Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit

Einfluss der Zusammensetzung von Mineralfaserabfällen auf die Recyclingfähigkeit als Sekundärzumahlstoff

Rebecca Anna Seywerth, BSc

Februar 2024

MONTANUNIVERSITÄT LEOBEN
www.unileoben.ac.at

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt, den Einsatz von generativen Methoden und Modellen der künstlichen Intelligenz vollständig und wahrheitsgetreu ausgewiesen habe, und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich den Satzungsteil „Gute wissenschaftliche Praxis“ der Montanuniversität Leoben gelesen, verstanden und befolgt habe.

Weiters erkläre ich, dass die elektronische und gedruckte Version der eingereichten wissenschaftlichen Abschlussarbeit formal und inhaltlich identisch sind.

Datum 07.02.2024

Rebecca A. Seywerth

Unterschrift Verfasser/in
Rebecca Anna Seywerth

LEHRSTUHL FÜR THERMOPROZESSTECHNIK

Lehrstuhlleiter:
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch
Montanuniversität Leoben
Franz-Josef-Straße 18
A-8700 Leoben

www.unileoben.ac.at

Masterarbeit

Einfluss der Zusammensetzung von Mineralfaserabfällen auf die Recyclingfähigkeit als Sekundärzumahlstoff

erstellt am

Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Vorgelegt von:

Rebecca Seywerth, BSc

Betreuende Personen:

Dipl.-Ing. Anna Krammer
Dipl.-Ing. Dr.mont. Klaus Doschek-Held
Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Harald Raupenstrauch

Leoben, 06.02.2024

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung meiner Masterarbeit, aber auch während meiner kompletten Studienzeit begleitet und unterstützt haben.

Allen voran gilt der größte Dank meinen Eltern, die mir diese Ausbildung ermöglicht und mich immer ermutigt haben. Danke an meine Schwester, auf die ich immer zählen kann.

Besonderer Dank kommt Prof. Harald Raupenstrauch für die Aufnahme in sein Team zu. Mein Dank gilt des weiteren Klaus Doschek-Held für die Betreuung und die vielen Inputs. Im Zuge dessen möchte ich Anna Krammer ein großes Dankeschön dafür aussprechen, dass sie mir alles gezeigt und jede meiner Fragen beantwortet hat. Auch bei allen Menschen, die ich im Laufe meiner Zeit am Institut kennengelernt und mich in jeglicher Art und Weise unterstützt haben, möchte ich im Zuge dieser Arbeit meinen Dank aussprechen.

Danke an meine Freunde Anja, Juki, Magda, Sarah, Sebastian, Selina, Stephan und Vik, die meine Studienzeit so viel schöner gemacht und mit unfassbar vielen Erlebnissen bereichert haben. Ein großes Dankeschön an Simon, der nicht nur der beste Lernparnter gewesen ist, den ich mir hätte wünschen können, sondern auch zu einem engen Freund geworden ist. Ich möchte mich auch bei allen Wegbegleiter:innen bedanken, die ich im Rahmen dieses Textes nicht namentlich erwähne.

Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen des von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Projektes „BitKOIN – CO_2-reduzierte Bindemittel durch thermochemische Konversion mineralwolleabfallhaltiger Reststoffkombinationen“ im Programm „Bridge“ durchgeführt. Die Materialcharakterisierung und die Untersuchungen zur Bindemitteleignung der Schlackenfraktion wurden dabei von den Instituten für Materialprüfung und Baustofftechnologie (IMBT) bzw. für Angewandte Geowissenschaften (IAG) an der Technischen Universität Graz (TUG) erbracht.

Kurzfassung

Durch die geänderte Deponieverordnung von 2021 wird ein österreichweites Deponierungsverbot von künstlichen Mineralfasern ab dem Jahr 2027 in Aussicht gestellt. Zu den künstlichen Mineralfasern zählt unter anderem Mineralwolle, die in erster Linie als Dämmmaterial in der Bauindustrie eingesetzt wird. Abfälle aus Mineralwollen, zu denen Glas- und Steinwolle gehören, werden in Österreich derzeit wegen mangelnder Alternativen überwiegend deponiert. Daher müssen bis 2027 Verwertungs- oder Recyclingverfahren für diesen Abfallstrom entwickelt werden.

In diesem Bereich wird an der Montanuniversität Leoben im Zuge des Projektes „BitKOIN“ geforscht. Ein Arbeitspaket sieht dabei vor, dass die Möglichkeit der Verwertung dieser Abfälle in der Zementindustrie untersucht wird. Dabei ist die Idee, diese durch eine thermochemische Behandlung zu einem Sekundärzumahlstoff umzuwandeln, der ähnliche Eigenschaften wie Hüttensand aufweist.

Aus diesem Grund werden in der vorliegenden Arbeit Glas- und Steinwolle mit Korrekturstoffen vermengt, geschmolzen und abschließend nass granuliert. Durch diese Herangehensweise wird ein glasig erstarrtes Granulat hergestellt, das auf dessen chemische Oxidzusammensetzung und bautechnologische Anforderungen analysiert wird.

Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass die Voraussetzungen für das Outputmaterial in Hinblick auf die chemische Zusammensetzung, den Glasgehalt und der hydraulischen Reaktivität erfüllt sind. Eine granulierte Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle mit modifizierter chemischer Zusammensetzung kann somit potenziell als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie eingesetzt werden.

Abstract

The modified Landfill Ordinance of 2021 provides for an Austria-wide landfill ban on artificial mineral fibres from 2027. Artificial mineral fibres include mineral wool, which is primarily used as an insulating material in the construction industry. Waste from mineral wool, which includes glass wool and rock wool, is currently mainly sent to landfill in Austria due to a lack of alternatives. Utilisation or recycling processes must therefore be developed for this waste stream by 2027.

Research is being conducted in this area at the University of Leoben as part of the "BitKOIN" project. One work package involves investigating the possibility of utilising this waste in the cement industry. The idea is to use thermochemical treatment to convert it into a secondary grinding material with similar properties to granulated blast furnace slag.

For this reason, glass wool and rock wool are mixed with corrective substances, melted and then wet granulated in this study. This approach produces a glassy solidified granulate, which is analysed for its chemical oxide composition and structural requirements.

The results of the analyses show that the requirements for the output material are met in terms of chemical composition, glass content and hydraulic reactivity. A granulated mixture of fly ash, glass wool and rock wool with a modified chemical composition can therefore potentially be used as a secondary cementitious material in the cement industry.

Inhaltsverzeichnis

Chemische Formelzeichen VII

Akronyme IX

Abbildungsverzeichnis XI

Tabellenverzeichnis XIII

1 Einleitung 1

1.1 Ziel der Arbeit 2

1.2 Motivation 3

2 Künstliche Mineralfasern 4

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen 6

2.2 Abfallströme und Abfallmengen 10

2.3 Abfallzusammensetzung 11

2.4 Stand der Technik und Forschung in Bezug auf KMF-Recycling 12

2.5 Einsatz von Sekundärzumahlstoffen in der Zementindustrie 16

3 Material und Methode 21

3.1 Zusammensetzungen der eingesetzten Materialien 21

3.2 Datenerhebung 22

3.3 Ermittlung der dynamischen Viskosität 23

3.4 Mischungsrechner 23

3.5 Ermittlung des Schmelztemperaturbereiches ... 24
3.6 Thermochemische Behandlung ... 26
4 Durchführung ... 29
4.1 Datenaufbereitung und -auswertung ... 29
4.2 Thermo-optische Untersuchung der Materialien ... 30
4.3 Elevatorofen ... 31
5 Ergebnisse und Diskussion ... 34
5.1 Statistische Auswertung der Literaturdaten ... 34
5.2 Erstellung der ternären Diagramme ... 36
5.3 Untersuchung der dynamischen Viskosität ... 39
5.4 Vom Mischungsrechner kalkulierte Oxidgehalte ... 42
5.5 Bestimmung der Schmelzbereiche ... 43
5.6 Temperaturerfassung unter Einsatz der Infrarotkamera ... 47
5.7 Massenverlust ... 50
5.8 Oxidgehalt des Outputmaterials ... 50
5.9 Reaktivität und Bindemitteleignung ... 54
6 Zusammenfassung und Ausblick ... 57
7 Literaturverzeichnis ... 61
Anhang ... 75

Chemische Formelzeichen

Al_2O_3	Aluminiumoxid
B_2O_3	Bortrioxid
$Ca(OH)_2$	Portlandit
$CaCO_3$	Calciumcarbonat
CaO	Calciumoxid
Cl	Clor
Cr	Chrom
Fe_2O_3	Eisen(III)-oxid
FeO	Eisenoxid
K_2O	Kaliumoxid
MgO	Magnesiumoxid
Mn	Mangan
MnO	Mangan(II)-oxid
Na_2O	Natriumoxid
P_2O_5	Phosphorpentoxid
S	Schwefel

SiO_2	Siliciumdioxid
SO_3	Schwefeltrioxid
TiO_2	Titandioxid
V	Vanadium

Akronyme

AAM	alkali-aktiviertes Material
AbfVVO	Abfallverzeichnisverordnung
BAWP	Bundes-Abfallwirtschaftsplan
BitKOIN	Projekttitel: Entwicklung CO_2-reduzierter Bindemittel durch thermochemische Konversion mineralwollabfallhaltiger Reststoffkombinationen
DVO	Deponieverordnung
EU	Europäische Union
EUCEB	European Certification Board for Mineral Wool Products
FMI	Fachvereinigung Mineralwolleindustrie
GW	Glaswolle
HP7	Hazardous Properties
HÜS	Hüttensand
IEA	Internationale Energieagentur
IR	Infrarot
KMF	künstliche Mineralfasern
MR	Mischungsrechner

RAL	Reichs-Ausschuss für Lieferbedingungen; Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.
RBV	Recycling-Baustoffverordnung
REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
RecyMin	Projekttitel: Recycling künstlicher Mineralfasern
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
SN	Schlüsselnummer
SW	Steinwolle
SZS	Sekundärzumahlstoff
US-B	Projekttitel: Upcycling von Hüttenreststoffen zu neuen, nachhaltigen Bindemitteln in der Baustoff-Kreislaufwirtschaft
VÖZ	Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie
Wool2Loop	Mineral wool waste back to loop with advanced sorting, pre-treatment, and alkali activation

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Übersicht über künstlich hergestellte Fasern [12] 4

Abbildung 2-2: KMF-Produkte für Rohr- (links) und Gebäudeisolierungen (rechts) [14, 15] 5

Abbildung 2-3: RAL-Gütesiegel (links) und EUCEB-Gütesiegel (rechts) [24–26] 7

Abbildung 2-4: Einsatzmengen sekundärer Zumahlstoffe in der österreichischen Zementindustrie von 2017 bis 2022 [84] 17

Abbildung 2-5: Weltweite Zementproduktion nach Materialzusammensetzung im Szenario der nachhaltigen Entwicklung der IEA [92] 19

Abbildung 3-1: Nassgranulationsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben mit Pumpe (1), Horizontalrinne (2), Auffangkorb (3) und Granulierbecken (4) 27

Abbildung 4-1: Exemplarische Darstellung der Schattenbilder des Erhitzungsmikroskops 30

Abbildung 5-1: Ternäres Diagramm für Glaswolle inkl. markiertem Zielbereich (orange) für die Verwendung als SZS; Daten aus [7, 37, 39–41, 44–49, 52, 53, 67–70, 72, 105–107] 37

Abbildung 5-2: Ternäres Diagramm für Steinwolle inkl. markiertem Zielbereich (orange) für die Verwendung als SZS; Daten aus [7, 13, 33, 37–66, 72, 106] 38

Abbildung 5-3: Dynamische Viskosität von Glaswolle vor (oben) und nach (unten) 1998 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Urbain [96] inkl. Viskositätsbereich für Hüttensand nach Ehrenberg [110] 40

Abbildung 5-4: Dynamische Viskosität von Steinwolle vor (oben) und nach (unten) 1998 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Urbain [96] inkl. Viskositätsbereich nach Ehrenberg [110]..... 41

Abbildung 5-5: Schattenbilder bei Halbkugel- (links) und Schmelztemperatur (rechts) von Versuch A 45

Abbildung 5-6: Schattenbilder bei Halbkugel- (links) und Schmelztemperatur (rechts) von Versuch B 45

Abbildung 5-7: Schattenbilder bei Halbkugel- (links) und Schmelztemperatur (rechts) von Versuch C46

Abbildung 5-8: Prozentuelle Flächenänderung bei steigender Temperatur im Erhitzungsmikroskop. 47

Abbildung 5-9: Aufnahme des Abgusses mit der IR-Kamera mit ε = 0,85..... 48

Abbildung 5-10: Gemessener Temperaturverlauf beim Abguss mit der IR-Kamera mit ε = 0,85 inkl. Markierung von Start und Ende des Abgusses..... 49

Abbildung 5-11: Darstellung der Oxidgehalte der Mischung nach der thermochemischen Behandlung im Dreistoffdiagramm inkl. markiertem Zielbereich (orange) für die Verwendung als SZS 53

Abbildung 5-12: Gegenüberstellung der kumulativen Wärme der thermochemisch behandelten Proben mit dem berechneten R_s-Wert inkl. des Richtwertes der kumulativen Wärme (schwarzer Strich) 56

Abbildung 6-1: Literaturwerte von Glas- und Steinwolle im Dreistoffdiagramm 58

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Schlüsselnummern für Mineralfaserabfälle nach der österreichischen Abfallverzeichnisverordnung 2020, Fassung 16.03.2023 [29] 9

Tabelle 2-2: Aufkommen von künstlichen Mineralfaserabfällen in Österreich von 2019-2021 [36].... 11

Tabelle 2-3: Chemische Zusammensetzung von Mineralwolledämmstoffen nach Müller et al. [17] .. 12

Tabelle 2-4: Kriterien für die Herstellung von Hüttensand nach [93, 94] 20

Tabelle 3-1: Zusammensetzung von Hüttensand, Glas- und Steinwolle sowie Flugasche nach RFA [21] 22

Tabelle 3-2: Im Mischungsrechner hinterlegte Randbedingungen und Grenzwerte..... 24

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung von Steinwolle und Steinwolleabfall aus Sampl [101] 25

Tabelle 3-4: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung von Glaswolle und Glaswolleabfall aus Sampl [101] 25

Tabelle 3-5: Technische Spezifikationen des Elevatorofens [102] 26

Tabelle 4-1: Heizprogramm des Erhitzungsmikroskops 31

Tabelle 4-2: Heizprogramm des Elevatorofens 31

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle 32

Tabelle 4-4: Einwaagemengen Hauptversuche 32

Tabelle 4-5: Versuchsparameter der Nassgranulationsanlage 33

Tabelle 5-1: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Glaswolleproben vor 1998..... 35

Tabelle 5-2: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Glaswolleproben nach 1998 35

Tabelle 5-3: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Steinwolleproben vor 1998..... 35

Tabelle 5-4: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Steinwolleproben nach 1998 36

Tabelle 5-5: Kriterien für Hüttensand nach Norm 15176-1 [109] 37

Tabelle 5-6: Vom Mischungsrechner berechnete Oxidgehalte vor und nach der thermochemischen Behandlung..... 42

Tabelle 5-7: Ergebnis der Grenzwerte und Randbedingungen des MR 43

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung von Glas- und Steinwolle 43

Tabelle 5-9: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung für die Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle..... 44

Tabelle 5-10: Ergebnisse der manuellen Bestimmung von Halbkugel- und Schmelztemperatur..... 46

Tabelle 5-11: Ergebnisse der Abgussdauer und Temperaturbestimmung anhand Infrarotkamera-Daten 49

Tabelle 5-12: Masse des Probenmaterials vor und nach der thermochemischen Behandlung 50

Tabelle 5-13: Oxidgehalte von Hüttensand aus den Vorversuchen..... 51

Tabelle 5-14: Oxidgehalte der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle (A-C) im Vergleich mit den theoretischen Oxidgehalten des Mischungsrechners (MR) 52

Tabelle 5-15: Glasgehalte der thermochemisch behandelten Proben von Hüttensand (HÜS A-HÜS C) sowie der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle (A-C) 54

Tabelle 5-16: Berechnete R_s-Werte der thermochemisch behandelten Proben von Hüttensand (HÜS A-HÜS C) sowie der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle (A-C)..... 54

Tabelle 5-17: Ergebnisse des R^3-Tests 55

1 Einleitung

Mit dem europäischen Grünen Deal [1] hat sich die Europäische Union (EU) das Ziel gesetzt, bis zum Jahr 2050 die Klimaneutralität zu erreichen. Dabei spielt es eine wichtige Rolle, dass alle Sektoren – Energiewirtschaft, Gebäude, Industrie, Verkehr und Landwirtschaft – gleichermaßen darin eingebunden werden, um Maßnahmen zur Ressourcenschonung und Emissionsminderung zu implementieren. [2] Auch das effiziente Nutzen von Nebenprodukten und Recycling von Abfällen stellt einen wichtigen Faktor zur Erreichung dieses Zieles dar. Laut Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union [3] soll das Deponieren von gewissen Abfallströmen in den kommenden Jahren deutlich reduziert werden. Außerdem soll es ab 2030 Beschränkungen für die Deponierung jener Abfälle geben, die zum Recycling oder anderen Formen von Material-, Wärme- und Energierückgewinnung herangezogen werden können. [3]

Infolgedessen wurde im April 2021 in Österreich eine Novellierung der Deponieverordnung (DVO) durchgeführt, die ein Deponierungsverbot von künstlichen Mineralfasern (KMF) ab dem Jahr 2027 vorsieht. Daher sollen bis Ende 2024 Recycling- oder Verwertungsmöglichkeiten für künstliche Mineralfaserabfälle auf deren Verfügbarkeit sowie technologischen Reifegrades geprüft werden. [4]

Die künstlichen Mineralfasern finden überwiegend in der Bauindustrie als Dämmstoffe Anwendung, wobei vor allem Glas- und Steinwolle eingesetzt werden. [5] Damit das Deponierungsverbot für diese Abfälle umgesetzt werden kann, müssen Anwendung-, Verwertungs- und/oder Recyclingmöglichkeiten gefunden werden.

Die Montanuniversität Leoben beschäftigt sich in Kooperation mit Partnerunternehmen aus der Industrie im Zuge des Projektes „BitKOIN [6] – Entwicklung CO_2-reduzierter Bindemittel durch thermochemische Konversion mineralwollabfallhaltiger Reststoffkombinationen“ – mit der optimalen

Kreislaufführung mineralwollehaltiger Reststoffkombinationen, wobei das Ziel ist, diese in der Zementindustrie als reaktive Bindemittelkomponente einzusetzen.

KMFs können dabei auf zwei Arten eingesetzt werden: Einerseits als Sekundärrohstoff für die Zementklinkererzeugung und andererseits als Sekundärzumahlstoff (SZS) bei der Zementherstellung. [7] In der gegenständlichen Arbeit wird die Vorbereitung und Eignung von thermochemisch behandelten Mineralfaserabfällen für den möglichen Einsatz als Sekundärzumahlstoff beschrieben, da im Zuge des BitKOIN Projektes ein Klinkersubstitut in Anlehnung an Hüttensand erzeugt werden soll.

1.1 Ziel der Arbeit

Im Rahmen der gegenständlichen Arbeit sollen wissenschaftliche Erkenntnisse in Bezug auf eine thermochemische Behandlung von Abfällen aus künstlichen Mineralfasern erarbeitet werden, wobei der Fokus auf Glas- und Steinwolle liegt. Dabei werden durch eine Literaturrecherche historische Daten gesammelt und analysiert, um Bereiche und Spannweiten für die Zusammensetzung der Produkte bzw. der Abfälle zu definieren. In weiterer Folge erfolgt die Untersuchung der Proben aus Glas- und Steinwolle sowie einer durch den Einsatz eines Mischungsrechners (MR) erstellen Mischung aus diesen Komponenten im Erhitzungsmikroskop. Diese thermo-optische Charakterisierung dient dazu, den Schmelzbereich der Untersuchungsmaterialien zu abzugrenzen.

Im nächsten Schritt findet die thermochemische Behandlung der Mischung im Elevatorofen statt. Dabei sind Vorversuche mit Hüttensand als Referenzmaterial vorgesehen, um Erkenntnisse zu gewinnen, inwiefern sich Heizrate, Behandlungsdauer und Haltezeit auf die Eigenschaften der Probe auswirken, wenn der Tiegel bei unterschiedlichen Temperaturen in den Ofenraum gestellt wird. Auch im Zuge der Hauptversuche soll ein Probentiegel zu einem späteren Zeitpunkt und bei höherer Temperatur im Elevatorofen platziert werden, um den Einfluss des Reduktionspotentials bestimmen zu können. Nach der thermochemischen Behandlung wird die gezielte Abkühlung durch eine nachfolgende Nassgranulation durchgeführt.

Der Abguss der Schmelze wird zudem mit einer Infrarotkamera aufgenommen, um die Temperatur sowie die Abgussdauer des thermochemisch behandelten Materials messen zu können. Das granulierte Material wird in weiterer Folge auf dessen chemische Zusammensetzung, den Glasgehalt und die Reaktivität untersucht.

Diese Vorgehensweise wird herangezogen, weil es das längerfristige Ziel des Projektes BitKOIN ist, ein Zementklinkersubstitut, das ähnliche Eigenschaften wie Hüttensand hat, herzustellen.

1.2 Motivation

Die Deponierung von Mineralfaserabfällen stellt aufgrund des großen Volumens, der geringen Schüttdichte, der hohen Elastizität, der schlechten Kompressibilität sowie der daraus resultierenden mangelnden Stabilität eine technische Herausforderung dar. [7] Zudem verfolgt die Europäische Union das Ziel, die Recyclingraten von Bau- und Abbruchabfällen zu steigern, da in der EU-Abfallrahmenrichtlinie (RL2008/98/EG) Abfallvermeidung sowie Wieder- bzw. Weiterverwendung von Abfällen an oberster Stelle in der fünf-stufigen Abfallhierarchie genannt werden. [8, 9]

Vor allem stellt jedoch die Änderung der österreichischen Deponieverordnung einen wichtigen Ausgangpunkt der gegenständlichen Abschlussarbeit dar. Diese sieht ein Deponierungsverbot für künstliche Mineralfasern ab dem 01.01.2027 vor. Bis dahin sollen Verfahren zum Recycling bzw. zur Verwertung dieser Abfälle evaluiert werden.

2 Künstliche Mineralfasern

Bei künstlichen Mineralfasern handelt es sich grundsätzlich um synthetisch hergestellte Fasern. [10] Diese Stoffgruppe lässt sich zudem in organische Synthesefasern und in anorganische KMF unterteilen. Glas- und Steinwolle fallen in die letzte genannte Gruppe und zählen innerhalb dieser zu der Untergruppe der glasartigen Fasern, wobei der Schwerpunkt dieser Arbeit auf ebendiesen liegt. Diese werden überwiegend aus Recyclingglas bzw. Glasabfällen sowie magmatischen Gesteinen hergestellt. [11] Die Abbildung 2-1 gibt einen Gesamtüberblick über die Stoffgruppe der künstlich hergestellten Fasern. [12]

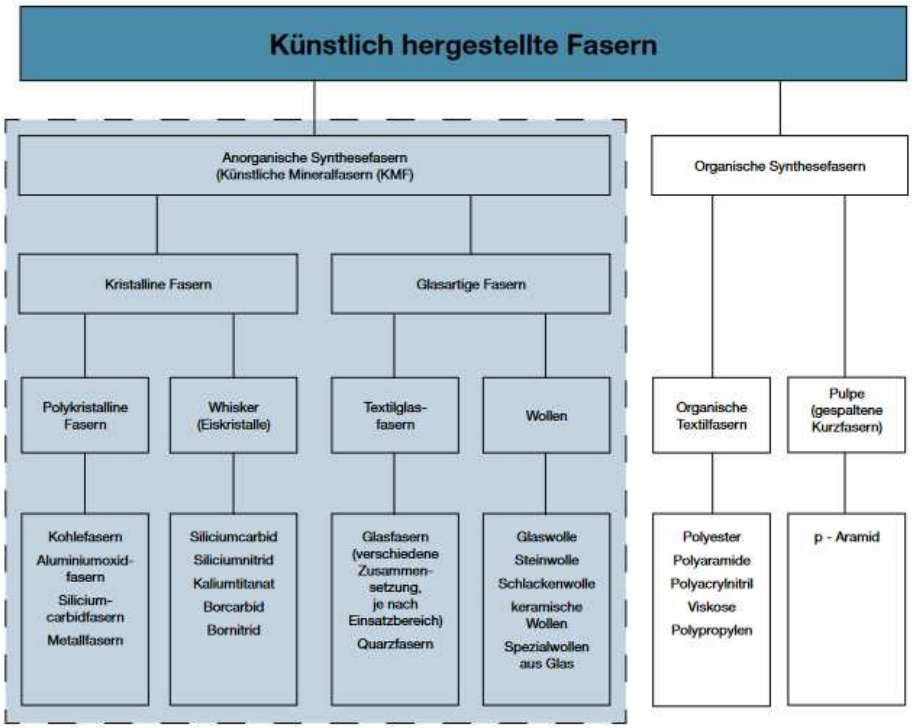

Abbildung 2-1: Übersicht über künstlich hergestellte Fasern [12]

Glas- und Steinwolle werden aktuell überwiegend in der Dämmstoffindustrie eingesetzt. [5] Aufgrund ihrer guten Eigenschaften in Bezug auf Schall-, Wärme- und Brandschutz finden sie vor allem im Gebäudesektor zur akustischen und thermischen Isolierung Anwendung. [13] Abbildung 2-2 zeigt beispielhafte Bilder von KMF für die Anwendung im Gebäude als Platten oder Rollen sowie für den Einsatz als Rohrisolierung. [14, 15]

Abbildung 2-2: KMF-Produkte für Rohr- (links) und Gebäudeisolierungen (rechts) [14, 15]

Bei vielen Anwendungen sind Glas- und Steinwolle austauschbar, aber bei manchen Anwendungen ist das eine Produkt dem anderen vorzuziehen. Steinwolle wird in der Regel für Hochtemperatur- oder Brandschutzanwendungen bevorzugt, und Glaswolle wird häufig verwendet, wenn ein geringes Gewicht entscheidend ist. [16]

Steinwolle

Um Steinwolle herzustellen, werden Diabas oder Basalt als Primärrohstoff herangezogen, die zu den vulkanischen Gesteinen zählen. Diese werden zusammen mit Kalkstein und/oder Dolomit bei Temperaturen bis 1500 °C in mit Kohle befeuerten Kupolöfen geschmolzen, bevor sie einer Zerfaserungsmaschine zugeführt werden. [17]

