



Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik

Masterarbeit



Recycling von Mineralwolle -
Behandlung von Steinwolle zur
potentiellen Verwertung als
Sekundärzumahlstoff in der
Zementindustrie

Christiane Mimra, BSc

November 2021



Masterarbeit

Thema:

**Recycling von Mineralwolle - Behandlung von Steinwolle zur
potentiellen Verwertung als Sekundärzuzugstoff in der
Zementindustrie**

Erstellerin:

Christiane Mimra, BSc.

Betreuer:

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

erstellt am

**Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik
Department Umwelt- und Energieverfahrenstechnik
Montanuniversität Leoben**

Leoben, am 3. November 2021

Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich diese Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel nicht benutzt und mich auch sonst keiner unerlaubten Hilfsmittel bedient habe.

Ich erkläre, dass ich die Richtlinien des Senats der Montanuniversität Leoben zu ‘Gute wissenschaftliche Praxis’ gelesen, verstanden und befolgt habe.

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

Datum 03.11.2021



Unterschrift Verfasser/In

Christiane Mimra

Kurzfassung

Die neue Deponieverordnung von 2021 legt ein österreichweites Deponierungsverbot von künstlichen Mineralfasern ab dem Jahr 2027 fest. In die Kategorie der künstlichen Mineralfasern fällt Mineralwolle, die hauptsächlich als Dämmmaterial Anwendung in der Bauindustrie findet. Mineralwolleabfälle werden in Österreich aktuell aufgrund fehlender Alternativen ausschließlich deponiert. Folglich müssen bis 2027 wirtschaftlich vertretbare Verwendungs-, Verwertungs- oder Recyclingverfahren für Mineralwolleabfälle gefunden werden. Europaweit beschäftigen sich einige Projekte mit solch neuen Verfahren. Das RecyMin-Projekt an der Montanuniversität Leoben ist eines davon. Im Rahmen eines Arbeitspakets gilt es, die Möglichkeit der Verwertung von Mineralwolleabfällen in der Zementindustrie zu untersuchen. Diese können dort als Sekundärzumahlstoff potentiell ähnlich wie Hüttensand verwertet werden. Dazu ist eine Behandlung der Mineralwolleabfälle notwendig.

Zu diesem Zweck wird in dieser Arbeit das Primärmaterial Steinwolle brikettiert, mit Ergänzungsstoffen vermischt, thermisch behandelt und einer Nassgranulation zugeführt. Das Produkt der Versuchsdurchführung ist ein glasig erstarrtes Granulat. Das Produktgranulat muss für den Einsatz als Sekundärzumahlstoff eine bestimmte chemische Oxidzusammensetzung aufweisen und bautechnologische Anforderungen erfüllen. Die Ergebnisse der Analysen zeigen, dass diese Voraussetzungen in erster Näherung für das Produktgranulat erfüllt sind. Granulierte Steinwolle mit modifizierter chemischer Zusammensetzung kann somit potentiell als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie verwertet werden.

Abstract

The new regulation amendment for the landfill of waste from 2021 stipulates an Austria-wide ban on the landfilling of artificial mineral fibers starting in 2027. The category of artificial mineral fibers includes mineral wool, which is mainly used as insulation material in the construction industry. Due to a lack of alternatives mineral wool waste currently is disposed of exclusively in landfills. Consequently, economically viable utilization, recovery, or recycling processes for mineral wool waste must be found by 2027. Across Europe, there are a few projects dedicated to researching such new processes. The RecyMin project at the University of Leoben is one of them. One work package in that project focuses on investigating the possibility of recycling mineral wool waste in the cement industry. Potentially it can be utilized there as secondary grinding material in a similar way to granulated blast furnace slag.

Therefore within the scope of this thesis, a briquetting, mixing with supplementary materials, thermal treatment, and wet granulation of the primary material rock wool is being carried out. The product of the procedure is a glassy solidified granulate. For the granulate to be used as a secondary grinding material it must have a certain chemical oxide composition and it needs to fulfill specific requirements. The results of the analyses show that these are met to a first approximation. Granulated rock wool with a modified chemical composition can thus potentially be used as a secondary grinding material in the cement industry.

Allgemeine Formelzeichen

w	Massenanteil
kg	Kilogramm
m ³	Kubikmeter
W	Watt
K	Kelvin
m	Meter
°C	Grad Celsius
ϕ	Volumenanteil
μ	Mikrometer
€	Euro
min	Minute
<	kleiner als
>	größer als
t	Zeit
g	Gramm
cm	Centimeter
bar	Bar
s	Sekunde
kW	Kilowatt
mm	Millimeter
L	Liter
VA	Volumen Anfang
VE	Volumen Ende
cm ³	Kubikcentimeter
J	Joule

Akronyme

EU	Europäische Union
DV	Deponierungsverordnung
KMF	künstliche Mineralfaser
CO ₂	Karbondioxid
MW	Mineralwolle
ÖNORM	Österreichische Norm
RFA	Röntgenfluoreszenzanalyse
CaO	Calciumcarbonat
SiO ₂	Siliciumdioxid
EN	Europäische Norm
Mio.	Millionen
FMI	Fachvereinigung Mineralwolleindustrie
CLPV	Verordnung für Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen
TRGS	Verzeichnis krebserregender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe
RAL	Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e. V.
EUCEB	European Certification Board for Mineral Wool Products
AbfRRL	Abfallrahmenrichtlinie
RBV	Recycling-Baustoffverordnung
AVV	Abfallverzeichnisverordnung
SN	Schlüsselnummer
Spez.	Spezifizierung
G	gefährlich
GN	gefährlich, nicht ausstufbar
§	Paragraph
HP	Hazardous Properties
ISO	Internationale Organisation für Normung
AG	Aktiengesellschaft
RecyMin	Recycling von Mineralwollen
US	United States
Mrd.	Milliarden

