das Europäische Parlament zur Mitteilung zu Auslegungsfällen betreffend Abfall und Nebenprodukte: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2007:0059:REV1:DE:PDF>
- [8] EMSARZEM (2021): EMSARZEM – Müllverbrennungsschlacke als Rohstoff für die Zementherstellung. – Förderkennzeichen 033R265 Download vom 9.02.2024: <https://www.remin-kreislaufwirtschaft.de/projekte/emsarzem>
- [9] EU (2020): Verordnung 2020/852 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 18.06.2020 über die Errichtung eines Rahmens zur Erleichterung nachhaltiger Investitionen und zur Änderung der Verordnung 2019/2088. – In: Amtsblatt der Europäischen Union vom 22.06.2020, L198 S. 13–43
- [10] EUWID (2021): Niederländische Schlackeaufbereiter Blue Phoenix übernimmt C.C. Umwelt. – EUWID Recycling und Entsorgung 8.2021, S. 7
- [11] Hoenig, V., Knöpfelmacher, A., Vennemann, B., Ebert, D., Deike, R. (2020): Eignung der aufbereiteten Feinfraktion von MVA-Schlacken als Rohstoffkomponente im Zementherstellungsprozess. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7, S. 136–151, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
- [12] ITAD 2021: Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V. – Jahresbericht 2021
- [13] KrWG 2023: Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen, – Zuletzt geändert am 2.03.2023 <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/BjNR021210012.html#BJNR021210012BJRG000100000>
- [14] Kuchta, K., Enzner, V. (2015): Metallrückgewinnung aus Rostaschen aus Abfallverbrennungsanlagen – Bewertung der Ressourceneffizienz. Entsorgungsgemeinschaft der Deutschen Entsorgungswirtschaft e.V. 17, 52 S.
- [15] KVO-Ost 2021: Umgang mit und Verwertung von Tunnelausbruch. – Download am 16.01.2024: https://www.kvu.ch/getdownloadfile.cfm?filename=210303113556_F8_AUS_2_Aushub_Tunnelausbruchmaterial_2021_03_03.pdf
- [16] Lübben, S. (2015): Verwertung von Abfallverbrennungsaschen als Zuschlagstoff in der Beton-, Asphalt- und Zementindustrie. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 2, S. 321–335, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
- [17] Lübben, S., Enzner, V., Holm, O. (2018): Aufbereitung von Teilströmen der Abfallverbrennungsasche zu hochwertigen Zuschlagstoffen und

- deren Einsatz als Recyclingprodukte in der Bauindustrie. – In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 5, S. 153–172, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
- [18] **Moll (2020)**: Befund-Nr. 3974/Sb/19 vom Prüfinstitut Dr. Moll, Isenbagen, vom 21.01.2020
- [19] **Müller, U.; Rübner, K. (2006)**: The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component. – Cement and Concrete Research 36, S. 1434–1443
- [20] **Petzinna, A. (2020)**: mündliche Mitteilung der Fa. QAM, Hamburg, über Verzögerungen auf Baustellen wegen Sandknappheit
- [21] **REMEX (2023)**: 7-Punkte-Plan für eine erfolgreiche Ressourcenwende In: Resümee – Das Magazin der Remex 2023, S. 8–11
- [22] **Rührlich, D. (2020)**: Sand – ein nur scheinbar unendlicher Rohstoff. – Deutschlandfunk Download am 16.01.2024: <https://www.deutschlandfunk.de/sand-ein-nur-scheinbar-unendlicher-rohstoff-100.html>
- [23] **Rottlaender, G. (2020)**: Praxisbericht zum r+impuls Projekt STRATEGO – Bau und Betrieb einer Aufbereitungsanlage zur Rückgewinnung von strategischen Metallen. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle 7, S. 170–179, Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH
- [24] **Rübner, K.; Haamkes, F.; Linde, O. (2007)**: Untersuchungen an Beton mit Hausmüllverbrennungsschlacke als Gesteinskörnung. – Tagung Bauchemie in Siegen, GDCh-Monographie Bd. 37, S. 253–259
- [25] **S-CEM (2023)**: S-CEM im Einsatz für Zement- und Baustoffindustrie, ein Projekt der Heidemann Recycling GmbH. – Download am 9.02.2024: <https://s-cem.de/index.html>
- [26] **SOLID (2013)**: Was tun mit dem Tunnelausbruch? Download am 16.01.2024: <https://solidbau.at/artikel/was-tun-mit-dem-tunnelausbruch/>
- [27] **Spiegel (2019)**: Die Welt verbraucht zu viel Sand. – Download am 16.1.24: <https://www.spiegel.de/wissenschaft/natur/warnung-der-uno-der-sand-wird-knapp-a-1266104.html>
- [28] **UMBW (2017)**: Leitfaden zum Einsatz von R-Beton. – Hrsgb.: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 24 S.
- [29] **Versteijl, A.; Schink, A.; Millat, J. (2011)**: Gutachten zum rechtssicheren Einsatz von MV-Schlacken – Technische und rechtliche Bewertung, insbesondere in haftungsrechtlicher Hinsicht. – Redeker/Sellner/Dahs Rechtsanwälte – Berlin (unveröffentlicht), zitiert in Greinert, J. (2012): Vermarktung von MVA-Schlacken – Erfahrungen aus Hamburg. – In: Recycling und Rohstoffe, Band 5, S. 819–836, TK-Verlag Neuruppin
- [30] **Zwahr, H. (2005)**: MV-Schlacke – Mehr als nur ein ungeliebter Baustoff? – 10. Fachtagung Thermische Abfallbehandlung, Schriftenreihe des Instituts für Abfallwirtschaft und Altlasten, TU Dresden, Hrsgb. Bilitewski, B. et al.

Anschrift der Autoren

JE-C GmbH, Siemensstrasse 28, 32676 Lügde
E-Mail: je@je-c.de

Eigenständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit mit dem Titel:

Vom Abfall zum Baustoff: Maximierung des Einsatzes von UltraLit im Beton – einer Gesteinskörnung aus HVM-Schlacke

selbständig und nur mit den angegebenen Hilfsmitteln verfasst habe. Alle Passagen, die ich wörtlich aus der Literatur oder aus anderen Quellen wie z. B. Internetseiten übernommen habe, habe ich deutlich als Zitat mit Angabe der Quelle kenntlich gemacht.

24.10.2025

Datum

Unterschrift