Hierbei wird zwischen zwei Verfahren unterschieden. Beim Schleuderverfahren wird die flüssige Schmelze auf schnell drehende Metallwalzen geleitet und durch die Drehbewegung zu Fasern geschleudert. Beim Düsenverfahren fließt die Schmelze durch eine große Anzahl an Düsen, wodurch Fäden entstehen, die unter Einsatz von im Überdruck stehenden Dampf oder Druckluft zu Fasern verarbeitet werden. [18] Steinwolle besteht aus ungefähr 40-45 m.-% SiO_2, 16-18 m.-% Al_2O_3, 16-18 m.-% CaO und 9-12 m.-% MgO, wobei die genauen Zusammensetzungen variieren. [19]

Glaswolle

Zur Herstellung von Glaswolle kommen die Komponenten Quarzsand, Soda und Kalkstein zum Einsatz, die auch in der Glasindustrie verwendet werden. [17] Dabei kann bis zu 80 m.-% Altglas als Sekundärrohstoff zugegeben werden. [20] Glaswolle setzt sich aus etwa 60-65 m.-% SiO_2, 16 m.- % Na_2O und 7 m.-% CaO zusammen. [19] Sie wird bei ungefähr 1200°C in Erdgas befeuerten Glaswannen geschmolzen und anschließend zerfasert. [17] Dafür wird häufig das sogenannte Zieh-Blas-Verfahren eingesetzt, bei dem ein dünner Glasschmelzestrahl in einen Metallkorb trifft, der sich schnell dreht, um dort durch viele kleine Löcher in der Außenwand des Korbes herausgeschleudert zu werden. Mittels Gasbrenner und Druckluft werden die dabei entstehenden Fäden zu Fasern gezogen. [18]

Zusatzstoffe

Bei der weiteren Verarbeitung zu Platten, Matten, usw. werden Binde- und Schmälzmittel als Zusatzstoffe beigemengt, wobei Glaswollen mehr Bindemittel enthalten als Steinwollen. [5] Oft werden gelöste Gemische aus Kunstharzverbindungen wie beispielsweise Phenolharze, Harnstoff-Formaldehydharze, modifizierte Maisstärke oder Natriumpolyphosphate als Bindemittel herangezogen. [5] Diese können 5-10 m.-% des Materials ausmachen. [19] Zudem werden Mineralöle, Öl-Wasser-Emulsionen, Silikonöle oder Silikonharze als Schmälzmittel eingesetzt. [5] Die Beimengung dieser erfolgt in einer Konzentration von bis zu 1 m.-% und bewirkt einerseits eine Verminderung der Staubentwicklung und fördert andererseits die wasserabweisende Eigenschaft der Mineralwolle. [17]

2.1 Rechtliche Rahmenbedingungen

Bis zum Jahr 2016 gab es keine gesetzliche Verpflichtung zur sortenreinen Trennung von Mineralfasern, somit konnten die anfallenden Dämmstoffe zusammen mit anderen Baurestmassen bzw. Abbruchmaterialien deponiert werden. Da die Unterscheidung zwischen „alter“ und „neuer“ Mineralwolle (siehe nächster Absatz) keinen Einfluss hatte, wurden diese nicht als gefährlich eingestuft und unterlagen damit auch keiner verpflichtenden Vorbehandlung. Der Umgang mit diesen Abfällen hat sich auch nicht verändert, nachdem den Mineralwollen, die vor 1998 produziert wurden, im Jahr 2014 von der EU-Kommission die gefahrenrelevante Eigenschaft HP7 (Hazardous Properties) „karzinogen“ zugeschrieben worden ist. [7, 21] Erst durch das Inkrafttreten der Recycling-Baustoffverordnung (RBV) 2016 kam es zur Klassifikation der Mineralfaserabfälle als eigenständige

Abfallfraktion und sie wurden unter der Schlüsselnummer SN 31416 „Mineralfasern“ geführt. Dazu kommt, dass die grundsätzliche Unterscheidung zwischen „alter“ und „neuer“ Mineralwolle getroffen wurde, wobei die Abgrenzung mit der biologischen Halbwertszeit festgelegt ist. [22]

„Alte“ Mineralfasern gelten aufgrund ihrer kritischen Fasergeometrie als alveolengängig und können aufgrund ihrer Biopersistenz vom Körper nicht abgebaut werden. Laut der Verordnung zur Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen sind die Stäube dieser Fraktion zudem als karzinogen einzustufen. [23]

Mineralwolle, die nach 1998 hergestellt wurde, besitzt eine biologische Halbwertszeit von weniger als 40 Tagen, gilt damit nachweislich als gesundheitlich unbedenklich und wird als „neue“ Mineralwolle bezeichnet. Somit sollten Abfälle der „neuen“ Mineralwolle auf Deponien für nicht gefährliche Abfälle entsorgt werden, da nur Abfälle aus „alter“ Mineralwolle als gefährlich eingestuft werden. Dennoch konnte meist nicht nachvollziehbar zwischen diesen beiden Fraktionen unterschieden werden. [22]

„Neue“ Mineralwolle unterliegt höheren Anforderungen bezüglich der Produktqualität und gilt somit als nicht krebserregend. [23] Diese werden seit 1998 gekennzeichnet und müssen mit spezifischen Gütesiegeln versehen sein, die sowohl die Qualität des Produktes als auch die gesundheitliche Unbedenklichkeit sicherstellen. [24]

Sind diese Anforderungen erfüllt, können die Produkte mit dem Gütezeichen vom Deutschen Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V. (RAL-Gütezeichen) oder dem European Certification Board for Mineral Wool Products (EUCEB-Gütezeichen) gekennzeichnet werden. [24–26] Die entsprechenden Kennzeichnungen sind in Abbildung 2-3 ersichtlich.

Abbildung 2-3: RAL-Gütesiegel (links) und EUCEB-Gütesiegel (rechts) [24–26]

Durch diese Gutesiegel sind auch die Grenzwerte der chemischen Zusammensetzungen der KMF geregelt. EUCEB legt beispielsweise fest, dass die maximale Abweichung des gemessenen Oxids im Vergleich zur getesteten Faser bei einer Konzentration von über 15 % die maximal zulässige Abweichung +/- 10 % mit einer Obergrenze von 2,5 %-Punkten betragen darf. [26]

Da jedoch im Zuge der RBV keine Regelung zur Entsorgung erfolgt ist, kam es zu einer rechtlichen Lücke, der 2017 mit einer Änderung der Schlüsselnummer entgegenwirkt werden sollte. [21]

Auf Basis dessen muss für die richtige Zuordnung zwischen gefährlichen und nicht gefährlichen Abfällen unterschieden werden. Neue und somit nicht gefährliche Mineralfaserabfälle dürfen der Schlüsselnummer SN 31416 zugeordnet werden, wenn zumindest eine der nachfolgenden Kriterien erfüllt ist: [10]

- Produktion ab 1998 von einem Mitglied der österreichischen Fachvereinigung Mineralwolleindustrie (FMI)
- KMF-Produkte mit Gütesiegel (RAL, EUCEB)
- chemisch-analytischer Nachweis, dass die gefahrenrelevante Eigenschaft HP7 „karzinogen“ nicht zutreffend ist

Ist keines dieser Kriterien erfüllt, musste der Mineralfaserabfall unter der Schlüsselnummer SN 31437 „Asbestabfälle, Asbeststäube“ für gefährliche und als krebserregend eingestufte Asbestabfälle entsorgt werden. [22] Aufgrund der Deponieanforderungen zur Entsorgung von Asbest stiegen auch die Entsorgungskosten für Abfälle aus künstlichen Mineralfasern deutlich an. Lagen die Kosten pro Tonne bis 2016 noch in einem Bereich von 65 bis 90 Euro, hat sich die Preisspanne auf 250 bis 1.500 €/t erhöht und ausgeweitet. [22, 27]

Aufgrund der Unterschiede zwischen Asbest und Mineralwolle sowohl in der chemischen Zusammensetzung als auch in den Eigenschaften wurde 2019 eine neue Abfallverzeichnisverordnung verabschiedet, deren neue Schlüsselnummern ab dem 01.01.2022 in Kraft getreten sind. Damit soll eine Entsorgung von Dämmstoffen durch eine verstärkte Diversifizierung der Kategorie „Mineralfaserabfälle“ erleichtert werden. [21] Tabelle 2-1 listet die aktuell gültigen Schlüsselnummern für die Zuordnung von Mineralfaserabfällen nach der Novellierung des österreichischen Abfallverzeichnisverordnung auf. [28, 29] Die im Gesetzestext verwendeten Abkürzungen „g“ sowie „gn“ stehen für „gefährlich“ und „gefährlich, nicht ausstufbar“.

Tabelle 2-1: Schlüsselnummern für Mineralfaserabfälle nach der österreichischen Abfallverzeichnisverordnung 2020, Fassung 16.03.2023 [29]

Abfallart	SN	SN-Spezifizierung	g/gn	Spezifizierung
Mineralfaserabfälle ohne gefahrenrelevante Fasereigenschaften	31416	42		Steinwolle
	31416	43		Glaswolle
	31416	44		Mischungen aus Steinwolle und Glaswolle
Mineralfaserabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften	31437	40	gn	Asbestabfälle, Asbeststäube
	31437	41	gn	Künstliche Mineralfaserabfälle
	31437	42	gn	Steinwolle
	31437	43	gn	Glaswolle
	31437	44	gn	Mischungen aus Steinwolle und Glaswolle

Am 21. April 2021 wurde die neue Novelle zur Deponieverordnung veröffentlicht. [30] Diese sieht für die Deponierung künstlicher Mineralfasern erhebliche Änderungen vor. Für künstliche Mineralwolleabfälle ohne gefahrenrelevante Eigenschaften, die unter die SN 31416 fallen, bleiben die Bedingungen zur Deponierung unverändert. Für jene mit gefahrenrelevanten Eigenschaften gelten seither gänzlich neue Regelungen. Sie dürfen in Deponien für nicht gefährliche Abfälle ohne analytische Untersuchungen gelagert werden, wenn sie unter die Bedingungen der DVO 2021 §10c Absatz 1 fallen:

> *„1) Sofern die Kompartimente nicht ausschließlich für künstliche Mineralwolleabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften genehmigt sind, müssen diese Abfälle in eigenen Kompartimentsabschnitten abgelagert werden. Die Ablagerung in einem Kompartiment oder Kompartimentsabschnitt für Asbestabfälle ist zulässig.*
>
> *2) Die zu deponierenden künstlichen Mineralwolleabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften dürfen keine anderen gefährlichen Stoffe enthalten. Sind andere gefährliche Stoffe bekannt oder zu vermuten, sind diese zu analysieren und die Anforderungen des jeweiligen Kompartiments für diese Stoffe einzuhalten.*
>
> *3) Die künstlichen Mineralwolleabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften müssen entweder verpackt, verpackt und gepresst oder zerkleinert und konditioniert angeliefert werden. Das Unternehmen, das die Verpackung oder Konditionierung vornimmt, hat zu bestätigen, dass ausschließlich künstliche Mineralwolleabfälle mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften unter Berücksichtigung der Z 2,*

gegebenenfalls konditioniert, unter Angabe Konditionierungsverfahrens und der verwendeten Bindemittel, enthalten sind. […]

9) Der Deponieinhaber hat geeignete Maßnahmen zur Einschränkung der möglichen Nutzung des Geländes zu ergreifen, um zu verhindern, dass Menschen in Kontakt mit künstlichen Mineralwolleabfällen mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften kommen.“ [4]

Dies bringt zwar Erleichterungen in der Entsorgung, doch aufgrund der in Absatz 1 Punkt 3 geforderten Aufbereitungsschritte kommt es zu einer weiteren Teuerung der Deponiekosten. Daher sind die Entsorgungskosten des Abbruchmaterials von 250 €/t auf über 1300 €/t gestiegen. [31]

Zudem kommt es ab 01. Jänner 2027 zum österreichweiten Ablagerungsverbot für KMF. Bis Ende 2024 sollen vom Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie nationale Recycling- oder Verwertungsmöglichkeiten für künstliche Mineralfaserabfälle auf Etablierung und ausreichender Verfügbarkeit innerhalb Österreichs geprüft werden. Auf Basis dieser Ergebnisse soll eine notwendige Anpassung des Termins des Inkrafttretens des Deponierungsverbots überprüft und bei Bedarf umgesetzt werden. [4]

2.2 Abfallströme und Abfallmengen

In Bezug auf die Abfallströme von KMF lassen sich nach Gefährlichkeitseinstufung und Recyclingpotential drei Quellen unterscheiden: anfallende Produktions- bzw. Prozessabfälle, die bei der Herstellung von Produkten aus Mineralwolle entstehen, Verschnittabfälle, die beim Einbau entstehen, und Abfälle aus dem Abbruchsektor. [32] Einer Schätzung zufolge wurden im Jahr 2017 ungefähr 2,45 Millionen Tonnen künstlicher Mineralwolle in Europa produziert. [33] Ungefähr 5 % dieser Menge lassen sich in weiterer Folge den Prozessabfällen bzw. den Verschnittabfällen zuschreiben, während die restlichen 95 % nach einer rechnerischen Nutzungsdauer von etwa 30 Jahren als Abfall im Abbruchsektor anfallen. [17]

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass bei der thermochemischen Sanierung eines Einfamilienhauses durchschnittlich etwa 50 m³ Mineralwolle anfallen, was ungefähr einer Masse von 2,5 Tonnen entspricht. [34] Laut einer Schätzung des Baukonzerns Porr Österreich werden in Österreich jährlich ungefähr 24.000 Tonnen an Mineralwolleabfall deponiert. [35] Im Vergleich dazu ergab eine Schätzung der Wirtschaftskammer Österreich im Jahr 2018 eine deponierte Menge von 20.000 bis 30.000 Tonnen pro Jahr. [7] Bei beiden Aussagen gibt es jedoch keine genaueren Angaben

bezüglich der Zuordnung zu den Schlüsselnummern und dem mengenmäßigen Anfall in den einzelnen Kategorien.

Im Statusbericht des Bundes-Abfallwirtschaftsplan (BAWP) 2023 wird das Aufkommen von Abfällen aus künstlichen Mineralfasern in den Jahren 2019 bis 2021 zahlenmäßig veranschaulicht. [36] In Tabelle 2-2 werden diese Zahlen aufgegriffen.

Tabelle 2-2: Aufkommen von künstlichen Mineralfaserabfällen in Österreich von 2019-2021 [36]

SN	Bezeichnung	Einheit	2019	2020	2021
31416	Mineralfaserabfälle ohne gefahrenrelevante Fasereigenschaften	[t]	4780	3660	2710
31430	verunreinigte Mineralfaserabfälle ohne gefahrenrelevante Fasereigenschaften	[t]	1450	600	840

Bei Betrachtung der Daten in Tabelle 2-2 ist zu beachten, dass 2021 weitere 18.960 t Abfälle der SN 31437 g Asbestabfälle, Asbeststäube angefallen sind, die jedoch nicht nur Asbest beinhalten, sondern auch künstliche Mineralfasern mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften. [36]

Obwohl die Bauindustrie ist die wichtigste Abfallquelle für künstliche Mineralfasern und verantwortlich für circa 35 % aller Abfälle in Europa ist, gibt es immer noch zu wenig Kenntnis über die genaue Zusammensetzung dieser. [13]

Die KMF-Abfälle sind am Ort der Entstehung getrennt zu sammeln, wobei eine Staubfreisetzung zu verhindern ist. Die Vermeidung dieser ist in weiterer Folge auch beim Transport und der Zwischenlagerung aufgrund des damit verbundenen Gesundheitsrisikos zu beachten: Ungefährliche KMFs sollen daher abgedeckt transportiert werden, während gefährliche nur in reißfesten, staubdichten sowie verschließbaren Kunststoffsäcken befördert werden dürfen. [10]

2.3 Abfallzusammensetzung

Wie in Kapitel 2.2 erwähnt, gibt es trotz einer separat anfallenden Menge an Abfall aus künstlichen Mineralfasern in der Bauindustrie kaum Kenntnisse über deren Zusammensetzung, vor allem nicht im Hinblick auf die diversen Verunreinigungen.

Jedoch gibt es viele wissenschaftliche Veröffentlichungen, die sich bereits mit Glas- und Steinwolle und deren Beschaffenheit über einen großen Zeitraum hinweg auseinandergesetzt haben. Dabei

wurden auch die einzelnen Bestandteile und Anteile dieser in den KMF-Produkten untersucht sowie publiziert und bilden die Basis für die angestrebte Literaturrecherche. [13, 33, 37–71]

Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass die Zusammensetzung der Glaswolleproben kaum variiert, während bei Steinwolleproben variable Gehalte von Kalzium, Magnesium und Eisen festgestellt werden können. Elemente wie Barium, Nickel und Chrom, die potenziell toxisch sind, lassen sich ebenfalls nachweisen, jedoch in sehr geringen Konzentrationen von < 0,2 m.-%. [72]

Zudem sind Unterschiede in den Oxidgehalten von Glas- und Steinwolle zu erkennen. Diese zeigen sich sowohl in den Daten von Müller et al. [17], die in Tabelle 2-3 abgebildet sind, als auch in jenen der Europäischen Kommission [16]. Die chemische Verbindung Bortrioxid (B_2O_3) lässt sich nur in Glaswolleproben nachweisen. Ebenso sind Natriumoxid (Na_2O), Bariumoxid (BaO) und Kaliumoxid (K_2O) bei Glaswolle deutlich ausgeprägter enthalten. Währenddessen sind die Anteile von Titanoxid (TiO_2), Magnesiumoxid (MgO) und Eisen(III)-oxid (Fe_2O_3) in Steinwolleproben höher. [16, 17]

Müller et al. [17] definiert außerdem eine Reihenfolge der Hauptoxide mit SiO_2 > CaO > Al_2O_3 > Fe_2O_3 + FeO, die sich ebenfalls aus den Daten der Tabelle 2-3 ableiten lässt.

Tabelle 2-3: Chemische Zusammensetzung von Mineralwolledämmstoffen nach Müller et al. [17]

	Steinwolle (Stichprobenumfang = 10)		**Glaswolle (Stichprobenumfang = 7)**	
	Minimum	Maximum	Minimum	Maximum
	m.-%		m.-%	
SiO_2	40,72	53,10	48,63	63,83
Al_2O_3	2,45	21,71	0,94	9,29
TiO_2	0,21	2,93	0,00	0,21
Fe_2O_3	0,50	8,84	0,30	1,45
FeO	1,01	7,53	0,09	0,43
MnO	0,06	0,50	0,05	1,18
CaO	10,80	32,70	6,52	28,26
MgO	3,02	12,37	2,92	4,63
BaO	0,11	0,11	0,09	2,50
Na_2O	1,24	10,27	4,43	20,75
K_2O	0,00	1,65	0,28	3,65
B_2O_3	0,00	0,00	3,02	11,78

2.4 Stand der Technik und Forschung in Bezug auf KMF-Recycling

Durch die Faktoren Arbeits- bzw. Gesundheitsschutz sowie Wirtschaftlichkeit wird die grundsätzliche Recyclingfähigkeit von Produkten aus Glas- und Steinwolle stark eingeschränkt. [21] Beim Recycling dieser Abfälle spielt vor allem die Sortenreinheit eine wichtige Rolle. Während sowohl

Produktionsabfälle bei der Herstellung als auch Verschnittabfälle auf der Baustelle idealerweise sortenrein und unvermischt vorliegen, ist das bei den Abfällen aus Sanierungs- und Abbrucharbeiten nicht mehr der Fall, wodurch die Wiederverwertung dieser Stoffe erschwert wird. [73]

2.4.1 Stand der Technik

In diesem Abschnitt werden Verfahren aufgelistet, die bereits im industriellen Maßstab eingesetzt werden und somit als Stand der Technik anzusehen sind. Da es in Österreich zurzeit noch keine Möglichkeit zum Recycling von KMF-Abfällen aus Rückbau- und Abbrucharbeiten gibt, erfolgt die Entsorgung überwiegend auf Deponien. [31] Nach dem Statusbericht des BAWP 2023 wurden KMF-Abfälle ohne gefahrenrelevante Fasereigenschaften im Jahr 2021 zu rund 74 % deponiert, zu rund 25 % verbrannt und zu <1 % exportiert, wobei KMF mit gefahrenrelevanten Fasereigenschaften vollständig deponiert wurden. [36] Auf Basis dieser Zahlen lässt sich das Deponieren von KMF-Abfällen als Stand der Technik ableiten.

Recycling in der Primärproduktion bzw. der Mineralwolleindustrie

Bereits seit 1993 bietet die dänische Rockwool Gruppe das Recycling-System „Rockcycle“ an, bei dem sortenreines, firmeneigenes Verschnittmaterial von der Baustelle in großen Kunststoffbehältern gesammelt und wieder zurückgenommen wird. [21] Diese Idee haben einige andere Unternehmen ebenfalls bei sich etabliert wie beispielsweise Isover und Flumroc AG. [74, 75]

Das Unternehmen Knauff Insulation hat die „**RE**SULATION“ Initiative ins Leben gerufen. Diese Initiative beinhaltet vereinfacht folgende drei Schritte:

1. Die Rückholung von Mineralwolle erfolgt, indem diese auf Bau- und Abbruchstellen gesammelt, sortiert und komprimiert wird.
2. Diese wird nachfolgend dem Recyclingprozess zugeführt. [76] Glaswollereste werden entweder zu Deckenplatten verarbeitet oder einer Qualitätskontrolle unterzogen, anschließend in einer Produktionsstätte zu Glasscherben umgeschmolzen und als Rohstoff für neue Mineralwolle-Dämmstoffe eingesetzt. Steinwollereste werden in „Recycling-Bausteine" umgewandelt, die für die Herstellung neuer Steinwolle verwendet werden können. [77]
3. Anschließend kommt es zur Reintegration dieser Materialien, wodurch sich der Kreislauf der Mineralwolle schließt. [76]

Dabei ist jedoch zu beachten, dass durch die EUCEB-Kriterien der Wiedereinsatz von Sekundärmaterial bzw. Abfall sehr herausfordernd ist. Bei Bau- und Abbruchabfällen kommt es oft zu Verunreinigungen, wodurch die Vorgaben für die Zertifizierungen schwer einzuhalten sind.

2.4.2 Stand der Forschung

In den folgenden Bereichen gab bzw. gibt es bereits erste Forschungsergebnisse für die Verwendung von Abfällen aus künstlichen Mineralfasern. Die Einteilung erfolgt nach den unterschiedlichen Industrien, um ein holistisches Bild über die möglichen Einsatzbereiche zu geben.

Kunststoffindustrie

Vor allem beim Einsatz in Polymerverbundwerkstoffen wird die Verwendung von Mineralwolleabfällen als Füllstoff diskutiert. Dabei wird die Polymermatrix mit sogenannten Füllstoffen kombiniert, um die mechanischen Eigenschaften zu optimieren, wobei vor allem die Einbindung von Steinwolle in Polyethylen untersucht wurde. [78] Dabei kam es zu einer Verringerung der Entzündbarkeit, einem geringeren Masseverlust nach dem Erhitzen sowie zu einer Erhöhung der Biegespannung und der Kerbschlagarbeit. [79] In einer Studie von Sormunen et al. [80] konnte in Zusammenhang damit jedoch ein starker Rückgang der Schlagzähigkeit festgestellt werden.

Holzindustrie

Auch in der Holzindustrie wurde bereits angedacht, Abfälle aus Mineralwolle einzusetzen. Erste Versuche wurden in einer Studie gemacht, in der Steinwolleabfälle in Spanplatten eingearbeitet wurden, um die Entzündbarkeit zu verringern. Diese Verringerung ging jedoch mit einer Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften einher. [81]

Eine andere Studie beschäftigt sich mit Eigenschaften von Holz-Kunststoff-Verbundwerkstoffen unter Verwendung von recycelter Mineralwolle als Füllstoff. Das Ergebnis ist ähnlich der oben genannten Forschung: Es wurde eine deutliche Verbesserung in der Wärmedämmung und der Feuchtigkeitsbeständigkeit festgestellt, was jedoch ebenfalls eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften zur Folge hatte. [82] Nach Yap et al. [78] sind weitere Studien zu den Veränderungen der mechanischen Eigenschaften notwendig.