REA	Rauchgasentschwefelungsanlage
CEM	Zement
ID	Identifikation
US-B	UpcycSlag-Binder
TUG	Technische Universität Graz
SW-CEM-B	Steinwolle-Zement-Brikett
TOC	gesamter organischer Kohlenstoff
CaCO ₃	Calciumcarbonat
C	Kohlenstoff
FeO	Eisenoxid
MnO	Manganoxid
TiO ₂	Titandioxid
L	Länge
B	Breite
T	Tiefe
PSA	Persönliche Schutzausrüstung
MR	Mischungsrechner
LOI	Grenzsauerstoffwert
Fe ₂ O ₃	Eisenoxid
Al ₂ O ₃	Aluminiumoxid
MgO	Magnesiumoxid
AHWZ	aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff für die Betonherstellung
W/B	Wasser zu Bindemittel
Temp.	Temperatur

Inhaltsverzeichnis

Eidesstattliche Erklärung	I
Kurzfassung	II
Abstract	III
Allgemeine Formelzeichen	IV
Akronyme	V
1 Einleitung	1
1.1 Aufgabenstellung	2
2 Grundlagen	3
2.1 Künstliche Mineralfasern	3
2.2 Recycling von künstlichen Mineralfasern	17
2.3 Sekundärzumahlstoffe in der Bindemittelindustrie	21
3 Material und Methode	27
3.1 Oxidgehalt	27
3.2 Probenaufbereitung	30
3.3 Mischungsrechner	33
3.4 Thermische Behandlung und Abkühlung	35
3.5 Aufbereitung Produktgranulat	43
3.6 Analyse Produktgranulat	43
4 Ergebnisse und Diskussion	44
4.1 Volumenreduktion	44
4.2 Temperaturerfassung mittels Infrarotkamera	45
4.3 Verhältnis Wasser zu Schlacke	47
4.4 Optische Bewertung Produktgranulat	47
4.5 Oxidgehalt Produktgranulat	48
4.6 Bautechnologische Analysen	52

5 Zusammenfassung und Ausblick	55
Literaturverzeichnis	59
Abbildungsverzeichnis	66
Tabellenverzeichnis	68
A Anhang	70
A.1 Arbeitsanweisung Versuchsdurchführung	70
A.2 Ergebnisdarstellung MR und RFA	79

1. Einleitung

Die Europäische Union beabsichtigt, bis 2050 Klimaneutralität zu erreichen. [1] Ein wichtiger Faktor zum Erreichen dieses Ziels ist das effiziente Nutzen und Recycling von Nebenprodukten und Abfällen. Das Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union sieht aus diesem Grund vor, das Deponieren von bestimmten Abfallströmen im Laufe der kommenden Jahre deutlich zu reduzieren. So soll es ab dem Jahr 2030 für getrennt gesammelte Abfallfraktionen ein EU-weites Deponierungsverbot geben. [2]

Im Sinne der europäischen Zielsetzung wurde in Österreich im April 2021 eine neue nationale Deponieverordnung (DV) verabschiedet. Laut neuer Gesetzgebung tritt ab dem Jahr 2027 ein Deponierungsverbot von künstlichen Mineralfasern (KMF) in Kraft. Als Dämmstoff finden diese hauptsächlich Anwendung in der Bauindustrie, ihre wichtigsten Vertreter sind Steinwolle und Glaswolle. [4, 3]

Um dieses Deponierungsverbot umsetzen zu können, muss eine Verwendung, eine Verwertung oder eine Recyclingmöglichkeit für die Abfallfraktion der KMF gefunden werden. Ein Lösungsansatz besteht darin, KMF-Abfälle wieder der Primärerzeugung von Mineralwolle zuzuführen. Teilweise passiert dies bereits im Fall von betriebsinternen Mineralwolleabfällen oder Baustellenverschnitt. Die rückgeführten Mengen sind im Vergleich zum gesamten Abfallaufkommen sehr gering. Laut Stand der Technik eignet sich Mineralwolle als Füllstoff für die Herstellung zementhaltiger Verbundstoffe oder Mineralwolle-Geopolymeren. Eine Vielzahl an Projekten im Bereich des Mineralwollerecyclings befinden sich zur Zeit in Entwicklung. [5, 8, 7, 6]

Im Rahmen des RecyMin Projekts der Montanuniversität Leoben in Kooperation mit Industriepartnern werden im Hinblick auf das geplante Deponierungsverbot von Mineralfasern potentielle stoffliche Verwertungsverfahren erforscht. [4] Ein Arbeitspaket legt den Fokus auf die stoffliche Verwertung von KMF-Abfällen in der Bindemittelindustrie. [5] Dort wirkt sich das Recycling von Abfällen und Nebenprodukten positiv auf die CO₂-Bilanz aus. KMFs können in der Zementindustrie auf zwei Arten zum Einsatz kommen: als Sekundärrohstoff für die Klinkererzeugung oder als Sekundärzumahlstoff bei der Zementherstellung. Diese Arbeit beschäftigt sich mit der Vorbereitung von Mineralwolle für den potentiellen Einsatz als Sekundärzumahlstoff.

Angelehnt an die Zusammensetzung und Verwertungswege des Sekundärzumahlstoffs Hüttensand, einem Nebenprodukt der Eisen- und Stahlindustrie, soll die Eignung von KMFs für diesen Zweck erforscht werden. Hüttensand bildet einen wichtigen Bestandteil der österreichischen Zementherstellung. Aufgrund der Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlindustrie ist eine Verringerung des Aufkommens an Hüttensand absehbar. Potentielle Alternativen wie KMFs können diese Mengen in Zukunft kompensieren. Die geforderten Qualitätsgrenzen für Mineralwolleabfälle als Sekundärzumahlstoffe gibt die Bindemittelindustrie vor. [9]

1.1. Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist das Herstellen eines Granulats aus Mineralwolleabfall, das als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie einsetzbar ist. Hüttensand kommt zu diesem Zweck seit über hundert Jahren in der Zementherstellung zum Einsatz. [10] KMFs und Hüttensand weisen ähnliche chemische Zusammensetzungen auf und sind somit potentiell ähnlich verwertbar. Ausschlaggebend für den erfolgreichen Einsatz in der Bindemittelindustrie sind die beiden Eigenschaften chemische Zusammensetzung und hydraulisches Verhalten. Um dies zu erreichen soll im Rahmen dieser Forschungsarbeit das Primärmaterial Steinwolle zu Granulat verarbeitet werden. [11]

Für die Durchführung der Produktanalysen wird eine Mindestmenge an Granulat benötigt. Deshalb gilt es vorab, die geringe Dichte und die Kompressibilität des Ausgangsmaterials zu beherrschen. Zusätzlich soll durch die Verdichtung ein effizientes und kontrolliertes Einbringen in einen Schmelzofen möglich sein. Hierfür gibt es thermisch sowie physikalisch verfahrenstechnische Prozessansätze. [12]

Die Zugabe von Ergänzungsstoffen zur vorverdichteten Steinwolle erfolgt bei der Probenvorbereitung. So soll eine dem Hüttensand ähnliche Zusammensetzung des Produktgranulats erreicht werden. Zum Herstellen des Produktgranulats wird das Einschmelzen im Elevatorofen mit nachfolgender Nassgranulation gewählt. Im Wasserbad kühlt das Produktgranulat ab, zum Entfernen der Feuchte folgt die Trocknung des Materials. Als Vorbereitung für die Analyse wird das Material konditioniert. Danach erfolgt die Bestimmung des chemischen Oxidgehalts sowie eine Analyse der bautechnologischen Eigenschaften. Zentrale Aufgaben dieser Arbeit sind somit die Parameterfindung für eine erfolgreiche Nassgranulation und die Einstellung der chemischen Zusammensetzung des Granulats durch den Einsatz von Ergänzungsstoffen.

2. Grundlagen

In diesem Kapitel finden sich wichtige Informationen und Kenngrößen über künstliche Mineralfasern, welche im Rahmen einer Literaturrecherche gesammelt wurden. Es wird kurz auf deren Herstellung, Produktionsmengen und Eigenschaften eingegangen. Danach folgt eine detaillierte Beschreibung der rechtlichen Rahmenbedingungen in Bezug auf Mineralwolleabfälle in Österreich für die Jahre 2016-2027. Weiters werden bereits angewandte Recyclingverfahren sowie solche, die zur Zeit entwickelt werden, beschrieben. Aufgrund der potentiellen Verwertung in der Zementindustrie wird auf diese auch in Bezug auf Sekundärzumahlstoffe eingegangen. Die wichtigsten Vertreter und Eigenschaften von Sekundärzumahlstoffen werden kurz beschrieben.

2.1. Künstliche Mineralfasern

Anhand der Mineralwolle zugrundeliegenden Rohstoffe können unterschiedliche Arten von Mineralwolle definiert werden. Mit einem Marktanteil von 50% an der Materialgruppe Dämmstoffe in Deutschland kommt ihr eine große Bedeutung zu. Die gängigsten Mineralwollearten sind Steinwolle, Glaswolle und Schlackenwolle. In dieser Arbeit werden die Stein- und Glaswollen näher behandelt. Aufgrund ihrer hervorragenden Eigenschaften für Wärme-, Schall- und Brandschutz finden sie Anwendung in sämtlichen Baukonstruktionen. [3]

Stoffgruppe Fasern

Steinwolle und Glaswolle gehören zur Gruppe der künstlichen Mineralfasern. Diese kann in die Untergruppen anorganische KMF und organische Synthesefasern eingeteilt werden. Glaswolle und Steinwolle sind der Untergruppe der glasartigen Fasern in der Gruppe der KMFs zugeordnet. Durch einen Spinnprozess erlangen sie eine wollähnliche Struktur, welche neben der verwendeten Rohstoffe namensgebend für das Material ist. In Abbildung 2.1 ist eine Gesamtübersicht der zu unterscheidenden Faserarten nach Dobbertin dargestellt. [13]

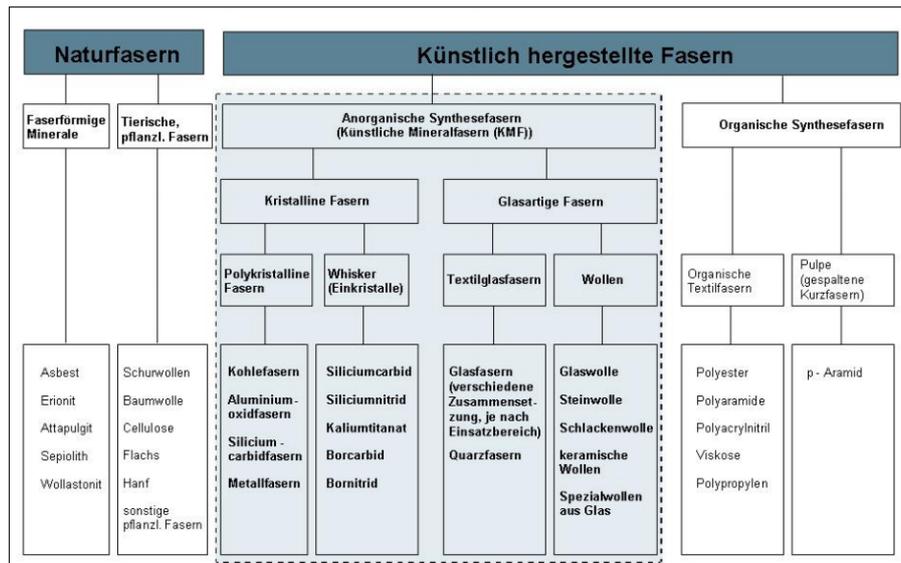


Abbildung 2.1.: Gesamtübersicht und Einteilung der unterschiedlichen Faserarten [13]