Baustoffindustrie

In der Baustoffindustrie werden vor allem zwei mögliche Wege zur Verwendung von Mineralwolleabfällen gesehen: Sowohl der Einsatz als Ausgansmaterial zur Herstellung von alkalisch-aktivierten Materialien (AAM) als auch der Einsatz als Sekundärzumahlstoff werden in der Literatur verstärkt diskutiert. [78] Das EU-Projekt „Wool2Loop – Mineral wool waste back to loop with advanced sorting, pre-treatment, and alkali activation“ beschäftigte sich mit Mahl- und Vorbehandlungstechnologien für Mineralwolleabfälle, um durch alkalische Aktivierung Geopolymerbeton zu produzieren. [72]

Im Projekt „RecyMin – Recycling künstlicher Mineralfasern“ wurden weitreichende Untersuchungen von Mineralwolleabfällen angestellt. Von der Entwicklung eines Versatzproduktes aus diesen Abfällen für den untertägigen Bergbau, über die Erstellung eines Konzepts zum Einsatz dieser als Ersatzrohstoff in der Zementindustrie, bis hin zur Erarbeitung eines Konzepts zur Rückführung von diesen Abfällen in die Mineralwolleindustrie erstreckten sich die Betrachtungen. [11] Im Folgeprojekt „BitKOIN“ soll die Kreislaufführung der Mineralwolleabfälle unter Zugabe von Sekundärrohstoffen ermöglicht und aus diesen Reststoffen unter Einsatz einer thermochemischen Behandlung zu einem Substitut für Hüttensand werden. Im Anschluss soll die bautechnische Eignung untersucht und eine Bewertung der Nachhaltigkeit durchgeführt werden. [6]

2.4.3 Herausforderungen bei der Verwendung von Mineralfaserabfällen

In Bezug auf den weiteren Einsatz der Abfälle künstlicher Mineralfasern sind einige mögliche Hürden bereits bekannt. Die Klassifizierung nach dem Ende der Lebensdauer ist eine davon. Auch die Entwicklung geeigneter Trenntechnologien sowie die Erarbeitung von Lösungen für diese Abfälle werden als Herausforderungen angeführt. [83]

Zudem sollten die Abfälle möglichst sortenrein und nicht kontaminiert sein. Der Transport kann aufgrund der geringen Dichte des Materials und des benötigten Volumens teuer sein. Ebenso erfordert die Aufbereitung zu einem komprimierten Zustand zusätzliche Aufwände. [13]

Die Unterscheidung zwischen gefährlichen und nicht gefährlichen Mineralwollfasern auf der Grundlage ihrer chemischen Zusammensetzung ist schwierig, weswegen empfohlen wird, die gefahrenrelevanten Eigenschaften über Persistenzuntersuchungen zu bestimmen, was jedoch sowohl kosten- als auch zeitintensiv ist. [72]

2.5 Einsatz von Sekundärzumahlstoffen in der Zementindustrie

Im Jahr 2022 wurden weltweit ungefähr 4,1 Milliarden Tonnen Zement hergestellt, wobei circa 5,2 Millionen Tonnen davon in Österreich produziert wurden. Zement zählt damit global zu den wichtigsten Baustoffen. [84] Dabei handelt es sich um ein fein gemahlenes, anorganisches und hydraulisch wirkendes Bindemittel, das für Beton und Mörtel eingesetzt wird. [85]

Die Zementindustrie verursacht einen beachtlichen Anteil aller Treibhausgasemissionen. Dieser beläuft sich global gesehen auf 4,5 % und in Österreich auf in etwa 3,3 %, wobei der österreichische Zement im weltweiten Vergleich die niedrigsten CO_2-Emissionen pro Tonne Zement aufweist. [86] Mit Hilfe von Sekundärrohstoffen lassen sich diese weiter verringern, wobei es vor allem zwei Arten gibt, dies zu erreichen: Einerseits durch die Substitution des primären Rohstoffes Kalkstein und andererseits durch die Reduktion des Klinkeranteiles bei der der Herstellung des Zements. [87] Letztere wird in dieser Arbeit genauer erläutert. Die Senkung des Klinkeranteil soll dabei durch den Einsatz von sekundären Zumahlstoffen erzielt werden. Dabei ist das Ziel der Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie (VÖZ), dass der durchschnittlichen Klinkeranteil im Portfolio von derzeit 70 % bis zum Jahr 2040 auf 52 % reduziert wird. [86]

Abbildung 2-4 gibt einen Überblick über die Einsatzmengen der Sekundärzumahlstoffe in der österreichischen Zementindustrie im Zeitraum von 2017 bis 2022. [84]

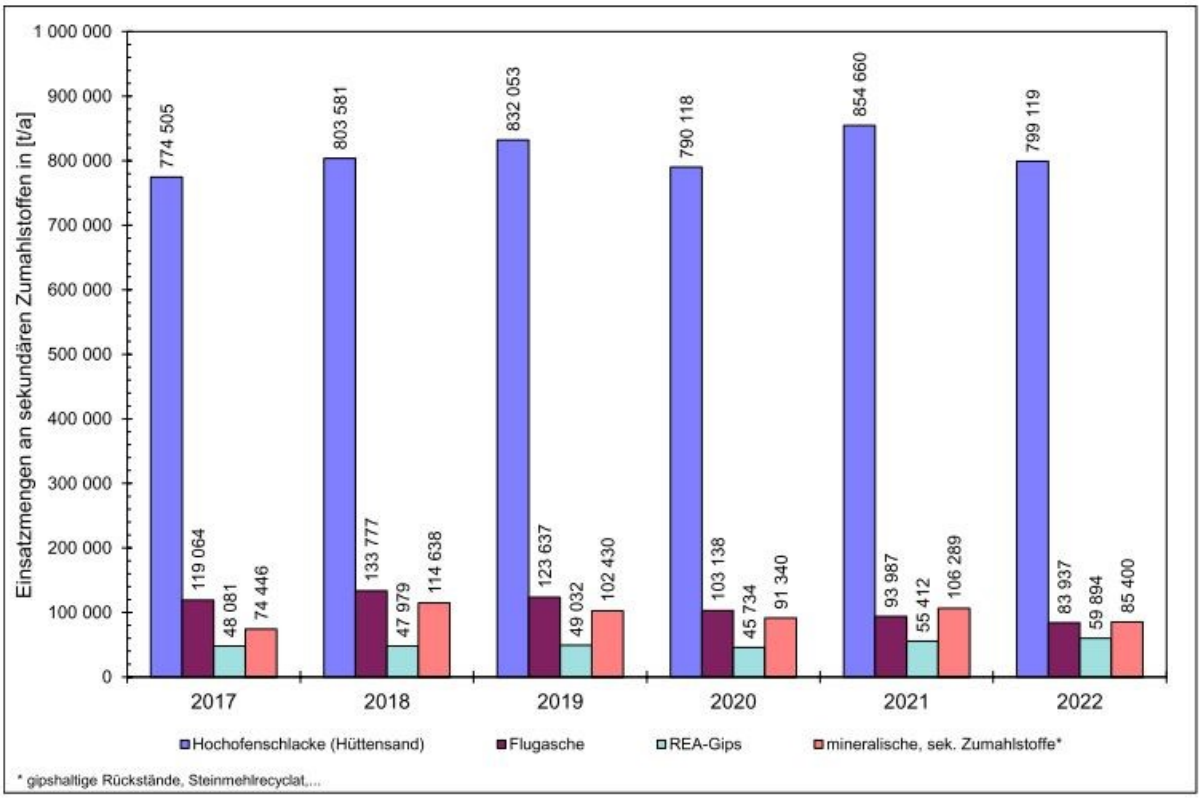

Abbildung 2-4: Einsatzmengen sekundärer Zumahlstoffe in der österreichischen Zementindustrie von 2017 bis 2022 [84]

Nachfolgend wird auf die unterschiedlichen Sekundärzumahlstoffe eingegangen, die bereits in der Zementindustrie verwendet werden.

Hüttensand

Schlacke fällt bei der Erzeugung von Roheisen im Hochofen als Nebenprodukt an, die dann durch die Nassgranulation zu Hüttensand wird. Dieser weist latent-hydraulische Eigenschaften auf und besitzt durch das schnelle Abkühlen einen hohen Glasanteil. Er wird fein gemahlen und dem Klinker beigemengt. [88] Der mit dem latent-hydraulischen Reaktionsvermögen einhergehende Beitrag zur Festigkeits- und Gefügeentwicklung stellt das wichtigste Qualitätsmerkmal des in der Zementindustrie eingesetzten Hüttensandes dar. [89]

Flugasche

Flugasche ist ein industrielles Nebenprodukt von Verbrennungsprozessen in Kraftwerken und ein feinkörniger Staub aus glasigen, kugelförmigen Partikeln. [88] Sie fällt bei der Entstaubung der Rauchgase an, besteht überwiegend aus Siliciumdioxid (SiO_2) und Aluminiumoxid (Al_2O_3) und weist puzzolanische Eigenschaften auf. Aus diesem Grund benötigt dieser Stoff für die Hydratationsreaktion ein Reaktionsprodukt, das beim Anmischen mit Wasser Calciumhydroxid abgibt. [87, 88] Durch den Einsatz von Flugasche lässt sich das Material einerseits leichter bearbeiten und andererseits steigt die Druckfestigkeit, da die Partikel Hohlräume ausfüllen. [90]

REA-Gips

Mit Hilfe von Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) werden schwefelhaltige Verbindungen aus dem Rauchgas von fossil befeuerten Kraftwerken entfernt. Unter Verwendung von Kalkmilch wird Schwefeldioxid gebunden und oxidiert bei Luftzufuhr zu Gips, der qualitativ vergleichbar mit Naturgips ist. [90, 91] REA-Gips wird in der Zementindustrie vor allem als Sulfatträger eingesetzt, da es sich dabei um Calciumsulfat-Dihydrat handelt. [91] Zudem gilt Gips als „Erstarrungsregler“, da dieser die Trocknung von Beton positiv beeinflusst. [90]

Verfügbarkeit von Sekundärzumahlstoffen

Durch die hohen Emissionen bei der Herstellung von Zement spielt das Thema der Dekarbonisierung eine wichtige Rolle für zukünftige Entwicklungen in diesem Sektor. Um dies genauer zu beleuchten, hat die internationale Energieagentur (IEA) im Jahr 2020 den Bericht „Energy Technology Perspectives 2020“ veröffentlicht, der sich unter anderem mit der Zementproduktion beschäftigt. In diesem Report wurden im Szenario für nachhaltige Entwicklung Möglichkeiten aufgezeigt und diskutiert, die sich positiv auf die Emissionswerte auswirken können. Dabei konnte festgehalten werden, dass 14 % der gesamten kumulativen Emissionsreduzierungen für Zement durch eine Senkung des Klinker-Zement-Verhältnisses erzielt werden können. Diese Strategie verringert den Bedarf an emissionsintensivem Klinker durch die Zugabe anderer, weniger energieintensiver Materialien zu Zementmischungen. [92]

In Abbildung 2-5 werden die Ergebnisse dieses Szenarios grafisch dargestellt. Es zeigt deutlich, dass im Jahr 2019 Klinker im weltweiten Durchschnitt etwa 71 % des Zements ausmachte, während ein erheblicher Teil der restlichen Prozent auf Hüttensand und Flugasche aus Kohlekraftwerken entfiel. Das Angebot an diesen Materialien geht im Szenario der nachhaltigen Entwicklung deutlich zurück,

was die Abhängigkeit von Alternativen, wie Kalkstein und calciniertem Ton, erhöht. Während die Verfügbarkeit dieser Materialien in einigen Teilen der Welt eingeschränkt ist, sind die weltweiten Reserven an Rohton mehr als ausreichend, um die prognostizierte Nachfrage zu decken. [92]

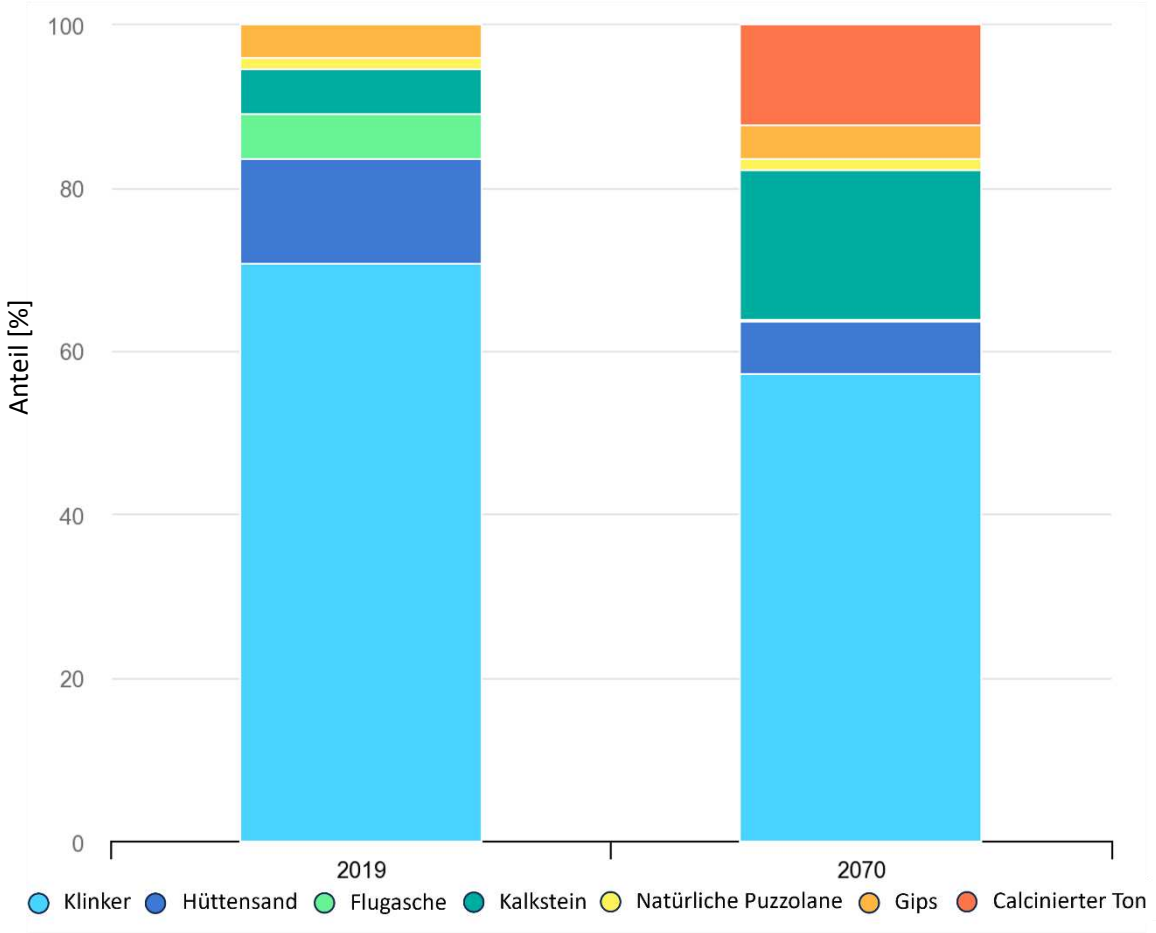

Abbildung 2-5: Weltweite Zementproduktion nach Materialzusammensetzung im Szenario der nachhaltigen Entwicklung der IEA [92]

Aufgrund ebendieser prognostizierten Entwicklungen wird im Zuge des Projektes „BitKOIN“ angestrebt, ein Substitut für Hüttensand herzustellen. Damit kann die Fehlmenge, die bei der Transformation der Eisen- und Stahlindustrie zur Klimaneutralität anfallen wird, kompensiert und zeitgleich ein Beitrag zur CO_2-Reduktion der Zementindustrie geleistet werden.

2.5.1 Kriterien für die Herstellung eines Substitutes für Hüttensand

Die Kriterien, die für die Verwendung von Hüttensand vorgeschrieben sind, gelten in weiterer Folge ebenso für den Sekundärzumahlstoff, der im Zuge des Projektes BitKOIN hergestellt werden soll. Dabei

wird in der Zementnorm EN-197-1 [93] als auch der speziellen Norm für Hüttensand EN-15167 [94] festgelegt, dass HÜS zu mindestens zwei Dritteln aus CaO, MgO und SiO_2 bestehen und das Verhältnis von CaO und MgO zu SiO_2 größer als 1 sein muss. In Tabelle 2-4 werden die wichtigsten Kriterien angeführt.

Tabelle 2-4: Kriterien für die Herstellung von Hüttensand nach [93, 94]

Kriterium	Einheit	
Amorpher Anteil	-	> 2/3
CaO+MgO+SiO_2	m.-%	> 2/3
(CaO+MgO)/SiO_2	-	> 1

Zudem hat Steindl et al. [95, 96] eine empirische Formel entwickelt, mit der eine Einschätzung in Bezug auf die Reaktivität und die Bindemitteleignung getroffen werden kann. Diese ist in Gleichung 2-1 gegeben und basiert auf der chemischen Zusammensetzung und dem Glasgehalt. Der Idealbereich für den R_S-Wert liegt zwischen 30 und 50. Der amorphe Anteil entspricht dabei dem Glasgehalt.

$$R_S = (-1\,SiO_2 - 0{,}55\,FeO - 0{,}48\,MnO + 1{,}99\,Al_2O_3 + 1{,}39\,MgO + 1{,}04\,CaO) \times amorph^{\,1{,}17} \qquad 2\text{-}1$$

3 Material und Methode

In diesem Kapitel werden zuerst die eingesetzten Materialien inklusive ihrer chemischen Zusammensetzung beschrieben. Nachfolgend wird auf die durchgeführte Literaturrecherche und die Datenerhebung eingegangen. In weiterer Folge wird der Mischungsrechner vorgestellt, mit dem die Mischung berechnet wurde, die dann zuerst im Erhitzungsmikroskop auf ihren Schmelztemperaturbereich untersucht wurde. Danach werden die thermochemische Behandlung mit Nassgranulation sowie die Aufbereitungsschritte des Outputmaterials beschrieben.

3.1 Zusammensetzungen der eingesetzten Materialien

Für die Versuche werden Produktproben aus Glas- und Steinwolle herangezogen. Die chemische Zusammensetzung wird als Oxid-Gehalt angegeben. Diese Analysen der Flugasche werden mit einer Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) im Zuge des Projekts „US-B – Upcycling von Hüttenreststoffen zu neuen, nachhaltigen Bindemitteln in der Baustoff-Kreislaufwirtschaft“ vom Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie an der Technischen Universität Graz (TUG) durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Proben von Glas- und Steinwolle wurde im Projekt „RecyMin“ ermittelt.

Es wurden folgende Materialien für die Versuche eingesetzt, deren chemische Zusammensetzung in Tabelle 3-1 einzusehen ist:

1. Referenzmaterial: Für die Vorversuche wurde Hüttensand HÜS 4500 verwendet.

2. Glaswolle: Die eingesetzte Glaswolle ist von der Firma Saint-Gobain ISOVER Austria GmbH vom Typ 604818.
3. Steinwolle: Für die Steinwolleprobe wurde Sonorock 035 der Firma ROCKWOOL Handelsgesellschaft m.b.H. verwendet.
4. Korrekturstoff: Der für die Mischungen eingesetzte Caliciumträger ist Flugasche. Die eingesetzte Flugasche stammt aus der Wirbelschichtverbrennung des Papiererzeugers Norske Skog.

Tabelle 3-1: Zusammensetzung von Hüttensand, Glas- und Steinwolle sowie Flugasche nach RFA [21]

Parameter	Hüttensand	Glaswolle	Steinwolle	Flugasche
[-]	[m.-%]	[m.-%]	[m.-%]	[m.-%]
Cl	0	0,08	<0,025	0
Na_2O	0,38	14,53	1,74	0
MgO	9,44	3,09	10,33	1,87
Al_2O_3	12,01	1,51	15,44	10,39
SiO_2	37,59	63,91	40,48	15,53
P_2O_5	0	0,13	0,33	0,55
SO_3	0	0,22	0,18	0,46
K_2O	0,96	0,80	1,14	0,42
CaO	36,49	7,24	16,10	58,67
TiO_2	0,52	0,05	1,35	0,24
Cr_2O_3	-	<0,025	0,28	-
MnO	1,28	0,57	0,63	0,1
Fe_2O_3	0	0,56	8,76	0,48
NiO	-	<0,025	0,03	-
ZnO	-	0,04	<0,025	-
SrO	-	<0,025	0,06	-
ZrO_2	-	<0,025	0,03	-
BaO	-	0,08	0,05	-
La_2O_3	-	<0,025	0,36	-
B_2O_3	-	1,14	<0,025	-
LOI	0	5,86	2,62	11,07

3.2 Datenerhebung

Die im Zuge der Literaturrecherche verwendete Suchmaschine war Google Scholar, wobei zusätzlich die Datenbank der Universitätsbibliothek der Montanuniversität Leoben eingesetzt wurde. Die verwendeten Schlagwörter waren vor allem „Steinwolle“, „Glaswolle“, „künstliche Mineralwolle“, „künstliche Mineralfasern“, „Mineralfaserabfall“ und „Recycling“, wobei diese sowohl auf Deutsch als

auch auf Englisch eingegeben wurden. Dabei wurden vor allem Publikationen ausgewählt, die Daten über Zusammensetzungen von Glas- und Steinwolle enthalten.

Im Anschluss erfolgte die Klassifikation dieser Daten in Kategorien nach Alter oder nach Produkt bzw. Abfall. Ziel der Einteilung und Untersuchung der Literaturdaten war es, diese historischen Zusammensetzungen in Dreistoffdiagrammen darzustellen, einen Überblick über die enthaltenen Oxide zu bekommen und das Verhalten der dynamischen Viskosität mit steigender Temperatur zu beleuchten.

3.3 Ermittlung der dynamischen Viskosität

Die Betrachtung der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur der Literaturdaten von Glas- und Steinwolle liefert Informationen über die Viskositätsänderungen der Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen. Dies ist wichtig, um das Schmelzverhalten oder die Änderungen der Viskosität von Substanzen in Bezug auf die Temperatursteigerung zu verstehen und eine Verarbeitbarkeit nach der thermochemischen Behandlung abschätzen bzw. garantieren zu können.

Für die Ermittlung der dynamischen Viskosität wurde das Urbain-Modell [97] verwendet, das auf Basis von Viskositätsmessungen von Schmelzen entwickelt wurde. Dadurch kann ein erster Näherungswert berechnet werden, der sich auf Eigenschaften der Komponenten bezieht, die nicht direkt gemessen werden können. [97]

3.4 Mischungsrechner

Der eingesetzte Mischungsrechner wurde basierend auf eine Vorgängerversion von Eisner [98] im Zuge einer Bachelorarbeit von Frey [99] in Excel programmiert. In diesem Tool ist die chemische Zusammensetzung der einzelnen Stoffe hinterlegt, die für die Berechnung ausgewählt werden können. Zudem ist es möglich, die Mindestanteile der Komponenten anzugeben, um die Mengen der gewünschten Einsatzstoffe von Glas- und Steinwolle in der Mischung zu maximieren, während die Einsatzmenge des Korrekturstoffes Flugasche möglichst gering gehalten wird. Der Mischungsrechner zeigt nach erfolgter Kalkulation sowohl die Anteile der einzelnen Bestandteile als auch die Menge des als Reduktionsmittel benötigten Kohlenstoffes inklusive eines Sicherheitsfaktors von 10 % als Output

an. Dadurch kann nach diesen Vorgaben die Mischung erstellt werden und das unter Einhaltung des für die Reduktion der Eisenoxide benötigten Kohlenstoffes.

Im Mischungsrechner sind alle relevanten Grenzwerte hinterlegt, die notwendig sind, um in weiterer Folge einen geeigneten Sekundärzumahlstoff in Anlehnung an Hüttensand herzustellen. Die gegenständlichen Randbedingungen und Grenzwerte sind in Tabelle 3-2 dokumentiert und enthalten Maximum- und Minimumgrenzen für Oxidgehalte sowie für Basizitäten. Somit ist es möglich, ein Mischungsprodukt herzustellen, das den Richtlinien der Bindemittelindustrie entspricht. Ziel war es, eine Mischung zu finden, die viel Glas- und Steinwolle und gleichzeitig möglichst wenig Flugasche enthält.

Tabelle 3-2: Im Mischungsrechner hinterlegte Randbedingungen und Grenzwerte

Grenzwerte	Einheit	Minimum	Maximum
SiO_2	m.-%	25	100
Al_2O_3	m.-%	0	13
MgO	m.-%	0	15
CaO	m.-%	0	100
CaO/SiO_2	-	0	1,6
$CaO+MgO+SiO_2$	m.-%	66	100
$(CaO+MgO)/SiO_2$	-	1,1	100
$(CaO+MgO)/(Al_2O_3+SiO_2)$	-	0	1,2
R_S	-	25	50
$CaO/SiO_2<1,15$ ODER $(CaO+MgO)/SiO_2<1,65$	-	0,5	2

3.5 Ermittlung des Schmelztemperaturbereiches

Die benötigte Behandlungstemperatur der thermochemischen Behandlung kann über die Ermittlung der Schmelztemperaturbereiche angenähert werden. Dafür wurden Parameter wie Erweichungstemperatur und Schmelztemperatur mit der Software für automatische Bilddatenauswertung des Erhitzungsmikroskops bestimmt. Diese werden im Programm auf Basis der Flächenänderung der Probe berechnet.

Die Bestimmung der charakteristischen Temperaturen nimmt Bezug auf die Norm DIN 51730:1998, die das Asche-Schmelzverhalten von Steinkohle, Braunkohle, Lignit und Koks abbildet. Dadurch soll die Vergleichbarkeit des Schmelzverhaltens gewährleistet werden. [100] Die relevanten Begrifflichkeiten sind dabei folgendermaßen definiert:

- Die Halbkugeltemperatur ist die Temperatur, bei der der Probenkörper annährend die Form einer Halbkugel hat; der geschmolzene Probenkörper ist halb so hoch wie seine Grundlinie.

- Die Schmelztemperatur ist die Temperatur, bei der der Probenkörper auf ein Drittel der Höhe, die er bei der Halbkugeltemperatur hatte, auseinandergeflossen ist.
- Der Schmelzbereich ist der Temperaturbereich zwischen Schmelztemperatur und Halbkugeltemperatur. [100, 101]

Vor allem die Schmelztemperatur bzw. der Schmelzbereich ist bei dieser Betrachtung von besonderer Relevanz. In einzelnen Fällen kommt es vor, dass die Software des Erhitzungsmikroskops die charakteristischen Punkte nicht oder nur fehlerhaft erkennt. Dann werden die charakteristischen Temperaturen anhand der Bilder und der Datensätze manuell identifiziert.

In der Bachelorarbeit von Sampl [102] wurden bereits Produkt- sowie Abfallproben von Glas- und Steinwolle im Erhitzungsmikroskop untersucht. Diese Daten dienten als erster Anhaltspunkt für die Einstellung der Temperatur im Elevatorofen und sind in Tabelle 3-3 und Tabelle 3-4 angeführt.

Tabelle 3-3: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung von Steinwolle und Steinwolleabfall aus Sampl [102]

	Einheit	**Steinwolle**		**Steinwolleabfall**	
		A	B	A	B
Halbkugeltemperatur	°C	1208	1204	1221	1220
Schmelzbereich	°C	1208-1285	1204-1256	1221-1361	1220-1370
Schmelztemperatur	°C	1285	1256	1361	1370
Durchschnittliche Schmelztemperatur	°C	1271		1366	

Tabelle 3-4: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung von Glaswolle und Glaswolleabfall aus Sampl [102]

	Einheit	**Glaswolle**		**Glaswolleabfall**	
		A	B	A	B
Halbkugeltemperatur	°C	846	858	1143	1142
Schmelzbereich	°C	848-1086	858-1096	1413-1402	1142-1399
Schmelztemperatur	°C	1086	1096	1402	1399
Durchschnittliche Schmelztemperatur	°C	1091		1401	

Aufgrund der stark erhöhten Schmelztemperatur des Glaswolleabfalles ist laut Sampl davon auszugehen, dass es sich bei der Probe um eine Mischung aus Glas- und Steinwolleabfall handelt. [102]

3.6 Thermochemische Behandlung

In diesem Kapitel wird der eingesetzte Ofen für die thermochemische Behandlung inklusive seiner technischen Spezifikationen vorgestellt. Außerdem wird der Aufbau der Nassgranulationsanlage sowie alle notwendigen Schritte zur Aufbereitung des beim Versuch generierten Materials beschrieben.