Zusammensetzung

Mineralwollen kommen hauptsächlich als Dämmstoff zum Einsatz. Ihre Zusammensetzung und Eigenschaften sind in der 'ÖNORM EN 13162 - Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) - Spezifikation' normativ geregelt. Diese Europäische Norm legt die Anforderungen an Produkte aus Mineralwolle, die als Isoliermaterial in Gebäuden eingesetzt werden, fest. Sie enthält anzuwendende Prüfverfahren und legt die benötigte Kennzeichnung und Etikettierung des Materials fest. Abbildung 2.2 zeigt exemplarisch die Optik von Glaswolle und Steinwolle. [14]



(a)



(b)

Abbildung 2.2.: Darstellung zweier Arten von Mineralwolle. (a) Glaswolle - gelb (b) Steinwolle - grau, gelb [15]

Steinwolle

Steinwolle besteht aus verschiedenen Gesteinsarten wie Kalkstein, Diabas und Dolomit. Ergänzend zu den mineralischen Rohstoffen kommen Zusatzstoffe zur Bindung, Hydrophobierung und Staubminderung zum Einsatz. [15] Diese machen den organischen Anteil in den KMFs aus. Sie sind Bindemittel wie Harz aus Phenol, Formaldehyd oder Harnstoff oder Schmelzmittel wie Klebstoffe oder Mineralöle. [16] Die mittlere Zusammensetzung anhand Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) von sowohl Steinwolleprodukten als auch Steinwolleabfällen sind in Tabelle 2.1 ersichtlich. Die Mittelwerte setzen sich aus repräsentativen Stichproben von österreichischen Deponien und Mineralwolleprodukten zusammen.

Tabelle 2.1.: Mittlerer Oxidgehalt von 7 Steinwolleprodukten, 11 Steinwolleabfällen, 6 Glaswolleprodukten und 15 Glaswolleabfällen mittels RFA, durchgeführt von der Firma CRB

Parameter	Steinwolle		Glaswolle	
	Produkt	Abfall	Produkt	Abfall
[-]	[w-%]	[w-%]	[w-%]	[w-%]
Cl	0.03	0.07	0.05	0.05
Na ₂ O	2.53	-	14.78	12.35
MgO	9.94	9.29	3.35	4.05
Al ₂ O ₃	10.92	13.06	1.41	3.94
SiO ₂	44.29	39.18	63.38	58.58
P ₂ O ₅	0.16	-	0.13	0.11
SO ₃	0.20	0.32	0.65	0.83
K ₂ O	0.55	1.29	0.55	1.25
CaO	17.67	19.64	7.00	9.76
TiO ₂	1.13	1.54	0.07	0.20
Cr ₂ O ₃	0.12	0.15	0.03	0.07
MnO	0.33	0.53	0.56	0.18
Fe ₂ O ₃	8.44	7.69	0.31	1.07
B ₂ O ₃	0.03	-	1.1	2.39
F	-	0.17	-	0.46
ZnO	-	0.03	0.04	-
BaO	0.04	0.06	0.05	-
SrO	0.05	0.08	-	0.04
NiO	0.03	0.04	-	0.05
CuO	-	0.03	-	0.40
Ce ₂ O ₃	0.04	-	-	-
ZrO ₂	0.03	0.03	-	-
La ₂ O ₃	0.38	-	-	-
P ₂ O ₆	-	0.37	-	-

Glaswolle

Für die Herstellung von Glaswolle werden die Ausgangsstoffe Sand oder Recyclingglas, Sodaasche und Kalkstein eingesetzt. Materialien aus Glaswolle bestehen folglich aus den gleichen Rohstoffen wie herkömmliche Glasprodukte.[15] In Tabelle 2.1 finden sich die mittleren Zusammensetzungen von Glaswolleprodukten und Glaswolleabfällen. Die Mittelwerte setzen sich aus repräsentativen Stichproben von österreichischen Deponien und Mineralwolleprodukten zusammen.

Gegenüberstellung Steinwolle und Glaswolle

Steinwolle hat einen deutlich höheren Anteil an Calciumoxid (CaO) als Glaswolle. Für die Zementindustrie ist ein hoher CaO-Gehalt nötig, um die gewünschten bautechnologischen Eigenschaften zu erreichen. Soll Steinwolle in die Zementproduktion eingebracht werden, muss trotzdem eine Zudosierung eines Calciumträgers erfolgen. Infrage kommen die Primärrohstoffe Kalk oder Löschkalk, als Sekundärrohstoffe Papierasche oder Eierschalpulver. Glaswolle weist im Vergleich zur Steinwolle einen höheren Gehalt an Siliciumdioxid (SiO₂) auf, der CaO-Gehalt ist jedoch niedriger. Somit muss für die potentielle Verwendung von Glaswolle in der Zementindustrie ein größerer Anteil an Calciumträger beigemischt werden. [17]

Eigenschaften

Mineralwolle besitzt je nach Verwendungszweck eine Rohdichte von 20-200 kg/m³. Diese beeinflusst maßgeblich die wärmeschutztechnischen Eigenschaften als Dämmstoff. Eine geringe Dichte bedeutet ein hohes Hohlraumvolumen und führt dadurch zu einer Verringerung der Wärmeleitfähigkeit. Diese beträgt laut ÖNORM EN 13162 für Mineralwolle 0.035-0.045 W/mK. Gemäß DIN 4108 'Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden' werden Materialien ab einer Wärmeleitfähigkeit < 0,1 W/mK als Dämmstoff bezeichnet. [18, 14]

Als Folge hoher thermischer Beanspruchung ist bei Mineralwolle eine Änderung der Faserstruktur zu beobachten. Diese äußert sich in einem deutlichen Nachschwindverhalten. Darunter versteht man den Prozess der Rekristallisation, bei welchem Mullit an der Oberfläche entsteht. Mit fortschreitender Kristallinität kommt es zu einer Verdichtung des Fasermaterials und einer Abnahme der elastischen Eigenschaften. Die Rekristallisation setzt ab einer Temperatur von ca. 900 °C ein und limitiert die Einsatztemperatur und Lebensdauer der KMF. Mit zunehmender Verdichtung sinkt die Isolierfähigkeit des Materials erheblich. [19]

Herstellung

Steinwolle und Glaswolle werden großindustriell produziert. Je nach Hersteller kommen unterschiedliche Aggregate zum Schmelzen und Spinnen des Materials zum Einsatz. Der zugrundeliegende Prozess für die Herstellung von Steinwolle ist wie folgt ausgeführt: Die Rohstoffe sind in Silos gelagert und werden je nach gewünschter Zusammensetzung der Mineralwolle vermischt und einem Schmelzaggregat zugeführt. In diesem erfolgt zuerst das Schmelzen der Rohstoffe bei ca. 1400 - 1500 °C. Anschließend fließt die flüssige Schmelze in eine Zerfaserungsmaschine, welche abhängig vom jeweiligen Hersteller unterschiedlich ausgeführt ist. Das Schleuderverfahren zum Beispiel basiert auf der Wirkung der Zentrifugalkraft. Dabei trifft die Schmelze auf eine rotierende Trommel oder Scheibe und wird als Faser von den Rändern abgeschleudert. [15]

Laut der österreichischen Fachvereinigung Mineralwolleindustrie (FMI) [20] erfolgt die Zerfaserung von Steinwolle hauptsächlich über das Walzspinnverfahren, von Glaswolle über Spinnscheiben. Durch die Zentrifugalkräfte in Kombination mit Luft- oder Dampfströmen kommt es zu einer Zerfaserung der viskosen Schmelze. Die schnelle Abkühlung beim Schleudern oder Zerblasen führt zur Ausbildung von Fasern mit Durchmessern von 0.5 - 7.0 μm . [19] Das im verdampfenden Wasser gelöste Bindemittel haftet dabei an den erstarrten Fasern. Auf einem Transportband erfolgt das Schichten der Fasern. Auf diesem werden die gesponnenen Fasern durch einen Härteofen bei 200 - 250 °C bewegt, es kommt zu einer Aushärtung des aufgetragenen Bindemittels.

In diesem Schritt erhält das Produkt die geforderte Stabilität. Aus diesen geschichteten Platten kann in Folge jedes beliebige Maß geschnitten werden. Ausschlaggebend für die jeweiligen Eigenschaften der Mineralwolle sind die Verdichtung, die Orientierung der Fasern sowie der Bindemittelgehalt. [15]

Es müssen bei der Herstellung von Mineralwolle hohe Umweltstandards erfüllt sein. Entstandene Abgase werden thermisch nachverbrannt, Filter- und Waschanlagen reinigen die Abluft. Es kommt zu einer Rückführung der Filterstäube in den Herstellungsprozess. In Abbildung 2.3 ist das Fließschema eines Herstellungsprozesses von Steinwolle dargestellt. [21]

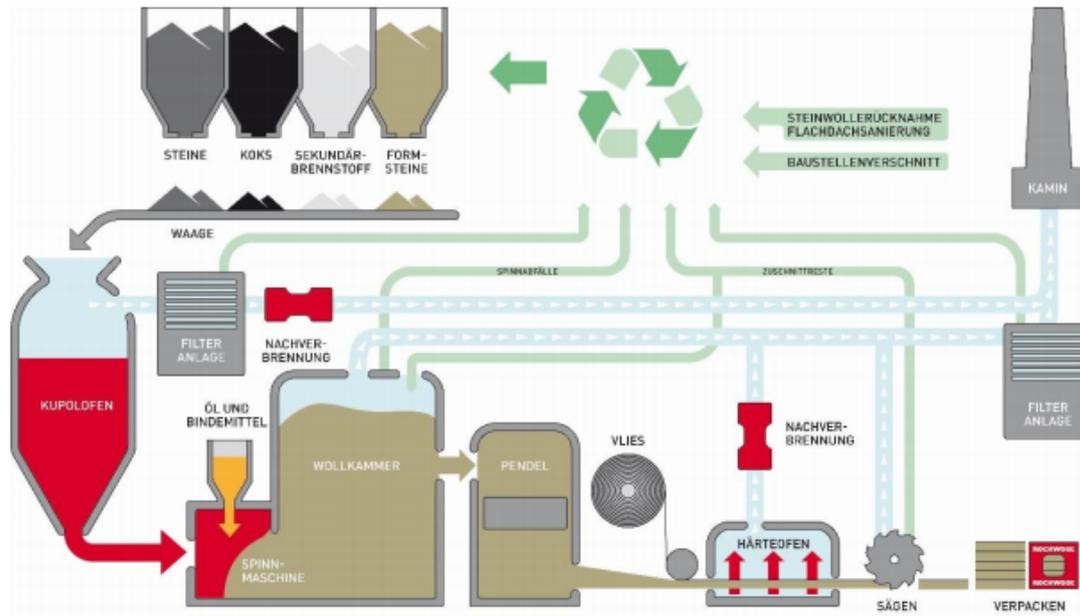


Abbildung 2.3.: Schematische Darstellung des Prozesses der Herstellung von Steinwolle mit einem Kupolofen als Schmelzaggregat [21]

Produktionsmengen

Laut Kreutzer et al. [22] belief sich in Österreich das gesamte Marktvolumen an Dämmstoffen im Jahr 2011 auf 6.1 Mio. m³. Davon entfielen ungefähr 45% auf die Gruppe der Mineralwollen. Eine genaue Aussage über das Aufkommen in Tonnen ist aufgrund der variierenden Dichten an Mineralwolleprodukten schwierig. Tabelle 2.2 zeigt die Verteilung der Marktanteile in Volumenprozent (ϕ -%) in Österreich für die Jahre 2008 - 2013.