3.6.1 Thermochemische Behandlung

Die wichtigsten Verfahrensschritte für die Herstellung eines Granulats aus Glas- und Steinwolle sowie Mischungen aus diesen Komponenten sind das Schmelzen dieser im Elevatorofen, der ein Widerstandsofen ist, und die darauffolgende Abkühlung mittels Nassgranulationsanlage. In diesem Teil wird auf den Versuchsaufbau und die -parameter eingegangen.

Elevatorofen ELHT 16/18

Der für die thermochemische Behandlung eingesetzte Elevatorofen ist von der Firma Thermconcept. Die technischen Spezifikationen werden in Tabelle 3-5 aufgelistet. Bevor die Mischung thermochemisch behandelt wurde, wurden drei Vorversuche mit Hüttensand als Referenzmaterial durchgeführt. Diese Vorgehensweise diente dazu, erste Erkenntnisse zu gewinnen, inwiefern sich Heizrate, Behandlungsdauer und Haltezeit. auf die Eigenschaften der Probe auswirken, wenn das Probenmaterial bei unterschiedlichen Temperaturen in den Ofenraum gestellt werden. Näheres dazu wird in Kapitel 4.3 erläutert.

Tabelle 3-5: Technische Spezifikationen des Elevatorofens [103]

Bezeichnung	**ELHT 16/18**
Maximale Temperatur	1800 °C
Innenabmessungen	B 250 mm x T 250 mm x H 250 mm
Außenabmessungen	B 620 mm x T 770 mm x H 1900 mm
Volumen	16 L
Leistung	7,2 kW

3.6.2 Nassgranulation

Abbildung 3-1 zeigt die zur Abkühlung eingesetzte Nassgranulationsanlage. Die Anlage besteht aus einer Pumpe, die das Wasser im Kreislauf führt, einer Horizontalrinne und einem Auffangkorb für das Outputmaterial, der sich im Granulierbecken befindet.

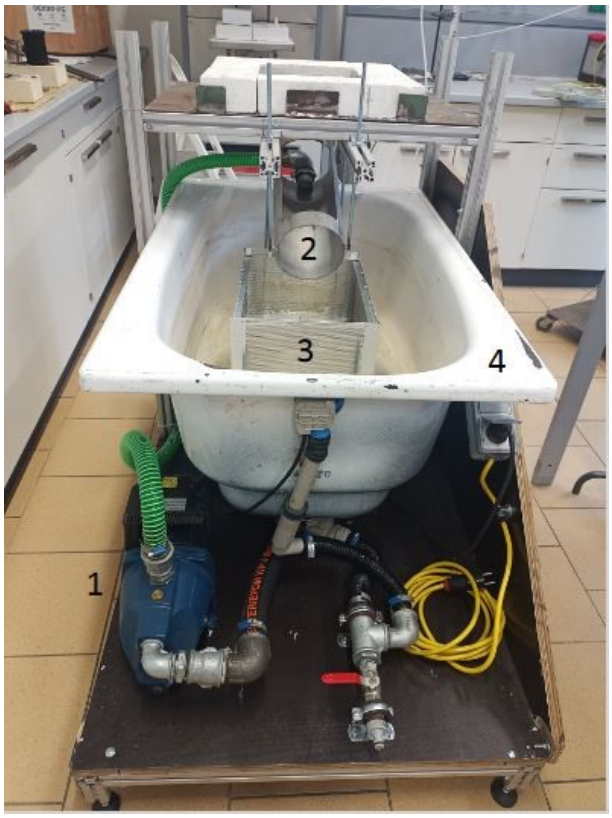

Abbildung 3-1: Nassgranulationsanlage am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik an der Montanuniversität Leoben mit Pumpe (1), Horizontalrinne (2), Auffangkorb (3) und Granulierbecken (4)

Die Erstkonstruktion der Nassgranulationsanlage erfolge im Zuge einer Bachelorarbeit von Hafner [104] im Jahr 2019. Seither wurde bereits mehrfach angepasst und optimiert. Die Vorgehensweise des Abgusses der Schmelze und der Nassgranulation wurde mit einer Infrarotkamera (IR) aufgenommen, um die Temperatur des thermochemisch behandelten Materials sowie die Abgussdauer ermitteln zu können.

3.6.3 Aufbereitung des Outputmaterials

Die Probenaufbereitung ist notwendig für die nachfolgende chemische Analyse und die Untersuchungen zur Bindemitteleignung. Das feuchte und grobe Granulat wird nach dem Versuch zuerst für 24 Stunden in den Trockenschrank gestellt und danach gewogen. Im Anschluss daran wird das nun trockene Material gebrochen, damit es feinkörnig wird. Die nachfolgend durchgeführte Siebung dient zur Optimierung der Magnetscheidung, durch die die Metallphase aus dem Granulat entfernt wird. Nach erfolgreicher Aufbereitung erfolgt die Übergabe des Outputmaterials an das Analyselabor der chemischen Analyse und Bestimmung der Bindemitteleignung.

Dabei werden durch die Durchführung eines R^3-Tests sowohl die puzzolanischen als auch die latent-hydraulischen Eigenschaften untersucht, indem neben einem Überschuss an Wasser und Portlandit ($Ca(OH)_2$) auch Sulfate, Calcit und Alkali zugegeben werden, um die ungehinderte Reaktion zu messen. Die Resultate geben Aufschluss über die kumulativ freigesetzte Wärme in den ersten sieben Tagen der Reaktion, den Verbrauch von Portlandit und gebundenem Wasser, das aus der Gewichtsdifferenz nach Trocknung und Verdampfung berechnet wird. Dadurch liefert der R^3-Test eine gute Korrelation zwischen der kumulativen Wärme, dem gebundenen Wasser und der Druckfestigkeit, da diese Parameter die Bildung von Hydratationsprodukten anzeigen. [105]

4 Durchführung

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise der Datenaufbereitung und -auswertung für die Erstellung der Dreistoffdiagramme, der dynamischen Viskositäts-Temperatur-Diagramme sowie jene der einzelnen Arbeitsschritte bei der thermochemischen Behandlung erläutert. Auch spezifische Parameter und Einstellungen werden genannt, um die Reproduzierbarkeit zu ermöglichen.

4.1 Datenaufbereitung und -auswertung

Aus der erstellten Datenbank zu den Zusammensetzungen von Glas- und Steinwolleproben wurden die Werte von CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 und MgO in Origin zu Dreistoffdiagrammen weiterverarbeitet. Dafür wurden die Literaturdaten nach dem Erscheinungsjahr eingeteilt.

Da KMFs, die vor dem Jahr 1998 hergestellt wurden, als gefährlich eingestuft werden, fungiert dieses Jahr als Trennkriterium für die Zuordnung der Datensätze. [11] Das bedeutet, dass die Zusammensetzungen, die vor 1998 publiziert worden sind, den gefährlichen und alle danach den ungefährlichen KMF zugeordnet wurden. Da jedoch bei Publikationen, die knapp nach diesem Jahr erfolgt sind, nicht genau festgestellt werden kann, ob gefährliche oder nicht gefährliche KMFs untersucht worden sind, wurden alle Daten aus den Veröffentlichungen bis inklusive 2001 der gefährlichen Fraktion zugeordnet. Zugleich liegen erst ab dem Jahr 2013 wieder Werte vor, die für die weitere Betrachtung zu den nicht gefährlichen künstlichen Mineralfasern gezählt werden.

Neben der Erstellung der Dreistoffdiagramme wurde auch die dynamische Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur untersucht. Dafür wurden die minimalen und maximalen Werte der

Oxide CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 und MgO für Glas- und Steinwolle vor und nach 1998 aus den Literaturdaten ermittelt. Anhand dieser Datenpunkte wurde die dynamische Viskosität der zugehörigen Zusammensetzungen in einem Temperaturbereich von 1000 °C bis 1700 °C unter Verwendung des Urbain-Modells [97] berechnet und dargestellt.

4.2 Thermo-optische Untersuchung der Materialien

Die Untersuchung der Materialien im Erhitzungsmikroskop dient vor allem dazu, dass eine erste Abschätzung getroffen werden kann, ab welcher Temperatur diese zu fließen beginnen, um den Elevatorofen richtig einstellen und in weiterer Folge auch einen zukünftigen Prozess danach auslegen zu können.

Die bereits gemahlenen Proben wurden durch händisches Verpressen in eine zylindrische Form gebracht und auf einem Aluminiumoxid-Plättchen mittels Probenträger in den Ofenraum geschoben. Der Rohrofen wurde während des Versuches mit Argon gespült, wobei die Durchflussmenge 4 L/min betragen hat. Durch diese Vorgehensweise soll unerwünschten Reaktionen mit Sauerstoff entgegengewirkt werden. Die Aufnahme der Bilder startet ab 100 °C Probentemperatur und alle 10 Sekunden werden neue Aufnahmen der projizierten Schattenflächen gemacht. Eine beispielhafte Darstellung dieser ist in Abbildung 4-1 ersichtlich.

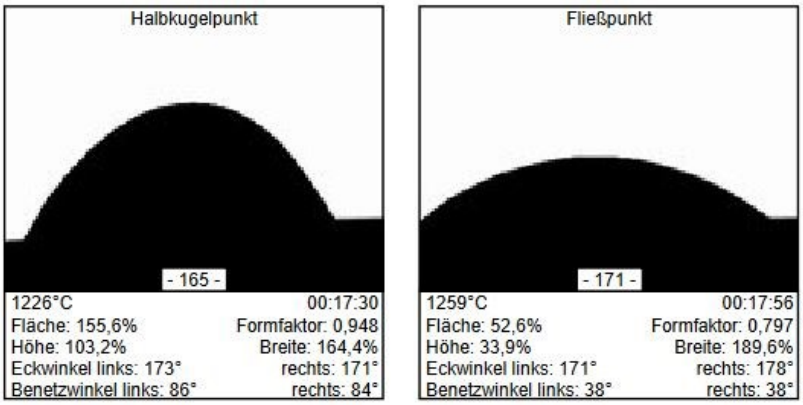

Abbildung 4-1: Exemplarische Darstellung der Schattenbilder des Erhitzungsmikroskops

Die Spezifikationen des Heizprogrammes werden in Tabelle 4-1 zusammengefasst.

Tabelle 4-1: Heizprogramm des Erhitzungsmikroskops

Temperaturintervall	Aufheizrate
Raumtemperatur bis 1350 °C	80 °C/min
1350 °C bis 1450 °C	50 °C/min
1450 °C bis 1700 °C	10 °C/min
1700 °C	Halten für 5 Minuten

4.3 Elevatorofen

Der Elevatorofen heizt nach einem vorgegebenen Heizprogramm, das in Tabelle 4-2 ersichtlich ist, auf 1400 °C auf. Die Auswahl der maximalen Temperatur erfolgte unter Berücksichtigung der zu erwartenden Fließpunkte, die im Erhitzungsmikroskop festgestellt und mit einer Sicherheitsspanne von ungefähr 100 °C in diesen Versuch aufgenommen wurden, um eine ausreichende Reaktionszeit zu gewährleisten. Wie auch beim Erhitzungsmikroskop wird hierbei eine Argonspülung von 4 L/min verwendet, um eine inerte Atmosphäre im Ofenraum zu schaffen.

Tabelle 4-2: Heizprogramm des Elevatorofens

Temperaturintervall	Aufheizrate
Raumtemperatur bis 300 °C	Innerhalb von 15 Minuten
300 °C bis 1400 °C	500 °C/h

4.3.1 Vorversuche

Es wurden drei Vorversuche mit gemahlenem Hüttensand als Referenzmaterial im Elevatorofen durchgeführt, wobei HÜS 4500 verwendet wurde. Dabei lag der Fokus darauf herauszufinden, inwiefern sich Heizrate, Behandlungsdauer und Haltezeit auf die Eigenschaften des Referenzmaterials auswirken, wenn der Tiegel bei unterschiedlichen Temperaturen in den Ofenraum gestellt wird. Diese Erkenntnis diente zugleich als Effizienzsteigerungsmaßnahme, um die nachfolgenden Versuche mit minimalen Energieaufwand durchführen zu können. Die Haltezeit bei 1400°C betrug dabei immer 15 Minuten. Die Proben aus Hüttensand wurden zu je 230 g in Graphittiegel mit einem Außendurchmesser von 85 mm und einer äußeren Höhe von 105 mm eingewogen. Als Qualitätsmerkmal für die Vorversuche wurde der Glasgehalte herangezogen.

Es wurden drei unterschiedliche Vorversuchsvarianten durchgeführt:

1. HÜS A: Die Probe wurde bei Raumtemperatur (25 °C) in den Ofenraum gestellt und auf 1400 °C aufgeheizt.
2. HÜS B: Die Probe wurde bei 900 °C Ofentemperatur in den Ofenraum gestellt und auf 1400 °C aufgeheizt.
3. HÜS C: Die Probe wurde bei 1400 °C Ofentemperatur in den Ofenraum eingebracht und verweilte 45 Minuten im Ofeninneren.

4.3.2 Hauptversuche

Für die Hauptversuche wurde mit dem MR eine Mischung aus Glaswolle, Steinwolle und Flugasche kalkuliert und für die thermochemische Behandlung im Elevatorofen vorbereitet. Die Anteile der Inputmaterialien werden in Tabelle 4-3 aufgelistet.

Tabelle 4-3: Zusammensetzung der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle

Material	**Anteil**
[-]	[%]
Glaswolle	14,8
Steinwolle	45,2
Flugasche	40,0

Die chemische Zusammensetzung dieser Mischung, die im Mischungsrechner ermittelt wurde, sind in Kapitel 5.4 einzusehen. Tabelle 4-4 zeigt die Einwaagemengen für die Hauptversuche.

Tabelle 4-4: Einwaagemengen Hauptversuche

Versuch	**Einwaage**
[-]	[g]
A	687,2
B	700,1
C	716,3

Für die Hauptversuche wurden größere Graphittiegel herangezogen, die einen Außendurchmesser von 120 mm und eine äußere Höhe von 170 mm aufwiesen. Insgesamt wurden drei Versuche mit dieser Mischung durchgeführt, wobei das Material zweimal bei Raumtemperatur in den Ofenraum gestellt wurde und einmal bei 1400 °C. Diese Herangehensweise wurde gewählt, um den Zeit- und Temperatureinfluss bestimmen zu können.

Nachdem die Haltezeit von 30 Minuten bei 1400 °C abgelaufen ist, wurde die Schmelze in der Nassgranulationsanlage abgekühlt. Die 30-minütige Haltezeit wurde gewählt, da größere Tiegel mit mehr Fassungsvermögen im Zuge des Hauptversuches zum Einsatz kamen. Die Versuchsparameter der Nassgranulationsanalage werden in Tabelle 4-5 angeführt.

Tabelle 4-5: Versuchsparameter der Nassgranulationsanlage

Parameter	**Größe**
Volumenstrom	80 L/min
Rinnenwinkel	30°
Rohrinnendurchmesser	35 mm
Rohraußendurchmesser	40 mm

Das abgekühlte Granulat wird nachfolgend dem ersten Aufbereitungsschritt, der Trocknung, zugeführt. Dabei wird das generierte Material für 24 Stunden bei 105 °C in den Trockenschrank gestellt. Im Anschluss daran wird das nun trockene Material auf 0,1 mm gebrochen. Die anschließende Siebung mit einem 2 mm und einem 250 µm Sieb im Siebturm soll die Magnetabscheidung optimieren, um möglichst viel der Metallfraktion aus dem generierten Material zu entfernen.

Alle Proben wurden an der Technischen Universität Graz mittels RFA auf deren Oxidgehalt sowie auf deren Glasgehalt und anhand des R^3-Tests auf deren Reaktivität analysiert.

5 Ergebnisse und Diskussion

In diesem Teil der Arbeit werden die Resultate der Weiterverarbeitung der Literaturdaten von Glas- und Steinwolle im Hinblick auf die dynamische Viskosität sowie die Ergebnisse der Versuche im Erhitzungsmikroskop und im Elevatorofen präsentiert. Abschließend wird auf die Auswertung der Bindemitteleignung und der Reaktivität eingegangen.

5.1 Statistische Auswertung der Literaturdaten

Im Zuge der Recherche wurden Literaturwerte in diversen Publikationen aus dem Zeitraum von 1984 bis 2021 gefunden und in einer Excel-Datenbank gesammelt. Dabei wurden in erster Linie Publikationen verwendet, deren Daten auch in der Veröffentlichungen von Yap et al. [78] und Yliniemi et al. [72] untersucht wurden. Eine Einteilung nach Produkt- bzw. Abfallfraktion war insofern nicht möglich, da bei vielen Publikationen nicht klar hervorgeht, ob es sich bei der untersuchten Glas- und Steinwolle um ein Produkt oder um Abfall handelt. Daher wurden die Datensätze nach dem Erscheinungsjahr der Publikationen eingeteilt, worauf in Kapitel 4.1 genauer eingegangen wurde.

Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2 präsentieren die Ergebnisse der statistischen Auswertung in Hinblick auf die Hauptoxide in Glaswolleproben vor und nach 1998.

Tabelle 5-1: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Glaswolleproben vor 1998

Oxide	Einheit	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stichprobenumfang
SiO_2	m.-%	57,50	68,30	62,93	17
CaO	m.-%	3,00	8,50	7,20	17
Al_2O_3	m.-%	2,91	5,80	3,83	17
MgO	m.-%	-	4,13	2,66	17
Fe_2O_3	m.-%	-	0,59	0,22	13

Tabelle 5-2: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Glaswolleproben nach 1998

Oxide	Einheit	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stichprobenumfang
SiO_2	m.-%	58,58	67,90	62,72	20
CaO	m.-%	7,24	9,90	8,19	20
Al_2O_3	m.-%	1,30	4,90	2,18	20
MgO	m.-%	1,77	4,05	2,64	20
Fe_2O_3	m.-%	0,27	2,06	0,65	20

Beim Vergleich der Tabelle 5-1mit Tabelle 5-2 ist erkennbar, dass die Schwankungsbreite des SiO_2-Gehalts in Glaswolleproben nach 1998 kleiner ist. Zudem ist im Durchschnitt weniger Al_2O_3, aber mehr Fe_2O_3 enthalten. Dennoch gibt es nur geringe Schwankungen in der chemischen Zusammensetzung der Glaswolle, was auch ein Grund für den geringen Stichprobenumfang sein kann.

Tabelle 5-3 und Tabelle 5-4 zeigen die Ergebnisse der statistischen Betrachtung der Hauptoxide für Steinwolleproben vor und nach dem Stichjahr 1998.

Tabelle 5-3: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Steinwolleproben vor 1998

Oxide	Einheit	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stichprobenumfang
SiO_2	m.-%	39,80	47,37	45,69	17
CaO	m.-%	10,04	40,10	18,06	17
Al_2O_3	m.-%	10,60	13,80	12,91	17
MgO	m.-%	3,65	11,60	9,36	17
Fe_2O_3	m.-%	0,63	13,22	6,88	10

Tabelle 5-4: Statistische Auswertung der chemischen Zusammensetzung von Steinwolleproben nach 1998

Oxide	Einheit	Minimum	Maximum	Mittelwert	Stichprobenumfang
SiO_2	m.-%	16,90	60,10	41,49	53
CaO	m.-%	3,52	46,90	18,65	53
Al_2O_3	m.-%	0,76	24,00	15,28	53
MgO	m.-%	1,39	14,70	9,09	52
Fe_2O_3	m.-%	0,36	16,20	7,32	53

Für Steinwolleproben, die nach dem Jahr 1998 untersucht worden sind, liegen die meisten Daten vor. Die von Müller et al. [17] definierte Reihenfolge der Massenanteile der Hauptoxide, die mit SiO_2 > CaO > Al_2O_3 > Fe_2O_3 + FeO angegeben wird, trifft auf alle vier Auswertungen zu. Vor allem in Veröffentlichungen nach dem Jahr 1998 wurden viele Proben aus Steinwolle untersucht. Dies könnte daran liegen, dass einerseits ein höheres Gefahrenpotential von diesen ausgeht und andererseits eine stärkere Änderung in der Produktzusammensetzung erfolgt ist. Vor allem aber die erhöhte Auseinandersetzung in Bezug auf die Weiter- und Wiederverwendung von Steinwolleabfällen spielt dabei eine wesentliche Rolle. Beim Vergleich der Tabelle 5-3 mit Tabelle 5-4 fällt auf, dass die Schwankungsbreite aller Oxide nach 1998 größer ist, obgleich die Mittelwerte nur geringe Abweichungen aufweisen.

Des Weiteren ist darauf hinzuweisen, dass in den Publikationen nicht immer eindeutig hervor geht, ob es sich bei den untersuchten Proben um Produkte oder Abfälle handelt. Grundsätzlich lässt sich festhalten, dass in Steinwolle nach 1998 mehr Calcium und Aluminium zu finden ist. Vor allem der höhere Al_2O_3-Gehalt kann mit der verbesserten Biolöslichkeit zu tun haben. Dieser Effekt wird bei Guldberg et al. [40] dargelegt.

5.2 Erstellung der ternären Diagramme

Die Datensätze für Glaswolle, die als Punkte in der Abbildung 5-1 zu finden sind, wurden in den Publikationen [7, 37, 39–41, 44–49, 52, 53, 67–70, 72, 106–108] veröffentlicht.

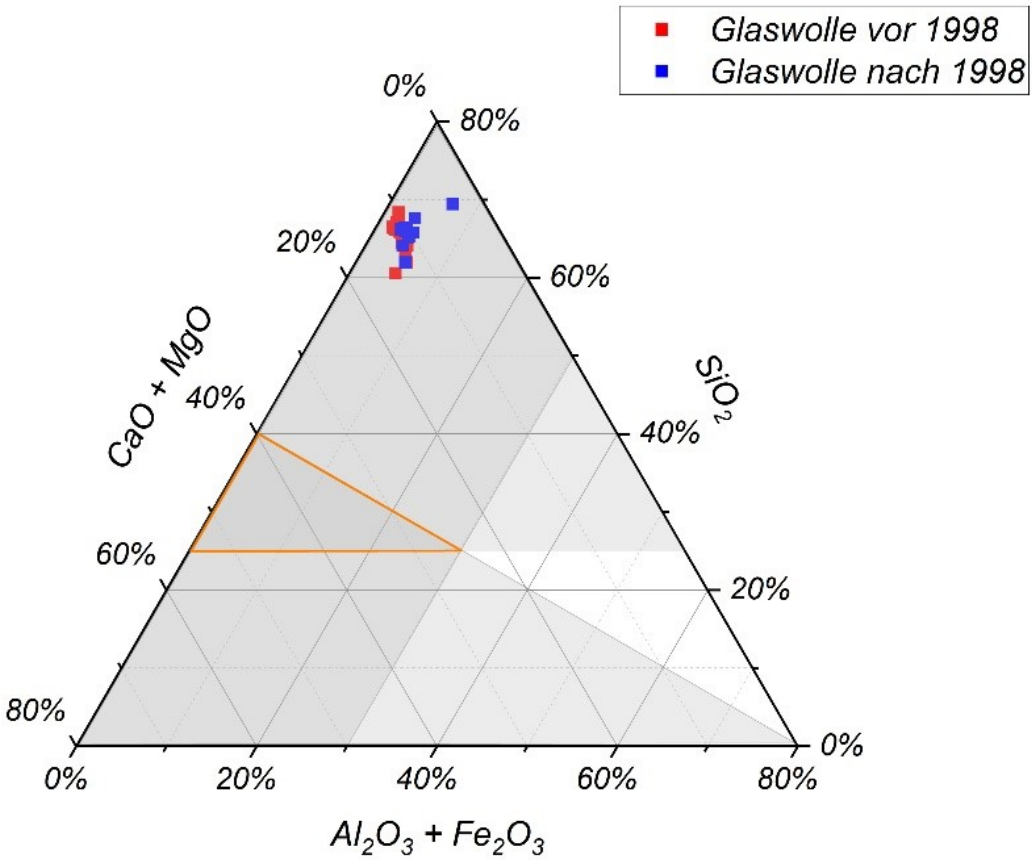

Abbildung 5-1: Ternäres Diagramm für Glaswolle inkl. markiertem Zielbereich (orange) für die Verwendung als SZS; Daten aus [7, 37, 39–41, 44–49, 52, 53, 67–70, 72, 106–108]

Der orange umrandete Bereich zeigt die Fläche, in der die Zusammensetzung für ein Hüttensandsubstitut erfüllt ist, wobei dies in den meisten Fällen durch die Zugabe eines Calciumträgers bewirkt werden kann. Die Umgrenzung ergibt sich auf Basis von drei Kriterien, die für Hüttensand erfüllt sein müssen und in der Norm EN 15167 geregelt sind. [109] Diese Kriterien werden in Tabelle 5-5 aufgelistet.

Tabelle 5-5: Kriterien für Hüttensand nach Norm 15176-1 [110]

Eigenschaft	**m-%**
SiO_2	> 25
$(CaO+MgO)/SiO_2$	> 1,0
$CaO+MgO+SiO_2$	m.-% > 2/3

Die Daten für die Erstellung der ternären Diagramme für Steinwolle in Abbildung 5-2 stammen den Veröffentlichungen [7, 13, 33, 37–66, 72, 107].