Tabelle 2.2.: Absatz der Dämmstoffe in Österreich für die Jahre 2008 - 2013 [22]

Dämmstoffart [-]	Absatzanteile [ϕ -%]					
	2008	2009	2010	2011	2012	2013
Mineralwolle	46.30	45.6	46.6	46.3	45.7	45.3
Schaumstoffe	44.4	45.5	44.7	44.9	45.7	46.1
Sonstige Dämmstoffe	9.3	8.9	8.7	8.8	8.7	8.6

Abfallaufkommen

Mineralwolleabfälle stellen 0.2% des Abfallaufkommens der Bau- und Abbruchrestmassen in der EU dar. [12] Die Bau- und Abbruchindustrie zählt weltweit zu den größten Abfallquellen. In diese Abfallkategorie fallen Materialien, die bei Konstruktion und Abriss von Gebäuden als auch Instandhaltung und Aufbau von Infrastruktur anfallen.

Ziegelsteine, Asphalt, Holz, Glas, Metalle und Isoliermaterialien machen den Großteil dieser Menge aus. Für viele dieser anfallenden Abfallarten gibt es, ähnlich wie für Mineralwolleabfälle, nicht ausreichend Recyclingmöglichkeiten. [23]

Für Österreich ergibt sich laut Vollprecht et al. [12] bei einem Jahresaufkommen von 10 Mio. Tonnen Baurestmassen ein jährliches Aufkommen von Mineralwolleabfällen von 20000 Tonnen. Von diesen entfallen 70 % auf Steinwolle und etwa 30 % auf Glaswolle.

Es ist davon auszugehen, dass die Menge an Mineralwolleabfällen in den kommenden Jahren stark ansteigen wird. Zum einen sinkt die Lebensdauer von Gebäuden; im Durchschnitt beträgt diese für Betongebäude beispielsweise nur 40 Jahre. [24] Zum anderen kommen die zwischen 1970 und 1990 errichteten Gebäude in die Jahre und es steht ein großer Umbau- beziehungsweise Renovierungszyklus bevor. Beide Fälle tragen zu einem Anstieg der anfallenden Menge an Mineralwolleabfällen bei. [23]

Wird ein Gebäude nun renoviert oder rückgebaut, fällt das Isoliermaterial als Abfall an und muss entsorgt werden. In der Praxis werden Mineralwolleabfälle direkt am Aufkommensort gesammelt. Verunreinigungen mit Gips oder Farbresten können nicht ausgeschlossen werden und erschweren eine Rückführung in die Primärproduktion. Für Steinwolle- und Glaswolleabfälle existiert in Österreich bis dato auch kein wirtschaftlich vertretbares, holistisches Verwertungsverfahren. [3, 12] Aufgrund fehlender Alternativen werden Mineralwolleabfälle je nach Herstellungszeitraum und Alter in geeignete Deponien verbracht. Dabei wirken sich Eigenschaften wie geringe Dichte und geringe Steifigkeit negativ auf die Stabilität des Deponiekörpers aus. Die Anzahl und Verfügbarkeit an Deponien ist allgemein in Österreich und den umliegenden Ländern stark begrenzt. Wird Mineralwolle in Deponien verbracht, bleibt weniger Platz für andere zu deponierende Stoffe. [12] Das Finden eines geeigneten Recyclingverfahrens für Stein- und Glaswolle ist somit nicht nur in Hinblick auf das Deponierungsverbot ab 2027 und möglichst effiziente Ressourcennutzung notwendig. Auch kann damit wertvolles Deponievolumen gespart werden.

Einsatzgebiete

Steinwolle und Glaswolle finden Anwendung in unterschiedlichen Bereichen des Gebäudebaus. Sie eignen sich gut für den Einsatz in Gefachen, als Trittschalldämmung im Boden, zur Isolierung von Dächern und Wänden, sowie zum Schutz vor Lärm. Grundsätzlich werden sie zum Kälte- und Brandschutz, zur Schall- und Wärmedämmung eingesetzt. Mineralwolle ist heute im europäischen Raum der Dämmstoff, welcher am meisten zur Verwendung kommt. In Deutschland beträgt der Marktanteil von Mineralwolle an der Gesamtheit an Dämmstoffen über 50 %. Das Material findet seit knapp 100 Jahren Anwendung, hauptsächlich als Dämm- und Isolierstoff. [15]

Rechtliche Rahmenbedingungen

Wie jeder Industriesektor unterliegt auch jener der Mineralwollen regulatorischen Vorgaben, welche großen Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit des Sektors haben. Folgend wird ein Überblick dieser für das Primärprodukt sowie für Mineralwolle als Abfall gegeben.

Produkt

Künstliche Mineralfasern können in alte und neue Mineralfasern eingeteilt werden. Diese Zuteilung bezieht sich auf die Biolöslichkeit der Fasern. Alte Mineralwollen sind laut der Verordnung für Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen (CLPV) biopersistent. Durch ihre kritische Fasergeometrie sind sie alveolengängig und können vom Körper nicht abgebaut werden. Nach der TRGS 905 'Verzeichnis krebserzeugender, erbgutverändernder oder fortpflanzungsgefährdender Stoffe' sind die freigesetzten Faserstäube von alter Mineralwolle als karzinogen einzustufen. Laut CLPV wird ein Stoff oder ein Gemisch, der/das potentiell Krebs erzeugt oder die Krebshäufigkeit erhöht, als karzinogen bezeichnet. Neue Mineralwolleprodukte sind nicht karzinogen. [25] Sie unterliegen strengen Regelungen. Seit 1998 müssen sie spezifische Gütesiegel zur Freizeichnung tragen. Diese garantieren in der Produktion den Einsatz von biolöslichen Fasern. Erzeugnisse aus Mineralwolle, welche nachweislich die Anforderungen des jeweiligen Anwendungsgebietes erfüllen, können 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) ausgezeichnet werden. Die beiden Gütezeichen sind in Abbildung 2.4 dargestellt.