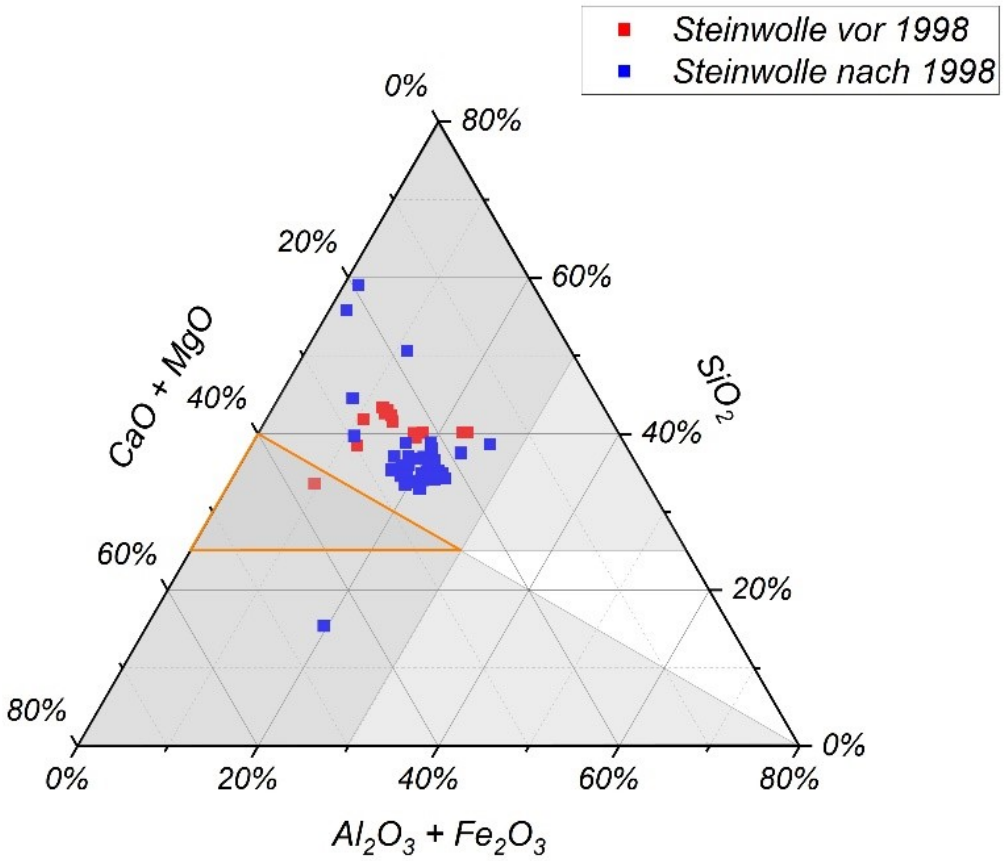

Abbildung 5-2: Ternäres Diagramm für Steinwolle inkl. markiertem Zielbereich (orange) für die Verwendung als SZS; Daten aus [7, 13, 33, 37–66, 72, 107]

Der größte Teil der Datenpunkte, die aus Publikationen nach dem Jahr 1998 stammen, liegen in einer Punktwolle übereinander, während sich die Zusammensetzungen aus älteren Veröffentlichungen knapp außerhalb wie ein Band platzieren. Die Achsen des Dreistoffdiagrammes sind auf 80 % festgelegt, da nicht alle in den Proben enthaltenen Oxide für die Darstellung herangezogen worden sind, sondern nur CaO, MgO, SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3. Vor allem in der Datenmenge der nicht gefährlichen Steinwolle zeigen sich einige Ausreißer. Diese können durch Probenahmefehler, Verunreinigungen des Materials oder Messfehler verursacht worden sein. Vor allem sehr calciumreiche Datenpunkte lassen auf Unreinheiten wie beispielsweise von Gipskarton vermuten.

Beim Vergleich der Abbildung 5-1 mit der Abbildung 5-2 wird deutlich, dass die Zusammensetzungen der Glaswolle weitaus weniger variabel sind als jene der Steinwolle. Alle Datenpunkte der Glaswolleproben sind sehr nahe beieinander und es gibt kaum Ausreißer. Die chemische Zusammensetzung aller Daten weist nur einen geringen Anteil an CaO auf. Dies könnte eine Hürde für die Weiterverarbeitung zu einem Hüttensandsubstitut darstellen, da eine große Menge eines Calciumträgers als Korrekturstoff benötigt wird, um in den Zielbereich für Hüttensand zu gelangen. Diese Zugabe eines Primärrohstoffes stellt einen höheren Kostenaufwand dar, da diese Calciumträger zugekauft werden müssen, wodurch negative Auswirkungen auf die Wirtschaftlichkeit des Ansatzes entstehen. Es gibt jedoch auch Sekundärrohstoffe mit hohem Calcium-Anteil, wie beispielsweise Flugasche, die mit weitaus geringeren Kosten eingesetzt werden können.

Dennoch ist es das Ziel bei der Erstellung der Mischungen für die Versuchsdurchführung, ein Mischverhältnis zu finden, bei dem eine möglichst geringe Menge an Korrekturstoffen verwendet wird. Dabei soll die maximale Zugabe von KMF erreicht werden, um eine geeignete Zusammensetzung für das Hüttensandsubstitut zu erhalten. Als Korrekturstoff wird im Zuge dieser Arbeit nur Flugasche für die praktischen Versuche eingesetzt.

5.3 Untersuchung der dynamischen Viskosität

Die Betrachtung der dynamischen Viskosität in Abhängigkeit von der Temperatur ist wichtig, um die Verarbeitbarkeit nach der thermochemischen Behandlung des Materials abschätzen bzw. garantieren zu können. Dabei ist vor allem zu bedenken, dass die behandelten Proben aus dem Ofen transportiert und anschließend nassgranuliert worden sind. Aufgrund der Untersuchung der dynamischen Viskosität lassen sich Informationen über die Änderung der dieser in den Materialien bei unterschiedlichen Temperaturen ableiten, die wiederum Rückschlüsse ziehen lassen in Hinblick auf das Fließverhalten. Sie ist sowohl von der Temperatur als auch von der chemischen Zusammensetzung abhängig. Ehrenberg [111] hält fest, dass in einem Viskositätsbereich von 0,3 Pa*s bis 0,5 Pa*s die Granulation von Hochofenschlacke zu Hüttensand durchführbar ist.

Die dynamische Viskosität wurde mit den Literaturdaten der Zusammensetzungen Glas- und Steinwolle berechnet, welche die minimalen bzw. die maximalen Werte der Oxide CaO, SiO_2, Al_2O_3, Fe_2O_3 und MgO beinhalteten. Näheres zu diesen Ergebnissen ist in Kapitel 5.1 nachzulesen. Die Daten zur chemischen Zusammensetzung samt Literaturverweis auf die zugehörige Publikation sind im Anhang einsehbar.

Die Diagramme in Abbildung 5-3 und Abbildung 5-4 zeigen die dynamische Viskosität von Glas- bzw. Steinwolle in Abhängigkeit von der Temperatur.

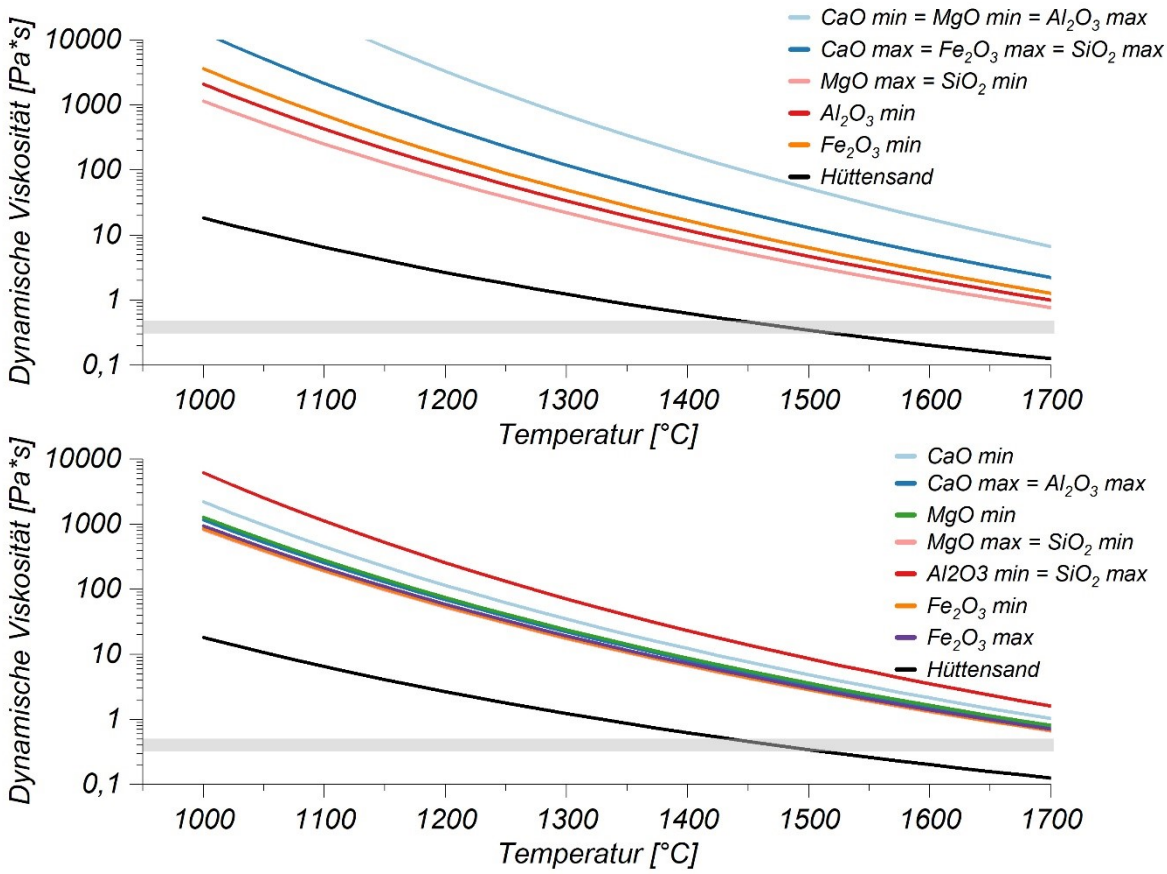

Abbildung 5-3: Dynamische Viskosität von Glaswolle vor (oben) und nach (unten) 1998 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Urbain [97] inkl. Viskositätsbereich für Hüttensand nach Ehrenberg [111]

In der Abbildung 5-3 zeigt sich, dass der Verlauf von Hüttensand im Vergleich zu jenen von Glaswolle in beiden Grafiken weiter unten liegt und somit eine geringere dynamische Viskosität aufweist. Zudem wird die ähnliche chemische Zusammensetzung und damit ein ähnliches Verhalten der dynamischen Viskosität von Glaswolle auch in diesen Darstellungen verdeutlicht. Bei Anwendung des Wertebereiches von Ehrenberg (grau) geht hervor, dass weitaus höhere Temperaturen von > 1700 °C benötigt werden, um diese dynamische Viskosität zu erreichen. Der Verlauf mit dem maximalen und jener mit dem minimalen Wert für Fe_2O_3 liegen bei den Daten nach 1998 direkt übereinander. Daraus lässt sich schließen, dass dieser Gehalt kaum einen Einfluss auf die dynamische Viskosität hat und bei der Betrachtung der dynamischen Viskosität die übrigen Komponenten eine stärkere Rolle spielen. In

beiden Grafiken hat die Zusammensetzung mit dem niedrigsten Anteil an SiO_2 die geringste Distanz zur Referenzkurve.

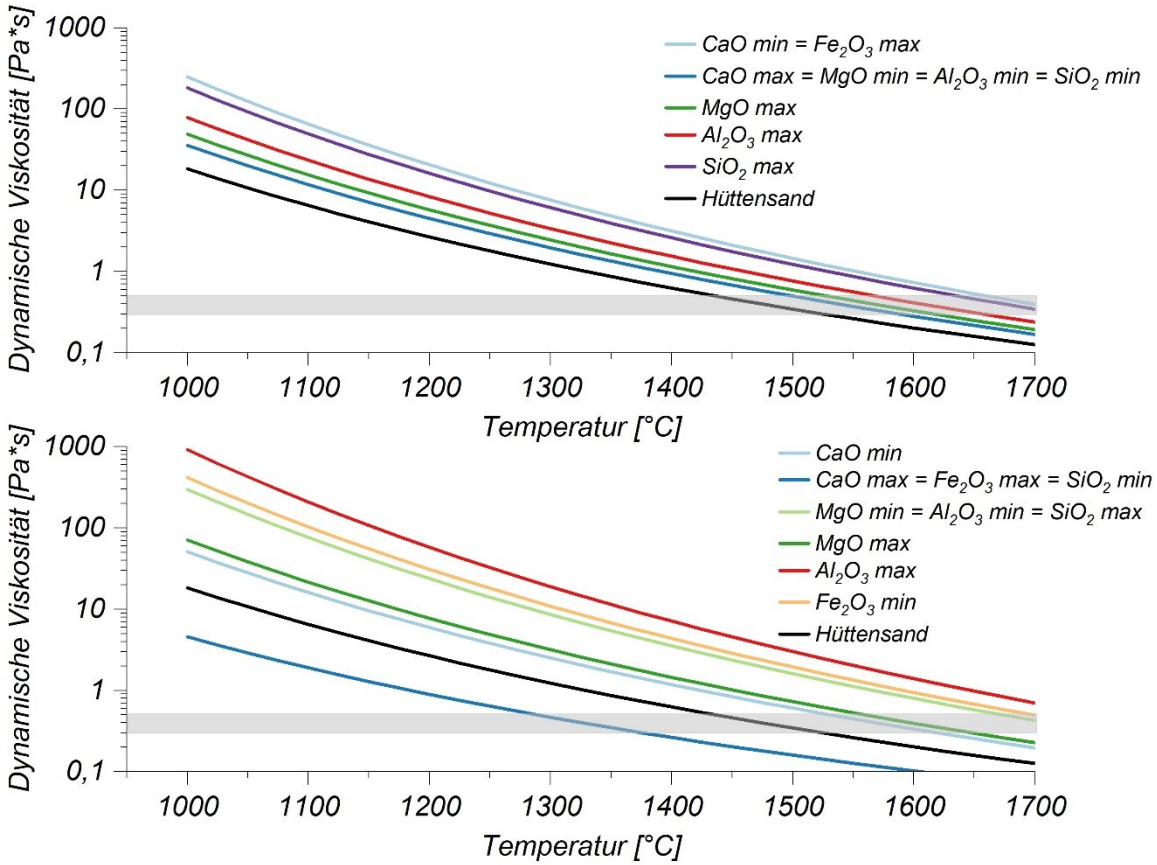

Abbildung 5-4: Dynamische Viskosität von Steinwolle vor (oben) und nach (unten) 1998 in Abhängigkeit von der Temperatur nach Urbain [97] inkl. Viskositätsbereich nach Ehrenberg [111]

Abbildung 5-4 zeigt, dass Proben aus Steinwolle deutlich näher bei dem Referenzwert der dynamischen Viskosität von Hüttensand sind als jene der Glaswolle. Die Zusammensetzung der Steinwolle nach 1998 mit hohem CaO- und hohem Fe_2O_3-Gehalt bei geringerem Anteil von SiO_2 weist einen niedrigeren Verlauf auf. Bei Steinwolle vor 1998 müssen die Temperaturen nur um in etwa 100 °C höher sein, um in den von Ehrenberg angegebenen Viskositätsbereich zu gelangen. Da bei beiden Grafiken der maximale CaO-Anteil sehr nah am Verlauf der Referenzkurve liegt, kann geschlossen werden, dass dieses Oxid einen Einfluss auf die dynamische Viskosität hat.

Peternelj et al. [112] veröffentlichten einen Wert für die dynamische Viskosität von 1,88 Pa*s bei 1400 °C für Spinnradversuche unter Verwendung einer Probe aus Steinwolle, die zudem einen Aluminiumoxidgehalt von etwa 17 m.-% aufwies. Dieser kann vor allem für Steinwolle als Richtwert

herangezogen werden Darauf aufbauend lässt sich für die Steinwolleprobe nach 1998 mit dem geringsten Gehalt an CaO ebenfalls eine geeignete dynamische Viskosität festhalten. Bei den Proben vor 1998 können jene mit dem größten MgO-Gehalt sowie jene mit dem meisten CaO bei gleichzeitig sehr niedrigen Werten für MgO, Al_2O_3 und SiO_2 als passabel bezogen auf den Literaturwert angesehen werden.

Es lässt sich festhalten, dass für Glaswolle bei der Betrachtung der dynamischen Viskosität hohe Temperaturen benötigt, um in den von Ehrenberg definierten Bereich der dynamischen Viskosität zu gelangen. Steinwolle weist in einigen Fällen bereits eine gute dynamische Viskosität in bei niedrigeren Temperaturen auf, denn lässt sich gute Verarbeitbarkeit nicht umfassend garantieren.

5.4 Vom Mischungsrechner kalkulierte Oxidgehalte

Mithilfe des Mischungsrechners konnte nicht nur die prozentuelle Zusammensetzung von Flugasche, Glas- und Steinwolle berechnet werden, sondern auch die Oxidgehalte vor und nach der thermochemischen Behandlung. Einen großen Einfluss auf die prozentuelle Zusammensetzung bei der Berechnung der Mischung spielte vor allem die maximale Beschränkung von Al_2O_3. Diese Ergebnisse werden in Tabelle 5-6 aufgelistet.

Tabelle 5-6: Vom Mischungsrechner berechnete Oxidgehalte vor und nach der thermochemischen Behandlung

Oxide	**Vor der Reduktion**	**Nach der Reduktion**
[-]	**m.-%**	**m.-%**
SiO_2	34,91	38,63
TiO_2	0,73	0,49
Al_2O_3	11,67	12,91
Fe_2O_3	4,35	0,24
FeO	0	0
MnO	0,42	0,19
MgO	6,03	6,68
CaO	32,71	36,19
K_2O	0,82	0,91
Na_2O	3,02	3,34
P_2O_5	0,40	0,01
SO_3	0,31	0,34
S	0	0
Cl	0	0

Die für diese Zusammensetzung ermittelten Werte des MR für die Grenzwerte und Randbedingungen sind in Tabelle 5-7 aufgelistet.

Tabelle 5-7: Ergebnis der Grenzwerte und Randbedingungen des MR

Grenzwerte und Randbedingungen	Einheit	m-%
SiO_2	m-%	38,63
Al_2O_3	m-%	12,91
MgO	m-%	6,68
CaO	m-%	36,19
CaO/SiO_2	m-%	93,67
$CaO+MgO+SiO_2$	m-%	81,50
$(CaO+MgO)/SiO_2$	-	110,96
$(CaO+MgO)/(Al_2O_3+SiO_2)$	-	83,16
R_S	-	31,92
$CaO/SiO_2<1,15$ ODER $(CaO+MgO)/SiO_2<1,65$	-	100,00

5.5 Bestimmung der Schmelzbereiche

In Kapitel 3.5 sind bereits Schmelzbereiche aus der Bachelorarbeit von Sampl [102] in Hinblick auf Glas- und Steinwolle aufgelistet. Die Glas- und Steinwolleproben wurden nochmals mit dem Erhitzungsmikroskop vermessen und sind in Tabelle 5-8 ersichtlich. Die Daten weichen im Vergleich zu jenen von Sampl leicht voneinander ab, was auf die Verwendung von unterschiedlichen Heizprogrammen zurückgeführt werden kann.

Tabelle 5-8: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung von Glas- und Steinwolle

	Einheit	Glaswolle			Steinwolle	
		A	B	C	A	B
Halbkugeltemperatur	°C	1122	1171	1142	1218	1202
Schmelzbereich	°C	1122-1214	11711270	1142-1231	1218-1247	1202-1240
Schmelztemperatur	°C	1214	1270	1231	1247	1240

Die in Tabelle 4-3 angegebene Mischung wurde ebenfalls im Erhitzungsmikroskop untersucht. Die Ergebnisse davon werden in Tabelle 5-9 aufgelistet.

Tabelle 5-9: Ergebnisse der Erhitzungsmikroskopieuntersuchung für die Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle

	Einheit	Versuch		
		A	B	C
Erweichungstemperatur	°C	1281	1298	1328
Erweichungsbereich	°C	1281-1355	1298-1440	1328-1567
Sphärischtemperatur	°C	n.b.	n.b.	1546
Halbkugeltemperatur	°C	1355	1440	1567
Schmelzbereich	°C	1355-1363	1440-1600	n.b.
Schmelztemperatur	°C	1363	1600	n.b.

n.b. - nicht bestimmt

In Tabelle 5-9 ist erkennbar, dass Schmelztemperatur und -bereich des Versuches B beträchtlich höher sind als jene der Versuches A, während diese Bereiche in Versuch C überhaupt nicht von der Software erfasst worden sind. Zudem steigen die übrigen gemessenen Temperaturen mit jedem Versuch weiter an und die Schattenbilder passen nicht mit diesen Werten überein. Daher und auch aufgrund der stark abweichenden Schmelzbereiche ist eine manuelle Bestimmung dieser notwendig. Der einzige Unterschied zwischen den drei Versuchsdurchläufen ist der fehlende Kohlenstoff als Reduktionsmittel bei Versuch A. Da dieser Eisenoxide reduzieren soll, die in dieser Mischung jedoch kaum vorhanden sind, könnte die Beigabe Auswirkungen auf die Temperatur haben, wie aus den Versuchen B und C geschlussfolgert werden kann. Aufgrund der kleinen Probenmenge kann es sein, dass die Probe eine gewisse Inhomogenität ausweist, welche sich auf die Ergebnisse auswirkt.

Da für das weitere Vorgehen vor allem der Schmelzbereich relevant ist, wurde dieser manuell anhand der erfassten Schattenbilder und der Daten zur Flächenänderung bestimmt. Da sich der Schmelzbereich laut der Definition (siehe Kapitel 3.5) zwischen der Halbkugel- und der Schmelztemperatur befindet, wurde nach einem halbkugelförmigen Bild gesucht und auf Basis dessen die weiteren Punkte definiert. Dabei wurden die Daten der Bilder mit den Daten der Flächenänderungen abgeglichen. Abbildung 5-5 und Abbildung 5-6 zeigen die Schattenbilder der Versuche A und B, bei denen die Halbkugel- bzw. die Schmelztemperatur bestimmt worden ist.

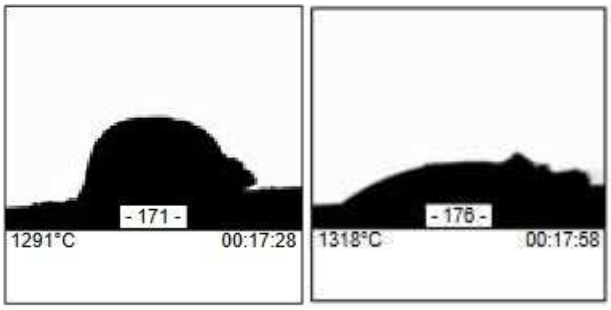

Abbildung 5-5: Schattenbilder bei Halbkugel- (links) und Schmelztemperatur (rechts) von Versuch A

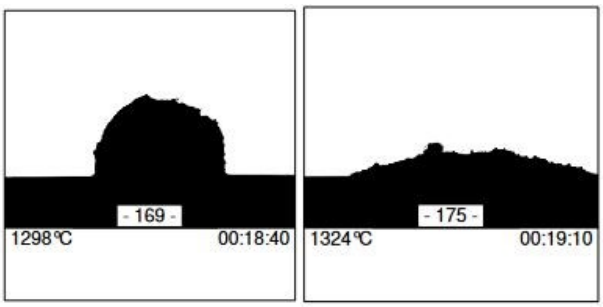

Abbildung 5-6: Schattenbilder bei Halbkugel- (links) und Schmelztemperatur (rechts) von Versuch B

Abbildung 5-7 zeigt die Schattenbilder des Versuchs C, wobei sich dabei keine deutliche Halbkugel ausgebildet hat und der Temperaturbereich im Vergleich zu A und B höher ist.

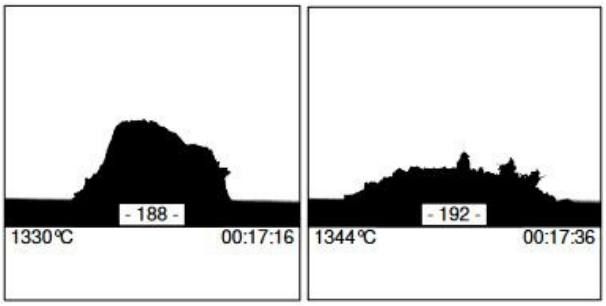

Abbildung 5-7: Schattenbilder bei Halbkugel- (links) und Schmelztemperatur (rechts) von Versuch C

In Tabelle 5-10 werden die Ergebnisse der manuellen Auswertung des Schmelztemperaturbereiches anhand der Halbkugel- und der Schmelztemperatur aufgelistet.

Tabelle 5-10: Ergebnisse der manuellen Bestimmung von Halbkugel- und Schmelztemperatur

	Einheit	**Mischung**		
		A	B	C
Halbkugeltemperatur	°C	1291	1298	1330
Schmelzbereich	°C	1291-1318	1298-1324	1330-1344
Schmelztemperatur	°C	1318	1324	1344

Beim Vergleich mit den Daten der Tabelle 5-9 wird deutlich, dass es zu starken Abweichungen zwischen der manuellen Auswertung und der von der Software erfassten Datenpunkte gekommen ist. Dies kann durch die abweichende Fasergeometrie in Hinblick auf die Dichte und das Volumen bedingt sein. Somit ändert sich auch das Schmelzverhalten der Inputmischung und kann nicht fehlerfrei mit einer softwarebasierten Auswertung bestimmt werden, die außerdem auf das Schmelzverhalten von Asche ausgelegt ist. Zudem ist es möglich, dass die Mischung nicht komplett homogen ist und es daher zu derart unterschiedlichen Ergebnissen kommt.

Neben der Auswertung der Schattenbilder kann auch die prozentuelle Flächenänderung bei steigender Temperatur betrachtet werden, die in Abbildung 5-8 dargestellt ist.

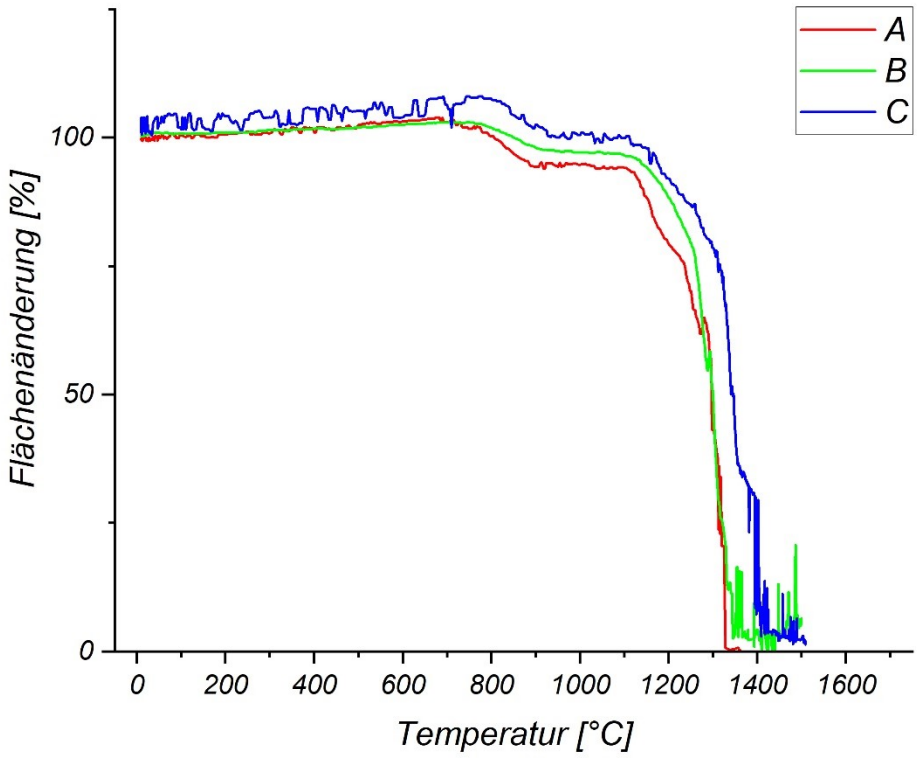

Abbildung 5-8: Prozentuelle Flächenänderung bei steigender Temperatur im Erhitzungsmikroskop

Alle drei Kurven zeigen einen ähnlichen Verlauf. Bei einer Temperatur von 1400 °C haben alle bereits den Schmelzbereich erreicht bzw. überschritten. Somit stimmt dies mit der Auswertung der Schattenbilder überein.

Da sich die Schmelztemperaturen der einzelnen Versuche in einem Bereich zwischen 1318 °C und 1344 °C befinden, wurde in weiterer Folge eine maximale Temperatur für den Elevatorofen von 1400 °C definiert, um eine Schmelze bei möglichst geringem Energieverbrauch zu garantieren.

5.6 Temperaturerfassung unter Einsatz der Infrarotkamera

Durch die Auswertung der Daten der Infrarotkamera (IR-Kamera) während des Abgusses können Erkenntnisse über die Temperatur der Schmelze getroffen werden. Auch die Dauer des Abgusses kann

mithilfe der Infrarotkamera-Daten ermittelt werden. In dem aufgezeichneten Infrarotvideo wird ein Messausschnitt gewählt, in dem der Abgussstrang bestmöglich zu sehen ist, wobei ein Emissionsfaktor von ε = 0,85 bei der Aufnahme sowie bei der Auswertung eingesetzt wurde. Abbildung 5-9 zeigt eine beispielhafte Aufnahme der IR-Kamera während der Durchführung des Abgusses. Der gewählte Messausschnitt ist erkennbar, in dem die maximale Temperatur gemessen wird.

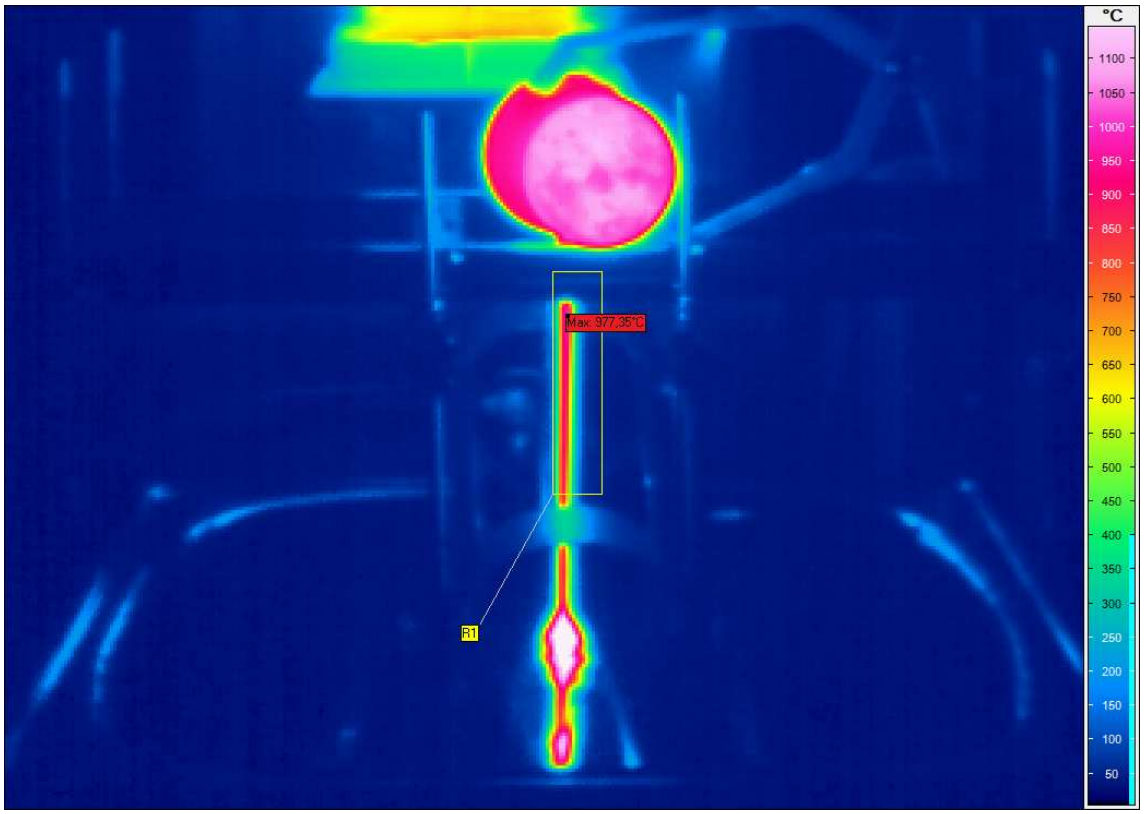

Abbildung 5-9: Aufnahme des Abgusses mit der IR-Kamera mit ε = 0,85

Die von der IR-Kamera erfassten Temperaturverläufe während des Abgusses der Schmelze sind in Abbildung 5-10 ersichtlich.

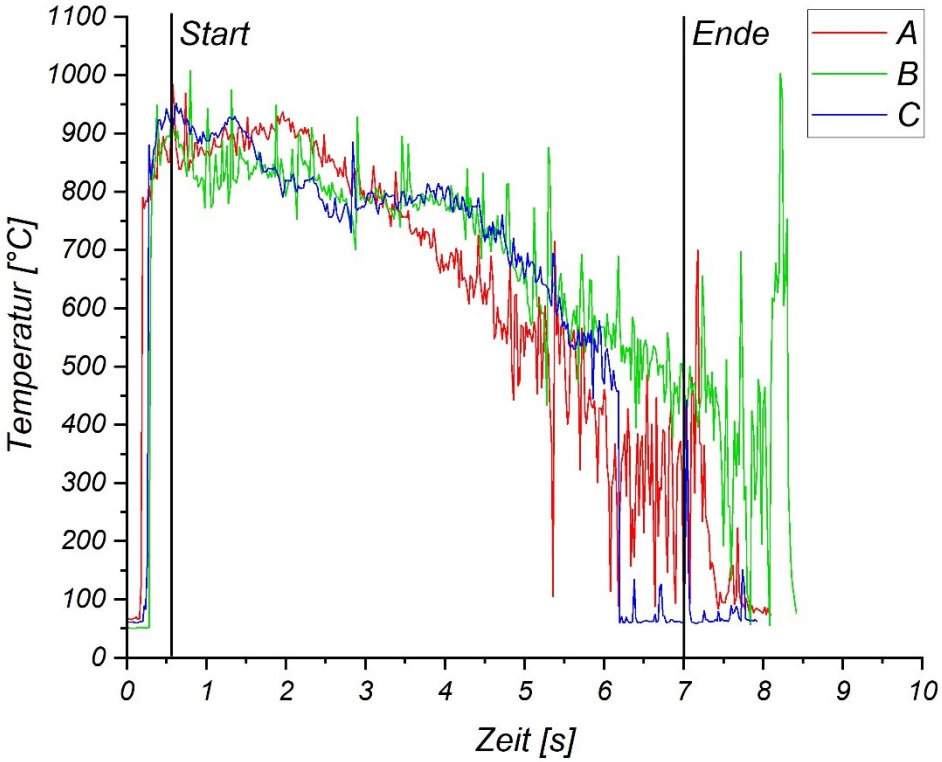

Abbildung 5-10: Gemessener Temperaturverlauf beim Abguss mit der IR-Kamera mit ε = 0,85 inkl. Markierung von Start und Ende des Abgusses

Die Abgussdauer ergibt sich aus der Interpretation des Temperaturverlaufs in dem gewählten Bildausschnitt und ist bei allen drei Versuchen sehr ähnlich, wie in Tabelle 5-11 ersichtlich ist. Auch die maximal erfasste Temperatur weist nur eine geringe Schwankungsbreite auf.

Tabelle 5-11: Ergebnisse der Abgussdauer und Temperaturbestimmung anhand Infrarotkamera-Daten

Versuch	Abgussdauer	Maximale Temperatur
[-]	[s]	[°C]
A	7	984
B	7	1008
C	8	952

Beim Vergleich der maximalen Temperatur der Proben beim Abguss mit der Ofentemperatur von 1400 °C wird deutlich, dass eine Abweichung von ca. 400 °C gemessen worden ist. Diese Abweichung kann aufgrund von Problemen mit dem Fokus aufgetreten sein oder der Emissionsfaktor von 0,85 wurde zu niedrig angesetzt. Es ist davon auszugehen, dass es sich um einen systematischen und reproduzierbaren Messfehler handelt, da die Schmelze laut Erhitzungsmikroskopie bei diesen Temperaturen nicht flüssig vorliegen kann.

5.7 Massenverlust

Im Zuge der einzelnen Schritte der Versuchsdurchführung sind Massenverluste des Probematerials aufgetreten. Tabelle 5-12 zeigt die Massen des Probenmaterials der erstellten Mischung.

Tabelle 5-12: Masse des Probenmaterials vor und nach der thermochemischen Behandlung

Versuch	Einwaage	Masse nach Trocknung	Masse nach Aufbereitung
[-]	[g]	[g]	[g]
A	687	593	585
B	700	601	593
C	716	607	598

Beim Vergleich der Einwaage mit der Masse der einzelnen Proben nach dem Trocknungsprozess bzw. nach der Aufbereitung wird eine Massendifferenz deutlich. Während der thermochemischen Behandlung ist ein Teil der Masse der Einwaage in die Gasphase übergegangen, ein weiterer Teil fiel bei der Nassgranulation als Feinanteil an und konnte nicht aufgefangen werden. Außerdem ist nach dem Abguss ein Rest der Schlacke im Tiegel verblieben. Bei der Aufbereitung sind weitaus geringere Verluste entstanden, wobei in dieser Hinsicht vor allem die Abtrennung der Metallphase eine Rolle spielt.

5.8 Oxidgehalt des Outputmaterials

Die Oxidgehalte bzw. die chemische Zusammensetzung der Produkte des Vor- und des Hauptversuches wurden mittels RFA analysiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in diesem Unterkapitel aufgeführt.

Vorversuche

Mit den Vorversuchen sollte herausgefunden werden, ob und inwieweit ein Unterschied erkennbar ist, wenn das Material bei unterschiedlichen Temperaturen und damit zu unterschiedlichen Zeitpunkten in den Ofenraum eingebracht wird. Tabelle 5-13 zeigt die entsprechenden Analyseergebnisse der chemischen Zusammensetzung des eingesetzten Hüttensands.

Tabelle 5-13: Oxidgehalte von Hüttensand aus den Vorversuchen

Oxide	Hüttensand	HÜS A	HÜS B	HÜS C
[-]	m.-%	m.-%	m.-%	m.-%
SiO_2	37,59	36,52	36,45	36,52
TiO_2	0,52	0,52	0,53	0,52
Al_2O_3	12,01	12,15	12,18	12,19
Fe_2O_3	-	-	-	-
FeO	-	0,57	0,72	0,66
MnO	1,28	2,73	2,73	2,70
MgO	9,44	10,27	10,29	10,31
CaO	36,49	33,85	33,93	33,69
K_2O	0,96	2,12	2,04	2,10
Na_2O	0,38	0,28	0,27	0,26
P_2O_5	-	<0,1	<0,1	<0,1
SO_3	-	-	-	-
S	-	0,57	0,57	0,57
Cl	-	<0,05	<0,05	<0,05
LOI	-	0,16	<0,05	0,19
Summe	99,99	99,75	99,76	99,75
[-]	ppm	ppm	ppm	ppm
V	-	< 50	< 50	< 50
Cr	-	< 50	< 50	< 50

Anhand der Daten ist erkennbar, dass sich die Gehalte der einzelnen Oxide bei veränderter Versuchsdurchführung weder von der ursprünglichen Zusammensetzung des Hüttensandes noch voneinander stark abweichen. Dies gilt ebenso für die Glasgehalte, die mit > 97 % festgelegt wurden. Dabei war jedoch kein eindeutiger Peak erkennbar, weswegen eine Unschärfe in der Bestimmung berücksichtigt werden muss.

Aus der chemischen Zusammensetzung und dem Glasgehalt kann geschlossen werden, dass es keinen Unterschied macht, bei welcher Temperatur das Probenmaterial in den Ofen eingebracht wird.

Hauptversuch

Auf Basis der Erkenntnisse der Vorversuche wurden die Hauptversuche mit der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle durchgeführt, die in Tabelle 4-3 angegeben ist. Die chemische Oxidzusammensetzung nach der thermochemischen Behandlung ist in Tabelle 5-14 einzusehen.

Tabelle 5-14: Oxidgehalte der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle (A-C) im Vergleich mit den theoretischen Oxidgehalten des Mischungsrechners (MR)

Oxide	MR	A	B	C
[-]	m.-%	m.-%	m.-%	m.-%
SiO_2	38,63	35,14	35,55	35,45
TiO_2	0,49	1,00	1,00	1,02
Al_2O_3	12,91	13,97	13,58	13,52
Fe_2O_3	0,24	2,50	2,26	1,80
FeO	0	-	-	-
MnO	0,19	0,45	0,44	0,45
MgO	6,68	5,17	5,16	5,13
CaO	36,19	37,82	37,85	38,32
K_2O	0,91	1,08	1,10	1,07
Na_2O	3,34	2,75	2,84	2,80
P_2O_5	0,01	0,14	0,12	0,14
SO_3	0,34	0,30	0,30	0,29
S	0	-	-	-
Cl	0	<0,05	<0,05	<0,05
LOI	-	-0,61	-0,48	-0,25
Summe	-	99,73	99,73	99,75
[-]	ppm	ppm	ppm	ppm
V	-	351	359	304
Cr	-	813	765	607

Auch bei diesen Proben wurde der Glasgehalt bestimmt, wobei alle drei in etwa den gleichen Anteil an amorphen Phasen aufweisen, der sich auf 95 % beläuft. Auf Basis dieser Analyseergebnisse lässt sich festhalten, dass kein wesentlicher Unterschied in der chemischen Zusammensetzung besteht, obwohl die Probe C bereits bei hoher Temperatur in den Ofen eingebracht worden ist. Der einzige erheblich abweichende Oxidgehalt ist jener des Fe_2O_3. Trotz Kohlenstoffzugabe konnte dieses Oxid nicht ausreduziert werden.

Dies lässt sich auf die Unterschreitung der Reaktionszeit zurückführen, da die Haltezeit und/oder die Temperatur nicht ausreichend für die Reaktion gewesen sind. Das liegt daran, dass bei der Wahl der Temperatur und der Haltezeit der thermochemischen Behandlung der Fokus auf dem Schmelzen der Fasergeometrie und nicht auf der Reduktion an sich gelegt wurde. Eine weitere mögliche Hypothese,

dass Fe_2O_3 nicht ausreduziert werden konnte, ist, dass die Gehalte an Cr- und Mn als Störkomponenten in der Zusammensetzung fungiert und sich gegenseitig gehemmt haben. [113]

Bei Betrachtung der Daten aus der Tabelle 5-14 im Dreistoffdiagramm, ergibt sich die Darstellung in Abbildung 5-11.

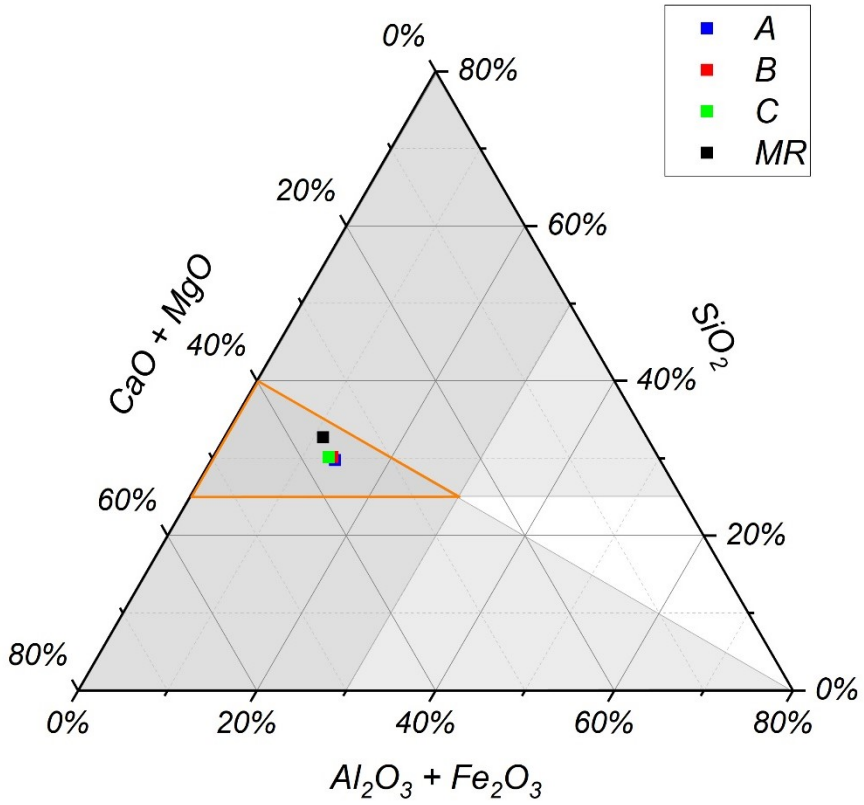

Abbildung 5-11: Darstellung der Oxidgehalte der Mischung nach der thermochemischen Behandlung im Dreistoffdiagramm inkl. markiertem Zielbereich (orange) für die Verwendung als SZS

Alle drei Datenpunkte befinden sich aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung im Zielbereich für ein Hüttensandsubstitut. Damit kann die Berechnung des MR validiert werden. Zudem ist das Ziel erreicht worden, eine Mischung aus KMF herzustellen, das nach der thermochemischen Behandlung eine ähnliche Zusammensetzung und damit ähnliche Eigenschaften wie Hüttensand aufweist. Die geringen Abweichungen lassen sich auf die Analyseungenauigkeit sowie eine nicht vollständig homogene Mischung zurückführen, aufgrund derer es zu geringen Änderungen der Gehalte der einzelnen Komponenten gekommen ist.

5.9 Reaktivität und Bindemitteleignung

Der R_S-Wert ist ein Kennwert für die Einschätzung der Reaktivität und der daraus folgenden Bindemitteleignung. Dieser Wert basiert auf der chemischen Zusammensetzung und dem Glasgehalt. [96] Der vom MR bestimmte R_S-Wert liegt bei 32, siehe Tabelle 5-7. In Tabelle 5-15 zeigt sich, dass der Glasgehalt bei den Analysen im Labor bei über 95 % liegt. Damit wird das Kriterium für HÜS in Bezug auf den amorphen Anteil, siehe Tabelle 2-4 übererfüllt, da dieser Wert möglichst hoch sein soll.

Tabelle 5-15: Glasgehalte der thermochemisch behandelten Proben von Hüttensand (HÜS A-HÜS C) sowie der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle (A-C)

	Einheit	**HÜS A**	**HÜS B**	**HÜS C**	**A**	**B**	**C**
Glasgehalt	[%]	97	97	97	95	95	95

Des Weiteren ergibt sich bei der Berechnung des R_s-Wertes aus den analysierten chemischen Zusammensetzungen unter Verwendung der gemessenen Glasgehalte ebenso eine Abweichung zu dem im MR bestimmten Wert von 32 (siehe Tabelle 5-7). Die neu berechneten Werte sind in Tabelle 5-16 aufgelistet. Dabei ist zu beachten, dass bei allen Mischungen kein FeO festgestellt werden konnte. Daher wurden die Werte von Fe_2O_3 auf FeO umgerechnet und in der R_S-Berechnung berücksichtigt.

Tabelle 5-16: Berechnete R_s-Werte der thermochemisch behandelten Proben von Hüttensand (HÜS A-HÜS C) sowie der Mischung aus Flugasche, Glas- und Steinwolle (A-C)

	Einheit	**HÜS A**	**HÜS B**	**HÜS C**	**A**	**B**	**C**
R_s	[-]	34	34	34	36	35	35

Es ist ersichtlich, dass auf Basis der thermochemischen Behandlung die chemische Zusammensetzung so weit verändert wird, dass der R_s-Wert im Vergleich zu HÜS steigt. Damit sind die Anforderungen für Eignung als Bindemittel erfüllt. Da sich dieser Wert idealerweise in einem Wertebereich zwischen 30 und 50 bewegt, liegen die Ergebnisse näher bei der unteren Grenze, was bei der Mischungsberechnung auch angestrebt wurde.

Es wurde auch ein R^3-Test mit allen Mischungen sowie einer Probe von HÜS durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tabelle 5-17 angegeben.

Tabelle 5-17: Ergebnisse des R^3-Tests

	Einheit	HÜS A	HÜS C	A	B	C
kumulative Wärme	J/g Probe	39,5	41,6	29,5	31,9	32,2
kumulative Wärme	J/g Schlacke	396,6	416,8	295,1	316,3	322,9
gebundenes Wasser	g/100 g trockener Leim	4,3	7,5	4,0	4,5	4,5
Portlanditverbrauch	g/100 g Schlacke	103,9	-	81,7	101,2	108,1

Bei der kumulativen Wärme gibt es den Richtwert von 250 J/g Schlacke, bei dem bei Überschreitung davon ausgegangen werden kann, dass das Material eine gute Reaktivität aufweist. [114, 115] Dieser ist bei allen analysierten Proben deutlich höher. Beim gebundenen Wasser ist als Richtwert 6 g/g trockener Leim anzuwenden und der Portlanditverbrauch sollte größer sein als 40 g/g Schlacke, um die gewünschte Reaktivität erreichen zu können. [109] Der Richtwert den gebundenen Wassers wird nur bei HÜS C überschritten. Der Verbrauch an Portlandit ist bei allen Analysen erheblich höher als der angegebene Richtwert für den Mindestgehalt.

Bei der Gegenüberstellung der kumulativen Wärme mit dem R_s-Wert in Abbildung 5-12 wird deutlich, dass alle drei Mischungen eine gute Korrelation aufweisen und die Tendenz zu einer guten hydraulischen Reaktivität besteht. Somit erfüllt die Mischung die gegenständlichen Kriterien von der chemischen Zusammensetzung über den Glasgehalt bis zur hydraulischen Reaktivität, um als Sekundärzumahlstoff eingesetzt werden zu können.

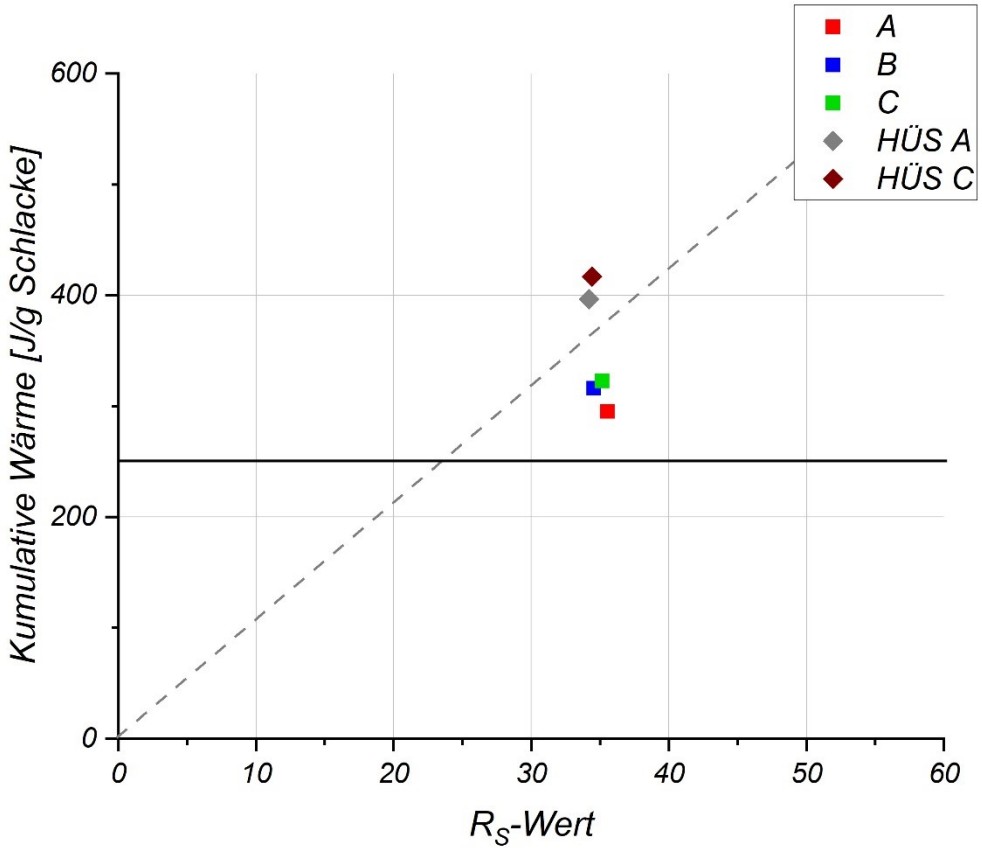

Abbildung 5-12: Gegenüberstellung der kumulativen Wärme der thermochemisch behandelten Proben mit dem berechneten R_s-Wert inkl. des Richtwertes der kumulativen Wärme (schwarzer Strich)

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die gegenständliche Arbeit beschäftigt sich mit dem Recyclingpotenial von künstlichen Mineralfasern in der Zementindustrie. Zu Beginn werden vor allem die rechtlichen Rahmenbedingungen genau beleuchtet. Mit der Novellierung der Deponierverordnung und dem damit einhergehenden Deponieverbot ab dem Jahr 2027 wird es besonders wichtig, Wieder- und Weiterverwendungsmöglichkeiten für die KMF-Abfälle zu finden. Bis zum Jahr 2024 sollen dabei wirtschaftlich umsetzbare Verfahren entwickelt werden. Mit dieser Aufgabe beschäftigt sich auch das Projekt „BitKOIN – Entwicklung CO_2-reduzierter Bindemittel durch thermochemische Konversion mineralwollabfallhaltiger Reststoffkombinationen“ an der Montanuniversität Leoben, in dem das Ziel die Verwertung von Mineralwolleabfällen als Hüttensandsubstitut in der Zementindustrie ist.