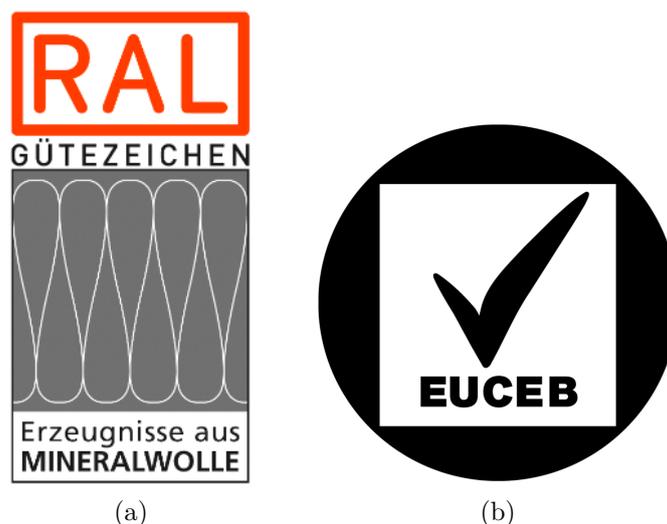


Abbildung 2.4.: (a) RAL-Gütezeichen 388 für Erzeugnisse aus Mineralwolle [26] (b) EUCEB-Gütezeichen für Mineralwolleprodukte [27]

Die Freizeichnung unterliegt einer genauen Zusammensetzung der Mineralwolle, welche eingehalten werden muss. Dieser Umstand erschwert die Rückführung von Mineralwolleabfällen in die primäre Mineralwolleindustrie. Durch direktes Recycling von Mineralwolleabfällen werden Verschmutzungen in den Prozess eingebracht, welche die Zusammensetzung des Produkts verändern und somit durch Abweichung von der erlaubten Zusammensetzung keine Freizeichnung erlauben. Bis dato wird nur sortenreines Primärmaterial, welches in Form von Verschnitt in der Produktion oder an Baustellen anfällt, direkt im Primärprozess recycelt.

Abfall

Die österreichische Mineralwolleindustrie ist in den letzten sechs Jahren stark von rechtlichen Rahmenänderungen betroffen. Die jüngste darunter ist die Änderung der österreichischen Deponieverordnung, welche ein Deponieverbot von künstlichen Mineralfasern ab dem Jahr 2027 vorsieht. Unter dem Aspekt, dass in Österreich beinahe 100 % der Mineralfaserabfälle in Deponien verbracht werden, stellt diese neue Regelung eine enorme Herausforderung dar. Während seit Jahren an potentiellen Recyclingverfahren geforscht wird, ist durch Inkrafttreten der neuen Deponieverordnung ein rechtliches Ultimatum für die Lösungsfindung gestellt worden.

Um die Auswirkung der Entsorgungsthematik von Stein- und Glaswolle auf den gesamten Industriesektor beleuchten zu können, werden folgend die relevanten Rechtsgrundlagen sowie eine chronologische Darstellung der wichtigsten Änderungen vorgestellt.

Verordnungen und Richtlinien

Im österreichischen Abfallrecht gibt es neben nationalem Recht eine Vielzahl an Vorgaben der EU, die teils unmittelbar in Form von Verordnungen oder mit Handlungsspielraum in Form von Richtlinien national umzusetzen sind. Diese Regelungen schaffen die rechtlichen Rahmenbedingungen, unter denen die involvierten Parteien zu handeln haben. Sie stellen eine funktionierende und möglichst effiziente österreichische Abfallwirtschaft sicher. Folgend werden die für die Mineralwolleindustrie wichtigsten Verordnungen und Richtlinien thematisiert.

Abfallrahmenrichtlinie (AbfRRL)

Die Richtlinie über Abfälle bildet den rechtlichen, abfallwirtschaftlichen Rahmen der Europäischen Union. In ihr sind relevante Begrifflichkeiten und Definitionen niedergeschrieben. Sie definiert eine fünfstellige Abfallhierarchie, welche Prioritäten beim Umgang mit Abfällen vorgibt. An erster Stelle steht die Vermeidung von Abfällen, am ungünstigsten ist die Beseitigung von Abfällen auf Deponien. Die Richtlinie legt fest, dass bis zum Jahr 2020 in den EU-Staaten eine Recyclingquote von mindestens 70 w-% von nicht gefährlichen Bau- und Abbruchabfällen erreicht werden musste. [28]

Recycling-Baustoffverordnung (RBV)

Die Verordnung hat durch ihr Inkrafttreten die Baurestmassentrennverordnung abgelöst. Ziel ist das Sicherstellen einer möglichst hohen Qualität der bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen. Mithilfe dieser Verordnung soll eine bessere Recyclingfähigkeit forciert werden, sie legt Fokus auf einen verwertungsorientierten Rückbau von Bauwerken. Eine direkte Auswirkung der Verordnung ist das zwingend getrennte Sammeln aller anfallenden Reststoffe ab dem Anfallen von 750 Tonnen an Bau- und Abbruchabfällen. [29]

Deponieverordnung (DV)