Diese Art der Verwertung ist in zweierlei Hinsicht erstrebenswert: Einerseits in Anbetracht der Bestrebungen zur Senkung der Emissionen in der Zementherstellung und andererseits wegen der abnehmenden Verfügbarkeit von Hüttensand, dem mengenmäßig größten Sekundärzumahlstoff, infolge der Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlindustrie.

Daher verfolgt diese Arbeit das Ziel, ein Granulat aus Glas- und Steinwolleabfällen herzustellen, das potenziell als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie eingesetzt werden kann. Es ist einerseits wichtig, eine Mischung aus Korrekturstoffen, Glas- und Steinwolle zu finden, welche die notwendige Zusammensetzung aufweist, und andererseits gilt es geeignete Parameter für eine erfolgreiche thermochemische Behandlung mit anschließender Nassgranulation zu definieren. Dabei wird konventioneller Hüttensand als Referenzmaterial herangezogen.

Durch eine Literaturrecherche konnten Daten von Zusammensetzungen von Glas- und Steinwolle zusammengetragen und für eine weitere Analyse aufbereitet werden. Daraus wurden Dreistoffdiagramme erstellt, die die Bereiche der unterschiedlichen chemischen Zusammensetzungen der KMF aufzeigen und ins Verhältnis mit dem Zielbereich für ein Hüttensandsubstitut setzen. Die Abbildung 6-1 zeigt die zusammengefassten Ergebnisse dieser Betrachtung.

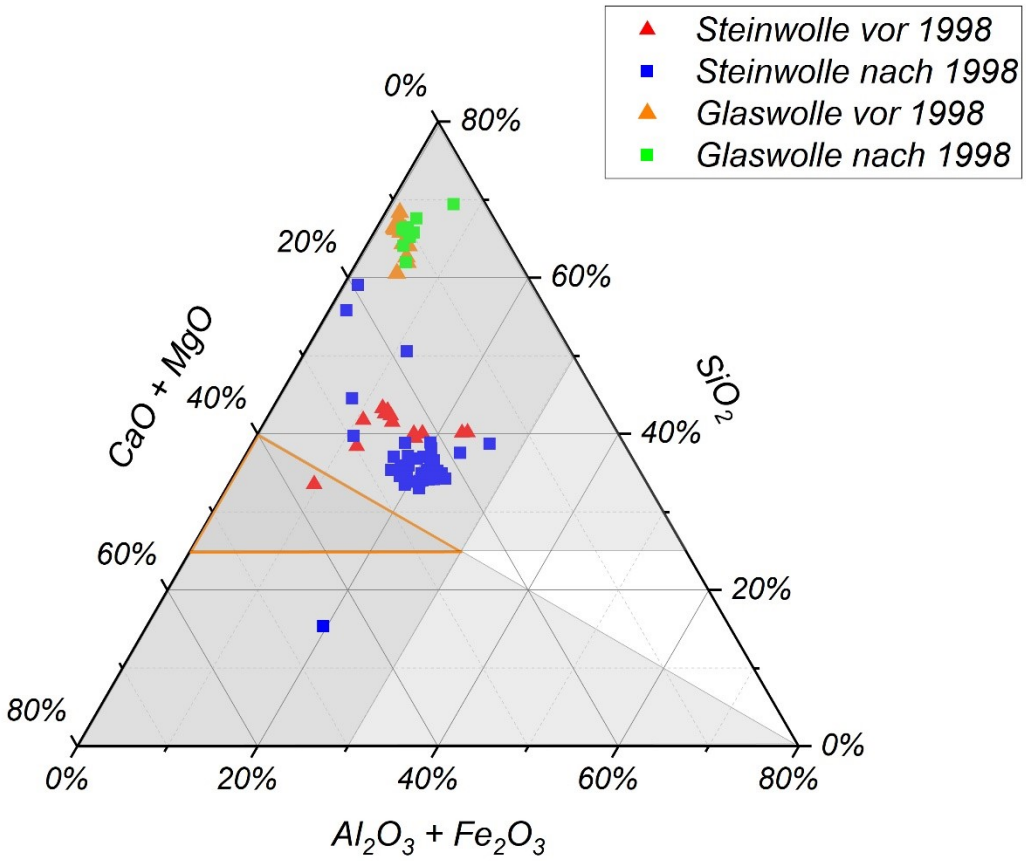

Abbildung 6-1: Literaturwerte von Glas- und Steinwolle im Dreistoffdiagramm

Des Weiteren wurden diese historischen Daten herangezogen, um die dynamische Viskosität in einem Temperaturbereich von 1000 °C bis 1700 °C darzustellen. Durch diese theoretische Betrachtung soll ein geeignetes Prozessfenster bei der thermochemischen Behandlung abgeleitet werden. Es zeigt sich, dass sich eine weite Brandbreite an möglichen chemischen Zusammensetzungen ergibt, die in weiterer Folge einen hohen Einfluss auf die dynamische Viskosität haben.

Durch die Darstellungen im Dreistoffdiagramm sowie die Untersuchungen der dynamischen Viskosität wird deutlich, dass es aufgrund der großen Unterschiede in den Oxidgehalten schwierig ist, die Zusammensetzung KMF-Abfälle zu genau festzulegen. Aufgrund von Produktionsschwankungen

bei den verschiedenen Herstellerunternehmen sowie diversen Verunreinigungen auf der Baustelle gilt es, einen Bereich, in dem sich diese Schwankungen bewegen, festzulegen. Damit geht einher, dass einerseits eine Rückführbarkeit in die Primärproduktion unter Einhaltung der EUCEB-Kriterien und andererseits die Erstellung einer Zielzusammensetzung für die thermochemische Behandlung bei gleichbleibender Qualität des Produktes eine Hürde darstellt.

Mithilfe eines Mischungsrechners konnte eine Mischung aus Glas- und Steinwolle sowie Flugasche, die als calciumhaltiger Korrekturstoff dient, berechnet und behandelt werden. Diese wurde durch erste Versuche im Erhitzungsmikroskop auf ihren Schmelzbereich und damit ihr Schmelzverhalten untersucht. Dadurch konnte in weiterer Folge die benötigte maximale Ofentemperatur von 1400°C für die Experimente im Widerstandofen bestimmt werden. Diese hat sich bei der thermochemischen Behandlung und anschließender Nassgranulation auch als geeignet erwiesen, da die Schmelze fast vollständig abgegossen werden konnte. Das Outputmaterial wurde nach der Aufbereitung auf dessen Glasgehalt und chemischer Zusammensetzung mittels einer RFA analysiert. Außerdem erfolgte die Durchführung eines R^3-Tests, um eine Abschätzung der Reaktivität zu bekommen.

Darauf aufbauend konnte festgestellt werden, dass es zwischen den Oxidgehalten der drei Versuchsdurchläufe nur zu geringen Änderungen gekommen ist. Bei der Darstellung im Dreistoffdiagramm wurde außerdem ersichtlich, dass sich die Mischung nach der thermochemischen Behandlung im Zielbereich für ein Hüttensandsubstitut befindet. Zudem liegt der Glasgehalt mit 95 % deutlich über den von der Zementindustrie geforderten von 66 %. Abschließend weisen die Ergebnisse des R_3-Tests auf, dass das Material eine Tendenz für eine gute Reaktivität besitzt. Somit wurde eine Zusammensetzung von Flugasche, Glas- und Steinwolle gefunden, die alle gegenständlichen Anforderungen zur Verwendung als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie erfüllt.

Für weitere Forschungen im Bereich der Wieder- bzw. Weiterverwendung von KMF-Abfällen ist es wichtig, sich mit der Berechnung der dynamischen Viskosität von KMF und KMF-Mischungen auseinanderzusetzen, um darauf aufbauend alternative Abkühlvarianten zu entwickeln bzw. zu testen. Dafür könnte beispielsweise eine auf KMF angepasste Trockenschlackengranulation eingesetzt werden, die sich derzeit noch in Entwicklung befindet und bei Hochofenschlacken bereits im Pilotmaßstab getestet wurde. [116]

Abgesehen von weiteren Auseinandersetzungen mit den bereits vorhandenen Literaturdaten ist auch die Erstellung von weiteren Mischungen aus KMF und Korrekturstoffen sowie deren thermochemischer Behandlung samt anschließender Analyse relevant, um einen genaueren „Zielbereich“ in Bezug auf die chemische Zusammensetzung der Substanzen definieren zu können. Diese sollte einerseits einen möglichst geringen Korrekturstoffbedarf aufweisen und andererseits

trotzdem den Produktanforderungen entsprechen. Bezüglich des Einsatzes an Korrekturstoffen hat vor allem die mögliche Verwendung von Bypassstaub aus der Zementproduktion als Calciumträger großes Potential in Hinblick auf Kosten und Verfügbarkeit.

Weitere Schritte, die im Zuge des Projektes „BitKOIN“ durchgeführt werden, sind die thermochemischen Behandlungen von KMF-Mischungen in der Anlage „InduMelt“ und darauf aufbauend bei einer noch größeren Anlage des Projektpartners IBE Anlagentechnik GmbH. Somit können die Probenmengen sukzessiv erhöht werden, damit baustoffliche Untersuchungen durchgeführt werden können.

7 Literaturverzeichnis

[1] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *Der europäische Grüne Deal*. URL: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_de. – Aktualisierungsdatum: 09.12.2023 – Überprüfungsdatum: 09.12.2023

[2] LÖSCHEL, Andreas: *European Green Deal und deutsche Energiewende zusammen denken!* In: *Wirtschaftsdienst* 100 (2020), Nr. 2, S. 78–79. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10273-020-2566-x

[3] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *Richtlinie über Abfalldeponien* (in Kraft getr. am 30. 5. 2018) (2018-05-30). URL: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=celex%3A32018L0850 – Überprüfungsdatum: 21.07.2023

[4] BUNDESMINISTERS FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT: *Verordnung des Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft über Deponien* (idF v. Fassung vom 15. 3. 2023) (2023). URL: https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20005653/DVO%202008%2c%20Fassung%20vom%2015.03.2023.pdf – Überprüfungsdatum: 15.03.2023

[5] BAYERISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT: *Künstliche Mineralfasern*. URL: https://www.lfu.bayern.de/buerger/doc/uw_32_kuenstliche_mineralfasern.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2018 – Überprüfungsdatum: 09.03.2023

[6] INSTITUT FÜR ABFALLVERWERTUNGSTECHNIK & ABFALLWIRTSCHAFT: *BitKOIN* : *CO2-reduzierte Bindemittel durch thermochemische Konversion mineralwolleabfallhaltiger Reststoffkombinationen*. URL:

https://www.avaw-unileoben.at/de/forschung-projekte-bitkoin/. – Aktualisierungsdatum: 06.07.2023 – Überprüfungsdatum: 06.07.2023

[7] SATTLER, Theresa ; VOLLPRECHT, Daniel ; POMBERGER, Roland: Recycling of Mineral Wool Waste in the Cement Industry and Mineral Wool Industry, Bd. 7. In: THIEL, Stephanie; THOMÉ-KOZMIENSKY, Elisabeth; SENK, Dieter (Hrsg.): *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle* : *Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen*. Neuruppin : Thomé-Kozmiensky Verlag GmbH, 2020, S. 342–355

[8] EUROPEAN COMMISSION: *EU Construction and Demolition Waste Management Protocol* : *Executive summary*. URL: https://ec.europa.eu/newsroom/growth/items/455097/en. – Aktualisierungsdatum: 18.09.2018 – Überprüfungsdatum: 14.10.2023

[9] BUNDESMINISTERIN FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Grundsätze der Abfallwirtschaft*. URL: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/awsgrundsaetze.html. – Aktualisierungsdatum: 14.10.2023 – Überprüfungsdatum: 14.10.2023

[10] BUNDESMINISTERIUM FÜR NACHHALTIGKEIT UND TOURISMUS: *Künstliche Mineralfaserabfälle – KMF-Abfälle ab der Baustelle* : *Leitfaden*. URL: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/verwertung/studien/kmf.html. – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum: 09.03.2023

[11] SATTLER, Theresa ; GALLER, Robert ; VOLLPRECHT, Daniel: *Entwicklung innovativer Recyclingverfahren für Mineralwolleabfälle – Projekt RecyMin*. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 164 (2019), Nr. 12, S. 552–556. URL: https://pure.unileoben.ac.at/portal/files/8306262/AC16431841.pdf

[12] BUNDESINSTITUT FÜR BAU-, STADT- UND RAUMFORSCHUNG: *Künstliche Mineralfaserdämmstoffe*. URL: https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/berichte-kompakt/2011/DL_1_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=1. – Aktualisierungsdatum: 2011 – Überprüfungsdatum: 11.04.2023

[13] VÄNTSI, Olli ; KÄRKI, Timo: *Mineral wool waste in Europe: a review of mineral wool waste quantity, quality, and current recycling methods* 16 (2014), Nr. 1, S. 62–72. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-013-0170-5 – Überprüfungsdatum: 15.12.2023

[14] BAUHAUS: *Thermaflex ThermaGo Alu-Mineralwolle 15/20* : *Durchmesser: 15 mm, Dämmstärke: 20 mm, Länge: 1 m*. URL: https://www.bauhaus.at. – Aktualisierungsdatum: 26.10.2023 – Überprüfungsdatum: 26.10.2023

[15] BAUNETZ: *Mineralwolle | Dämmstoffe | Dämmstoffe | Baunetz_Wissen*. URL: https://www.baunetzwissen.de/daemmstoffe/fachwissen/daemmstoffe/mineralwolle-152218 – Überprüfungsdatum: 26.10.2023

[16] EUROPEAN COMMISSION: *Best Available Techniques (BAT) Reference Document for the Manufacture of Glass* : *Industrial Emissions Directive 2010/75/EU (Integrated Pollution Prevention and Control)*. URL: https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/ff8a3955-d0d0-46f5-8a15-4b638896cb56. – Aktualisierungsdatum: 2013 – Überprüfungsdatum: 30.03.2023

[17] MÜLLER, Anette ; LEYDOLPH, Barbara ; STANELLE, Katja: *Recycling mineral wool waste - technologies for the conservation of fiber structure*. In: *InterCeram: International Ceramic Review* (2009), S. 378–381. URL: https://www.researchgate.net/publication/269410931_Recycling_mineral_wool_waste_-_technologies_for_the_conservation_of_fiber_structure – Überprüfungsdatum: 11.02.2023

[18] FMI FACHVERBAND MINERALWOLLEINDUSTRIE E.V.; INSTITUT BAUEN UND UMWELT E.V.: *Umwelt-Produktdeklaration: Mineralwolle-Dämmstoff in niedrigem Rohdichtebereich*. URL: https://www.fmi-mineralwolle.de/mineralwolle/epds-umwelt-produktdeklarationen. – Aktualisierungsdatum: 2021 – Überprüfungsdatum: 13.04.2023

[19] PAVLIN, Majda ; HORVAT, Barbara ; FRANKOVIČ, Ana ; DUCMAN, Vilma: *Mechanical, microstructural and mineralogical evaluation of alkali-activated waste glass and stone wool*. In: *Ceramics International* 47 (2021), Nr. 11, S. 15102–15113. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0272884221004168

[20] MÜLLER, F.: *Mineralwolle* : *Factsheet*. URL: https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/dokumente/factsheet_mineralwolle_fi_barrierefrei.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum: 19.03.2023

[21] MIMRA, Christiane: *Recycling von Mineralwolle - Behandlung von Steinwolle zur potentiellen Verwertung als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Masterarbeit. 2021

[22] FACHVEREINIGUNG MINERALWOLLEINDUSTRIE: *Q&A zur Entsorgung von Mineralwolle in Österreich*. URL: https://www.fmi-austria.at/presse/qa-zur-entsorgung-von-mineralwolle-in-oesterreich/. – Aktualisierungsdatum: 15.03.2023 – Überprüfungsdatum: 15.03.2023

[23] EUROPÄISCHES PARLAMENT UND RAT: *Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen* (in Kraft getr. am 2022) (2022). URL: https://eur-

lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A32008R1272&qid=1681276551823 – Überprüfungsdatum: 12.04.2023

[24] RAL DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG E.V.: *Das RAL Gütezeichen "Erzeugnisse aus Mineralwolle"*. URL: https://www.ral-mineralwolle.de/das-ral-guetezeichen.html. – Aktualisierungsdatum: 12.04.2023 – Überprüfungsdatum: 12.04.2023

[25] RAL DEUTSCHES INSTITUT FÜR GÜTESICHERUNG UND KENNZEICHNUNG E.V.: *Erzeugnisse aus Mineralwolle | RAL Gütezeichen*. URL: https://www.ral-guetezeichen.de/gz-einzelansicht/?gz=gz_388. – Aktualisierungsdatum: 12.04.2023 – Überprüfungsdatum: 12.04.2023

[26] EUROPEAN CERTIFICATION BOARD FOR MINERAL WOOL PRODUCTS: *EUCEB - How to recognise the EUCEB Trademark ?* URL: https://www.euceb.org/index.php?page=how-to-recognise-the-euceb-trademark. – Aktualisierungsdatum: 12.04.2023 – Überprüfungsdatum: 12.04.2023

[27] ZEMAN, R.: *„Deponieverordnung bedroht Klimaschutz und Baukonjunktur“* : *Rückgang der thermischen Gebäudesanierung erwartet*. URL: https://www.holzbauaustria.at/news/2020/09/neue-deponieverordnung.html. – Aktualisierungsdatum: 12.10.2020 – Überprüfungsdatum: 15.03.2023

[28] BUNDESMINISTERIN FÜR KLIMASCHUTZ, UMWELT, ENERGIE, MOBILITÄT, INNOVATION UND TECHNOLOGIE: *Abfallverzeichnisverordnung 2020* (idF v. 16. 3. 2023) (2023). URL: https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20011285 – Überprüfungsdatum: 16.03.2023

[29] UMWELTBUNDESAMT: *EDM Portal - Aktuelle Liste - 5174: Abfallverzeichnis gemäß Österreichischer Abfallverzeichnisverordnung*. URL: https://secure.umweltbundesamt.at/edm_portal/redaList.do?seqCode=c2ck5gyutbw7qf&d-49520-p=9. – Aktualisierungsdatum: 15.03.2023 – Überprüfungsdatum: 15.03.2023

[30] ÖSTERREICHISCHER BAUSTOFF-RECYCLING VERBAND: *Baustoff-Recycling ist die erste Wahl!* In: *e.l.b.w.-Umwelttechnik* (2021), Nr. 3, S. 10–11. URL: http://brv.at/deponieverbot-fuer-beton-asphalt-strassenaufbruch-baustoff-recycling-ist-die-erste-wahl/ – Überprüfungsdatum: 15.03.2023

[31] WEHRBERGER, F.: *Circular Economy - Stop Talkin - Start Acting!* URL: https://www.ogni.at/wp-content/uploads/OeGNI_Paper_CE_EN.pdf – Überprüfungsdatum: 11.10.2023

[32] BARTASHOV, V. ; GRASS, K. ; SUCKER, J.: Der induktive Inline-Ofen für Recycling und Verwertung mineralischer Abfälle und Reststoffe. In: POMBERGER, Roland; ADAM, Josef; ALLENDORFER, Michael (Hrsg.): *Recy & DepoTech 2022* : *Recycling & Abfallverwertung, Abfallwirtschaft &*

Ressourcenmanagement, Deponietechnik & Altlasten, internationale Abfallwirtschaft : Konferenzband zur 16. Recy & DepoTech-Konferenz, Montanuniversität Leoben, Österreich, 09.-11. November 2020. Leoben, Österreich : Abfallverwertungstechnik & Abfallwirtschaft Eigenverlag, 2022, S. 717–724

[33] SCHULTZ-FALK, Vickie ; AGERSTED, Karsten ; JENSEN, Peter Arendt ; SOLVANG, Mette: *Melting behaviour of raw materials and recycled stone wool waste*. In: *Journal of Non-Crystalline Solids* 485 (2018), S. 34–41. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022309318300413?via%3Dihub – Überprüfungsdatum: 13.03.2023

[34] FACHVEREINIGUNG MINERALWOLLEINDUSTRIE: *Was Sie schon immer über Mineralwolle wissen wollten.* URL: https://www.fmi-austria.at/wp-content/uploads/2019/05/FMI_Folder_Kampagne_190408_web.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2019 – Überprüfungsdatum: 18.03.2023

[35] PORR ÖSTERREICH: *One step closer to a circular economy*. URL: https://porr.at/en/media/press-releases/press-releases/press-release/news/one-step-closer-to-a-circular-economy/. – Aktualisierungsdatum: 19.03.2023 – Überprüfungsdatum: 19.03.2023

[36] NEUBAUER, C.; BERNHARDT, A.; BRANDSTÄTTER, C.; BRONEDER, C.; KRAL, U.; OLIVA, J.; MICHAEL ROLL, M.; SCHAFFERNAK, A.; STOIFL, B.; TESAR, M.; TISTA, M.; WALTER, B.; WEIßENBACH, T.: *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich* : *Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021*. URL: https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/aws/bundes_awp/bawp2023.html. – Aktualisierungsdatum: 2023 – Überprüfungsdatum: 02.11.2023

[37] BERNSTEIN, David M. ; MORSCHEIDT, Charles ; GRIMM, Hans-Günther ; THÉVENAZ, Philippe ; TEICHERT, Ullrich: *Evaluation of Soluble fibers Using the Inhalation Biopersistence Model, a Nine-fiber Comparison*. In: *Inhalation Toxicology* 8 (1996), Nr. 4, S. 345–385

[38] CAMPOPIANO, Antonella ; CANNIZZARO, Annapaola ; ANGELOSANTO, Federica ; ASTOLFI, Maria Luisa ; RAMIRES, Deborah ; OLORI, Angelo ; CANEPARI, Silvia ; IAVICOLI, Sergio: *Dissolution of glass wool, rock wool and alkaline earth silicate wool: morphological and chemical changes in fibers*. In: *Regulatory toxicology and pharmacology : RTP* 70 (2014), Nr. 1, S. 393–406. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273230014001123

[39] CHRISTENSEN, V. R. ; JENSEN, S. L. ; GULDBERG, M. ; KAMSTRUP, O.: *Effect of chemical composition of man-made vitreous fibers on the rate of dissolution in vitro at different pHs*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 Suppl 5 (1994), Suppl 5, S. 83–86

[40] GULDBERG, M. ; MERINGO, A. de ; KAMSTRUP, O. ; FURTAK, H. ; ROSSITER, C.: *The development of glass and stone wool compositions with increased biosolubility*. In: *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 32 (2000), Nr. 2, S. 184–189. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273230000914181

[41] GULDBERG, Marianne ; CHRISTENSEN, Vermund R. ; PERANDER, Michael ; ZOITOS, Bruce ; KOENIG, Alan R. ; SEBASTIAN, Klaus: *Measurement of in- vitro fibre dissolution rate at acidic pH*. In: *The Annals of occupational hygiene* 42 (1998), Nr. 4, S. 233–243. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000348789800026X

[42] HESTERBERG, T. W. ; CHASE, G. ; AXTEN, C. ; MILLER, W. C. ; MUSSELMAN, R. P. ; KAMSTRUP, O. ; HADLEY, J. ; MORSCHEIDT, C. ; BERNSTEIN, D. M. ; THEVENAZ, P.: *Biopersistence of synthetic vitreous fibers and amosite asbestos in the rat lung following inhalation*. In: *Toxicology and Applied Pharmacology* 151 (1998), Nr. 2, S. 262–275. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0041008X98984721

[43] KAMSTRUP, O. ; ELLEHAUGE, A. ; CHEVALIER, J. ; DAVIS, J. M. ; MCCONNELL, E. E. ; THÉVENAZ, P.: *Chronic inhalation studies of two types of stone wool fibers in rats*. In: *Inhalation Toxicology* 13 (2001), Nr. 7, S. 603–621. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/11452357/ – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[44] LE BOUFFANT, L.; DANIEL, H.; HENIN, J. P.; MARTIN, J. C.; NORMAND, C.; TICHOUX, G.; TROLARD, F.: *Experimental study on long-term effects of inhaled MMMF on the lungs of rats*. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/3450235/ – Überprüfungsdatum: 15.12.2023

[45] LUOTO, K. ; HOLOPAINEN, M. ; KANGAS, J. ; KALLIOKOSKI, P. ; SAVOLAINEN, K.: *Dissolution of short and long rockwool and glasswool fibers by macrophages in flowthrough cell culture*. In: *Environmental Research* 78 (1998), Nr. 1, S. 25–37. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0013935197938251

[46] LUOTO, K. ; HOLOPAINEN, M. ; SAVOLAINEN, K.: *Durability of man-made vitreous fibres as assessed by dissolution of silicon, iron and aluminium in rat alveolar macrophages*. In: *The Annals of occupational hygiene* 39 (1995), Nr. 6, S. 855–867. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0003487895000526

[47] LUOTO, Kirsi ; HOLOPAINEN, Mikko ; KARPPINEN, Kirsti ; PERANDER, Michael ; SAVOLAINEN, Kai: *Dissolution of Man-Made Vitreous Fibers in Rat Alveolar Macrophage Culture and Gamble's Saline Solution: Influence of Different Media and Chemical Composition of the Fibers*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 (1994), S. 103. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7882911/ – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[48] MATTSON, S. M.: *Glass fiber dissolution in simulated lung fluid and measures needed to improve consistency and correspondence to in vivo dissolution*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 Suppl 5 (1994), Suppl 5, S. 87–90. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7882963/ – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[49] MCCONNELL, E. E.: *A science-based paradigm for the classification of synthetic vitreous fibers*. In: *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 32 (2000), Nr. 1, S. 14–21. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0273230000914090

[50] MORGAN, A.: *In vivo evaluation of chemical biopersistence of man-made mineral fibers*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 Suppl 5 (1994), Suppl 5, S. 127–131. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1567281/

[51] MORGAN, A. ; HOLMES, A.: *Solubility of rockwool fibres in vivo and the formation of pseudo-asbestos bodies*. In: *The Annals of occupational hygiene* 28 (1984), Nr. 3, S. 307–314. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/6508081/ – Überprüfungsdatum: 15.12.2023

[52] SCHOLZE, H. ; CONRADT, R.: *An in vitro study of the chemical durability of siliceous fibres*. In: *The Annals of occupational hygiene* 31 (1987), 4B, S. 683–692. URL: https://academic.oup.com/annweh/article-abstract/31/4B/683/162105?redirectedFrom=fulltext

[53] THELOHAN, Sylvie ; MERINGO, Alain de: *In Vitro Dynamic Solubility Test: Influence of Various Parameters*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 (1994), S. 91

[54] WOHLLEBEN, Wendel ; WAINDOK, Hubert ; DAUMANN, Björn ; WERLE, Kai ; DRUM, Melanie ; EGENOLF, Heiko: *Composition, Respirable Fraction and Dissolution Rate of 24 Stone Wool MMVF with their Binder*. In: *Particle and Fibre Toxicology* 14 (2017), Nr. 1, S. 29. URL: https://particleandfibretoxicology.biomedcentral.com/articles/10.1186/s12989-017-0210-8

[55] ALVES, Joner Oliveira ; ESPINOSA, Denise Crocce Romano ; TENÓRIO, Jorge Alberto Soares: *Recovery of Steelmaking Slag and Granite Waste in the Production of Rock Wool*. In: *Materials Research* 18 (2015), Nr. 1, S. 204–211. URL:

https://www.scielo.br/j/mr/a/c4v8PHLJB8GNgv5fTXw3JSM/?lang=en – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[56] JI, Ru ; ZHENG, Yaxian ; ZOU, Zehui ; CHEN, Ziwei ; WEI, Shen ; JIN, Xiaoyong ; ZHANG, Mei: *Utilization of mineral wool waste and waste glass for synthesis of foam glass at low temperature*. In: *Construction and Building Materials* 215 (2019), S. 623–632. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819311201 – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[57] KINNUNEN, P. ; YLINIEMI, J. ; TALLING, B. ; ILLIKAINEN, M.: *Rockwool waste in fly ash geopolymer composites*. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* (2017). URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Rockwool-waste-in-fly-ash-geopolymer-composites-Kinnunen-Yliniemi/32a806791423ae8d17b7eed711a220b1ab0a643a

[58] KUBILIUTE, R. ; KAMINSKAS, R. ; KAZLAUSKAITE, A.: *Mineral wool production waste as an additive for Portland cement*. In: *Cement & Concrete Composites* (2018), 284–287, 113–117. URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Mineral-wool-production-waste-as-an-additive-for-Kubiliute-Kaminskas/9f00fb53d77bc2814de10e14a8c998b42bfc0887

[59] LIN, Wei Ting ; HAN, Ta Yuan ; WU, Yuan Chieh ; an CHENG ; HUANG, Ran ; WENG, Tsai Lung: *Engineered Properties of Sustainable Cement-Based Composites Containing Recycled Rock Wool and Supplementary Cementitious Materials*. In: *Applied Mechanics and Materials* 284-287 (2013), S. 113–117. URL: https://www.researchgate.net/publication/258743205_Engineered_Properties_of_Sustainable_Cement-Based_Composites_Containing_Recycled_Rock_Wool_and_Supplementary_Cementitious_Materials – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[60] MENON, Sarath ; NARANJE, Vishal Gangadhar: *Experimental Investigation of Recycling of Rock-Wool Insulation as Insulator in Concrete Blocks*. In: *International Journal of Engineering and Applied Sciences* (2017). URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Experimental-Investigation-of-Recycling-of-as-in-Menon/f633982c0b09e00fb510afb791d12ef4d28a8519

[61] NAMCHAN, Panisara ; DENPETKUL, T. ; PHEINSUSOM, P. ; KHAODHIAR, Sutha: *Rock Wool and Printed Circuit Boards (PCBs) as Partial Fine Aggregate Replacements in Cement Mortar*. In: *Key Engineering Materials* 775 (2018), S. 567–575. URL: https://www.scientific.net/KEM.775.567

[62] RAMÍREZA, C. ; SÁNCHEZB, E. A. ; MERINOA, M. d. R. ; ARREBOLAC, C. V. ; BARRIGUETE, A. V.: *Feasibility of t he use of mineral wool fibres recovered from CDW for the reinforcement of conglomerates*

by s tudy of their porosity (2019). URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Feasibility-of-the-use-of-mineral-wool-fibres-from-Ram%C3%ADreza-S%C3%A1nchezb/22bb8124fd04862f21aef0d8e8d618ec8c604717

[63] STONYS, R. ; KUZNETSOV, D. ; KRASŅIKOVS, A. ; ŠKAMAT, J. ; BALTAKYS, K. ; ANTONOVIČ, V. ; ČERNAŠĖJUS, O.: *Reuse of ultrafine mineral wool production waste in the manufacture of refractory concrete*. In: *Journal of environmental management* (2016). URL: https://www.semanticscholar.org/paper/Reuse-of-ultrafine-mineral-wool-production-waste-in-Stonys-Kuznetsov/f682791448d49814c7a19bb234ec1e7ca24015f6

[64] YLINIEMI, J. ; LAITINEN, O. ; KINNUNEN, P. ; ILLIKAINEN, M.: *Pulverization of fibrous mineral wool waste*. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 20 (2018), Nr. 2, S. 1248–1256. URL: https://www.researchgate.net/publication/321740633_Pulverization_of_fibrous_mineral_wool_waste

[65] YLINIEMI, Juho ; KINNUNEN, Paivo ; KARINKANTA, Pasi ; ILLIKAINEN, Mirja: *Utilization of Mineral Wools as Alkali-Activated Material Precursor*. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 9 (2016), Nr. 5, S. 312. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/9/5/312

[66] YLINIEMI, Juho ; LUUKKONEN, Tero ; KAISER, Anne ; ILLIKAINEN, Mirja: *Mineral wool waste-based geopolymers*. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 297 (2019), Nr. 1, S. 12006. URL: https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1755-1315/297/1/012006

[67] BAILLIF, P. ; TOURAY, J. C.: *Chemical behavior of aluminum and phosphorus during dissolution of glass fibers in physiological saline solutions*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 Suppl 5 (1994), Suppl 5, S. 77–81. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7882961/ – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[68] BAUER, J. F. ; LAW, B. D. ; HESTERBERG, T. W.: *Dual pH durability studies of man-made vitreous fiber (MMVF)*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 Suppl 5 (1994), Suppl 5, S. 61–65. URL: https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC1567275/ – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[69] POTTER, R. M.: *Method for determination of in-vitro fiber dissolution rate by direct optical measurement of diameter decrease*. In: *Glass Science and Technology: Glastechnische Berichte* (2000), 73 (2), S. 46–55. URL: https://www.researchgate.net/publication/289679048_Method_for_determination_of_in-vitro_fiber_dissolution_rate_by_direct_optical_measurement_of_diameter_decrease – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[70] POTTER, R. M. ; OLANG, Nassreen: *The effect of a new formaldehyde-free binder on the dissolution rate of glass wool fibre in physiological saline solution*. In: *Particle and Fibre Toxicology* 10 (2013), S. 13. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/23587247/ – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[71] DOSCHEK-HELD, K. ; KRAMMER, A. ; STEINDL, F. R. ; JUHART, J.: *Recycling of mineral wool waste as supplementary cementitious material through thermochemical treatment*. In: *Waste Management & Research* (2023 (Eingereicht))

[72] YLINIEMI, Juho ; RAMASWAMY, Rajeswari ; LUUKKONEN, Tero ; LAITINEN, Ossi ; SOUSA, Álvaro Nunes de ; HUUHTANEN, Mika ; ILLIKAINEN, Mirja: *Characterization of mineral wool waste chemical composition, organic resin content and fiber dimensions: Aspects for valorization*. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 131 (2021), S. 323–330. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X21003573

[73] ALBRECHT, Wolfgang: Recycling von Wärmedämmstoffen. In: FOUAD, Nabil A. (Hrsg.): *Nachhaltigkeit*. 1. Auflage. Berlin : Ernst & Sohn, 2023 (Bauphysik-Kalender, 23. Jahrgang (2023)), S. 223–244

[74] FLUMROC AG: *Rücknahme von Flumroc-Steinwolle und- Einwegpaletten*. URL: https://www.flumroc.ch/fileadmin/Dateiliste/flumroc/Downloads/500_Service/Merkblatt_Rueckknahme_Steinwolle_de_02.18_2.pdf – Überprüfungsdatum: 17.03.2023

[75] SAINT-GOBAIN ISOVER G+H AG: *ISOVER RETURN für WDVS Steinwolle Für Sie. Für uns. Für die Umwelt.* : *So wird aus Baustellenverschnitt* ein Rohstoff für die Zukunft. Schnell, kostengünstig, unkompliziert.* URL: https://www.isover.de/documents/broschure/isover-return-fr-wdvs-steinwolle.pdf. – Aktualisierungsdatum: 2020 – Überprüfungsdatum: 17.03.2023

[76] KNAUF INSULATION: *Resulation* : *Mineral wool made circular*. URL: https://www.resulation.eu/de

[77] KNAUF INSULATION: *RESULATION's recycling success*. URL: https://www.knaufinsulation.com/resulations-recycling-success – Überprüfungsdatum: 17.03.2023

[78] YAP, Zhen Shyong ; KHALID, Nur Hafizah A. ; HARON, Zaiton ; MOHAMED, Azman ; TAHIR, Mahmood Md ; HASYIM, Saloma ; SAGGAFF, Anis: *Waste Mineral Wool and Its Opportunities - A Review*. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (2021), Nr. 19. URL: https://www.mdpi.com/1996-1944/14/19/5777 – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[79] BREDIKHIN, P. A. ; KADYKOVA, Yu.A.: *Waste Stone Wool as an Effective Filler for Polyethylene*. In: *International Polymer Science and Technology* 44 (2017), Nr. 9, S. 41–44. URL: https://www.researchgate.net/publication/322300464_Waste_Stone_Wool_as_an_Effective_Filler_for_Polyethylene – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[80] SORMUNEN, Petri ; KÄRKI, Timo: *Compression Molded Thermoplastic Composites Entirely Made of Recycled Materials*. In: *Sustainability* 11 (2019), Nr. 3, S. 631. URL: https://www.mdpi.com/2071-1050/11/3/631

[81] MAMIŃSKI, M. Ł. ; KRÓL, M. E. ; JASKÓŁOWSKI, W. ; BORYSIUK, P.: *Wood-mineral wool hybrid particleboards*. In: *European Journal of Wood and Wood Products* 69 (2011), Nr. 2, S. 337–339. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00107-010-0470-6

[82] VÄNTSI, Olli ; KÄRKI, Timo: *Utilization of recycled mineral wool as filler in wood–polypropylene composites*. In: *Construction and Building Materials* 55 (2014), S. 220–226. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814000841

[83] SORMUNEN, Petri ; KÄRKI, Timo: *Recycled construction and demolition waste as a possible source of materials for composite manufacturing*. In: *Journal of Building Engineering* 24 (2019), S. 100742. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710218309641

[84] MAUSCHITZ, G.: *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie* : *Berichtsjahr 2022*. URL: https://www.zement.at/service/publikationen/emissionsberichte – Überprüfungsdatum: 04.07.2023

[85] ZEMENT + BETON HANDELS- UND WERBEGES.M.B.H., TU WIEN SCIENCE CENTER: *Zementherstellung in Österreich* : *Grundlagen, Daten, Fakten*. URL: https://www.zement.at/service/publikationen/lehrunterlagen – Überprüfungsdatum: 04.07.2023

[86] WALDL, Günter ; PAPSCH, Felix: *Roadmap zur CO2-Neutralität der österreichischen Zementindustrie bis 2050*. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 167 (2022), Nr. 8, S. 342–348. URL: https://link.springer.com/article/10.1007/s00501-022-01253-z

[87] HOENIG, V., SEILER, C., BODENDIEK, N., HOPPE, H.:: *Einsatz alternativer Rohstoffe im Zementherstellungsprozess - Hintergrundwissen, technische Möglichkeiten und Handlungsempfehlungen*. URL: https://www.zement.at/downloads/downloads_2016/Einsatz_alternativer_Rohstoffe_im_Zementherstellungsprozess.pdf – Überprüfungsdatum: 05.07.2023

[88] NOLTING, Ulrich (Hrsg.); DEHN, Frank (Hrsg.); HAIST, Michael (Hrsg.); LINK, Julian (Hrsg.): *Betone der Zukunft - Herausforderungen und Chancen : 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018* : KIT Scientific Publishing, 2018

[89] SCHNEIDER, Christian: *Zur Konstitution von Hüttensand, seiner quantitativen Bestimmung und seinem Festigkeitsbeitrag im Zement*. Clausthal, Technischen Universität Clausthal, Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften. Dissertation. 2007. URL: https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/import_derivate_00000414/db109176.pdf – Überprüfungsdatum: 21.07.2023

[90] TIGGES, Bastian: *Sichere Immobilisation von Kraftwerksnebenprodukten*. In: *CITplus* 24 (2021), Nr. 7, S. 28–29. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/pdf/10.1002/citp.202100720

[91] BUNDESVERBAND DER GIPSINDUSTRIE E. V.: *GIPS-Datenbuch*. URL: https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/gipsdatenbuch_2013.pdf – Überprüfungsdatum: 12.07.2023

[92] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY: *Energy Technology Perspectives 2020*. URL: https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2020 – Überprüfungsdatum: 02.11.2023

[93] ÖNORM EN 197-1. 2018-12-01. *Zement*

[94] ÖNORM EN 15167-1. 2007-01-01. *Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel*

[95] STEINDL, F. R. ; DOSCHEK-HELD, K. ; WEISSER, K. ; JUHART, J. ; GRENGG, C. ; WOHLMUTH, D. ; MITTERMAYR, F.: *Mineral Residues and By-Products Upcycled into Reactive Binder Components for Cementitious Materials* (SynerCrete 2023). Milos, Greece, 2023

[96] STEINDL, Florian Roman ; WEISSER, Katharina ; DOSCHEK-HELD, Klaus ; KRAMMER, Anna ; STEINER, Sarah ; MITTERMAYR, Florian ; WOHLMUTH, Dominik ; JUHART, J.: *Reactivity of reactive binder components upcycled from mineral residues and by-products*. In: *Journal Cement and Concrete Research* (In Bearbeitung)

[97] URBAIN, Georges: *Viscosity estimation of slags*. In: *Steel Research* 58 (1987), Nr. 3, S. 111–116. URL: https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/srin.198701513

[98] EISNER, Peter: *Stoffliche Verwertung von Eisenhütten- und Stahlwerksschlacken als Bindemittelkomponenten* : *Entwicklung eines Mischungsrechners*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Bachelorarbeit. 2023

[99] FREY, David: *Weiterentwicklung eines Mischungsrechners*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Bachelorarbeit. In Bearbeitung

[100] 2022. *DIN 51730:2022-02: Prüfung fester Brennstoffe - Bestimmung des Asche-Schmelzverhaltens.*

[101] FLADISCHER, Michael: *Beeinflussung des Schmelzintervalls von EAF-Stäuben*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Bachelorarbeit. 2022

[102] SAMPL, Kathrin: *Charakterisierung von künstlichen Mineralfasern als Grundlage für Recyclingmethoden*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Bachelorarbeit. 2019

[103] THERMCONCEPT: *Technical Data Elevator Furnaces: Elevator ELS 16/18*. URL: https://www.thermconcept.com/data/files/1062/en/Technical_Data_Elevator-Furnaces_ELS0811-ELHT1618.pdf – Überprüfungsdatum: 01.08.2023

[104] HAFNER, Thomas Johannes: *Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Nassgranulationsanlage im Technikumsmaßstab*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Masterarbeit. 2019. URL: https://pureadmin.unileoben.ac.at/ws/portalfiles/portal/4666507/AC15576591.pdf – Überprüfungsdatum: 21.07.2023

[105] JUENGER, M. C.G. ; SNELLINGS, Ruben ; BERNAL, Susan A.: *Supplementary cementitious materials: New sources, characterization, and performance insights*. In: *Cement and Concrete Research* 122 (2019), S. 257–273. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884619301693 – Überprüfungsdatum: 03.01.2024

[106] LUOTO, K. ; HOLOPAINEN, M. ; KANGAS, J. ; KALLIOKOSKI, P. ; SAVOLAINEN, K.: *The effect of fiber length on the dissolution by macrophages of rockwool and glasswool fibers*. In: *Environmental Research* 70 (1995), Nr. 1, S. 51–61. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/8603659/

[107] SATTLER, Theresa ; DIETRICH, V. ; SCHIMEK, Julia ; VOLLPRECHT, Daniel: *Eignung ungefährlicher Mineralwolleabfälle als aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff in der Zementindustrie*. Leoben, 2020

[108] THÉLOHAN, S. ; MERINGO, A. de: *In vitro dynamic solubility test: influence of various parameters*. In: *Environmental Health Perspectives* 102 Suppl 5 (1994), Suppl 5, S. 91–96. URL: https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/7882964/

[109] STEINDL, Florian Roman ; DOSCHEK-HELD, Klaus ; JUHART, J. ; PONAK, C. ; LIEDERER, J. ; RUDIC, O.: *Analyse und Vergleich der Produktqualitätsmerk- male von 4 Schlacken aus der Stahlproduktion: Bewertungsschema zur Bindemitteleignung*. 2022

[110] ÖNORM EN 15167-2. 2007-01-01. *Hüttensandmehl zur Verwendung in Beton, Mörtel und Einpressmörtel*

[111] EHRENBERG, Andreas: *Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft* : *Teil 2*. In: *Beton-Informationen* (2006). URL: https://fwbau.verlagbt.de/eintrag/1-5-2006-67.html – Überprüfungsdatum: 24.01.2024

[112] PETERNELJ, Marko ; BIZJAN, Benjamin ; ŠIROK, Branko: *The Influence of Airflow Characteristics and Accumulation Grid Velocity on the Formation of a Stone Wool Primary Layer*. In: *Strojniški vestnik - Journal of Mechanical Engineering* 63 (2017), Nr. 6, S. 405–414

[113] GATSCHLHOFER, Christoph: *Phosphorus behaviour during carbothermal reduction of iron-, chromium-, and manganese-rich slags*. Leoben, Montanuniversität Leoben, Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik. Masterarbeit. 2022

[114] STEINDL, Florian Roman ; DOSCHEK-HELD, Klaus ; WEISSER, Katharina ; JUHART, Joachim ; GRENGG, Cyrill ; WOHLMUTH, Dominik ; MITTERMAYR, Florian: Mineral Residues and By-Products Upcycled into Reactive Binder Components for Cementitious Materials. In: JĘDRZEJEWSKA, Agnieszka; KANAVARIS, Fragkoulis; AZENHA, Miguel; BENBOUDJEMA, Farid; SCHLICKE, Dirk (Hrsg.): *International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures* : *SynerCrete'23 - Volume 2*. 1st ed. 2023. Cham : Springer Nature Switzerland; Imprint Springer, 2023 (RILEM Bookseries, 44), S. 153–164

[115] BLOTEVOGEL, Simon ; EHRENBERG, Andreas ; STEGER, Laurent ; DOUSSANG, Lola ; KAKNICS, Judit ; PATAPY, Cedric ; CYR, Martin: *Ability of the R3 test to evaluate differences in early age reactivity of 16 industrial ground granulated blast furnace slags (GGBS)*. In: *Cement and Concrete Research* 130 (2020), S. 105998

[116] FLEISCHANDERL, A.; FENZL, T.; NEUHOLD, R.: *Dry Slag Granulation – The Future Way to Granulate Blast Furnace Slag*. URL: https://www.primetals.com/fileadmin/user_upload/metals_magazine_uploads/AISTech2018_Dry_Slag_Granulation_-_The_Future_Way_to_Granulate_Blast_Furnace_Slag_clean_Final.pdf – Überprüfungsdatum: 11.12.2023

Anhang

Daten Steinwolle vor 1998

Oxide	CaO max = MgO min = Al_2O_3 max = Fe_2O_3 min = SiO_2 min	MgO max	SiO_2 max	CaO min = Fe_2O_3 max	Al_2O_3 max
	[44]	[45, 47]	[48]	[37]	[43]
CaO	40,10	18,50	16,33	10,04	17,00
SiO_2	39,80	45,90	47,37	46,30	45,90
Al_2O_3	10,60	11,90	13,09	13,50	13,80
Fe_2O_3	0,63	-	8,46	13,22	-
FeO	-	8,20	-	-	6,20
Na_2O	0,13	1,80	2,05	3,05	2,50
K_2O	0,30	0,60	0,69	1,41	1,30
MgO	3,65	11,60	9,29	9,10	9,50
P_2O_5	-	0	0,05	0,35	0
TiO_2	0,55	0,90	1,35	2,57	3,00
SO_3	-	-	-	-	-
MnO	-	0	0,19	0,21	0
Cr_2O_3	-	0	-	0,04	0
ZrO_2	-	-	-	-	-
SrO	-	-	0,02	-	-
BaO	-	-	-	-	-
NiO	-	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-
Bi_2O_3	-	-	-	-	-
Br	-	-	-	-	-
Y_2O_3	-	-	-	-	-
Co_3O_4	-	-	-	-	-
Ga_2O_3	-	-	-	-	-

Nb_2O_5	-	-	-	-	-
B_2O_3	<0,05	0	0	0	-
LOI	-	-	-	-	-

Daten Steinwolle nach 1998

Oxide	**CaO min**	**CaO max = Fe_2O_3 max = SiO_2 min**	**MgO min = Al_2O_3 min = SiO_2 min**	**MgO max**	**Al_2O_3 max**	**Fe_2O_3 min**
	[63]	[55]	[62]	[66]	[54]	[56]
CaO	3,52	46,90	22,60	16,60	15,00	13,94
SiO_2	40,60	16,90	60,10	44,10	44,00	51,54
Al_2O_3	2,14	5,40	0,76	14,30	24,00	1,07
Fe_2O_3	6,91	16,20	1,36	5,50	6,00	0,36
FeO	-	-	-	-	-	-
Na_2O	6,71	-	5,29	1,20	6,20	8,20
K_2O	6,34	-	0,58	0,30	3,80	0,56
MgO	11,10	2,60	1,39	14,70	2,00	2,92
P_2O_5	-	-	-	-	0,80	-
TiO_2	0,23	-	0,20	0,20	0,70	0,04
SO_3	2,41	-	1,36	0	-	0,30
MnO	-	-	-	-	0,20	-
Cr_2O_3	-	-	-	-	0,10	-
ZrO_2	-	-	-	-		-
SrO	-	-	-	-	0,10	-
BaO	-	-	-	-	0,10	-
NiO	-	-	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-	-
Bi_2O_3	-	-	-	-	-	-
Br	-	-	-	-	-	-
Y_2O_3	-	-	-	-	-	-
Co_3O_4	-	-	-	-	-	-
Ga_2O_3	-	-	-	-	-	-
Nb_2O_5	-	-	-	-	-	-
B_2O_3	-	-	-	-	0,00	-
LOI	-	-	-	-	-	-

Daten Glaswolle vor 1998

Oxide	CaO min.= MgO min.= Al_2O_3 max	CaO max = Fe_2O_3 max = SiO_2 max	MgO max = SiO_2 min	Al_2O_3 min	Fe_2O_3 min
	[52]	[44]	[44, 69]	[46]	[67]
CaO	3,00	8,50	7,50	7,41	7,00
SiO_2	57,90	68,30	57,50	64,40	65,01
Al_2O_3	5,80	3,27	5,10	2,91	3,40
Fe_2O_3	0,10	0,59	0,07	-	0
FeO	-	-	-	0,31	0
Na_2O	10,10	13,30	14,95	15,50	15,85
K_2O	2,90	1,25	1,06	1,42	0
MgO	-	0,21	4,13	3,18	2,95
P_2O_5	-	-	-	0	0
TiO_2	-	0,07	0,01	0,06	0
SO_3	-	-	0,12		0
MnO	-	-	-	-	0
Cr_2O_3	-	-	-	-	-
ZrO_2	-	-	-	-	0
SrO	-	-	-	-	-
BaO	-	-	-	-	-
NiO	-	-	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-
Cl	-	-	-	-	-
Bi_2O_3	-	-	-	-	-
Br	-	-	-	-	-
Y_2O_3	-	-	-	-	-
Co_3O_4	-	-	-	-	-
Ga_2O_3	-	-	-	-	-
Nb_2O_5	-	-	-	-	-
B_2O_3	10,7	4,18	8,75	4,90	4,50
LOI	-	-	-	-	-

Daten Glaswolle nach 1998

Oxide	Al_2O_3 min = SiO_2 max	MgO max.= SiO_2 min	CaO min	Fe_2O_3 min	MgO min.	CaO max = Al_2O_3 max	Fe_2O_3 max
	[70]	[7]			[72]		
CaO	7,80	9,76	7,24	8,277	8,37	9,90	8,491
SiO_2	67,90	58,58	63,90	62,575	63,773	59,195	61,504
Al_2O_3	1,30	3,94	1,55	1,888	1,646	4,901	2,464
Fe_2O_3	0,30	1,07	0,59	0,274	0,452	0,502	2,055
FeO	-	-	-	-	-	-	-
Na_2O	13,20	12,35	14,55	17,675	16,932	14,951	15,521
K_2O	0,60	1,25	0,78	0,873	0,543	0,595	0,849
MgO	2,20	4,05	3,13	2,661	1,769	1,963	2,282
P_2O_5	-	0,11	0,13	0,021	0,159	0,362	0,055
TiO_2	-	0,20	0,05	0,107	0,076	0,61	0,082
SO_3	-	0,83	0,21	0,324	0,736	0,437	1,578
MnO	0,80	0,18	0,56	0,019	0,543	0,542	0,186
Cr_2O_3	-	0,07	-	0,025	0,097	0,099	0,039
ZrO_2	-	-	-	0,03	0,021	0,014	0,009
SrO	-	0,04	-	0,018	0,021	0,023	0,02
BaO	-	-	0,07	0	0,028	0,029	0,192
NiO	-	0,05	-	0,021	0,019	0,023	0,015
CuO	-	0,40	-	0,008	0,009	0,016	0,013
ZnO	-	-	0,04	0,007	0,009	0,011	0,125
PbO	-	-	-	0	0,013	0,028	0,021
Cl	-	0,05	0,08	0,086	0,116	0,091	0,093
Bi_2O_3	-	-	-	0,008	0	0	0
Br	-	-	-	0	0	0	0,003
Y_2O_3	-	-	-	0	0	0	0
Co_3O_4	-	-	-	0	0	0	0
Ga_2O_3	-	-	-	0	0	0	0
Nb_2O_5	-	-	-	0	0	0	0
B_2O_3	5,50	2,39	1,18	-	-	-	-
LOI	-	-	-	4,9	7,4	11,5	7,8