Die österreichische Deponieverordnung basiert auf der europäischen Deponierichtlinie, welche Kriterien und Verfahren zur Verbringung und Annahme von Reststoffen auf Deponien festlegt. Abfälle müssen laut RBV am Entstehungsort sortenrein getrennt werden, für jede Deponieklasse sind spezifische Vorgaben zu berücksichtigen. Die Deponieklassen werden wie folgt unterteilt: [4]

- Bodenaushubdeponien
- Inertabfalldéponien
- Deponien für nicht gefährliche Abfälle
- Deponien für gefährliche Abfälle

Abfallverzeichnisverordnung (AVV)

Die Abfalleigenschaften eines Materials sind im österreichischen Abfallverzeichnis charakterisiert. Jeder Art von gefährlichem (G), gefährlichem und nicht ausstufbaren (GN) oder nicht gefährlichem Abfall ist eine Schlüsselnummer (SN) mit Spezifizierung (Spez.) zugeordnet. Angelehnt ist diese Zuordnung an die harmonisierten gefahrenrelevanten Eigenschaften für Abfälle der Europäischen Union. In dem Verzeichnis finden sich die Vorgaben zur Ausstufung gefährlicher Abfälle sowie die Regelungen zur Bewertung deren gefahrenrelevanter Eigenschaften. [30]

Rechtliche Änderungen

Die schrittweisen Änderungen der österreichischen rechtlichen Rahmenbedingungen für künstliche Mineralfaserabfälle sind in Abbildung 2.5 dargestellt. Folgend wird im Detail auf diese eingegangen.

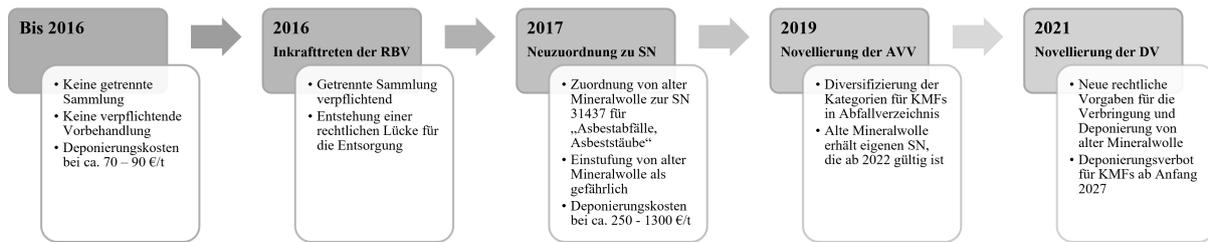


Abbildung 2.5.: Zeitliche Abfolge der rechtlichen Änderungen in Bezug auf künstliche Mineralfasern von 2016 - 2021 [4, 20, 30, 22, 31, 32, 33, 2]

Bis 2016 sah der abfallrechtliche Rahmen in Österreich keine gesetzlich geregelte Trennung von Mineralfasern als Abfall vor. Es konnten Dämmstoffe gemeinsam mit anderen Baumaterialien deponiert werden. Sie wurden nicht als gefährlich eingestuft, sondern, vermischt mit anderen Baurestmassen, in Deponien eingebracht. Mineralische Dämmstoffe wie Stein- oder Glaswolle unterlagen laut geltender Deponieverordnung keiner verpflichtenden Vorbehandlung. Mineralische Baurestmassen durften dabei bis zu 10 ϕ -% an Verunreinigung mit anderen Baumaterialien aufweisen. [22]

Die Unterscheidung zwischen alter und neuer Mineralwolle hatte keinen Einfluss auf die Entsorgung von künstlichen Mineralfaserabfällen. Als Resultat lagen die Entsorgungskosten für eine Tonne Mineralwolleabfall bei 70 - 90 €. Durch die unspezifischen Entsorgungsvorgaben stellte Mineralwolle kein abfallwirtschaftliches Problem für die Bauindustrie dar. Die Suche nach möglichen Recyclingverfahren war zu diesem Zeitpunkt rein zum Zweck der Ressourcenschonung, eine Notwendigkeit aufgrund der rechtlichen Rahmenbedingungen war nicht gegeben. [20]

Eine Ausnahme stellte bereits Asbest, welcher laut Schlüsselnummer als gefährlicher Abfall klassifiziert war, dar und musste bereits getrennt gesammelt und in eigenen Kompartimenten für Asbest auf Deponien für gefährliche Abfälle eingelagert werden.

Im Rahmen einer weitreichenden Änderung der Abfallrahmenrichtlinie erfolgte 2016 eine Umstrukturierung der rechtlichen Vorgaben im Umgang mit Baurestmassen. Die RBV, kundgemacht im Juni 2015, besagt laut § 6.(2):

"[...] In jedem Fall sind Bodenaushubmaterial, mineralische Abfälle, Ausbauasphalt, Holzabfälle, Metallabfälle, Kunststoffabfälle und Siedlungsabfälle vor Ort voneinander zu trennen. [...] [32]"

Weiters wird spezifisch in § 7.(1) auf KMFs eingegangen:

"[...]Insbesondere sind Verunreinigungen mit folgenden Stoffen oder Abfällen weitestgehend zu vermeiden: 1. Asbest, 2. künstliche Mineralfasern, [...] [32]"

Die Verabschiedung der RBV hatte als Folge, dass Mineralwolleabfälle als eigenständige Abfallfraktion auf Baustellen anfallen. Die Entsorgung dieser Fraktion wurde bei der Gesetzesänderung nicht thematisiert, folglich entstand eine rechtliche Lücke für die Entsorgung von Mineralwolleabfällen. Nachdem von Seiten der Industrie auf das Problem aufmerksam gemacht wurde, legte das österreichische Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus 2017 fest, für diese Abfallfraktion die Schlüsselnummer SN 31437 G zu verwenden. Tabelle 2.3 zeigt die Schlüsselnummern der Mineralfaserabfälle aus dem Abfallverzeichnis von 2016. [20]

Tabelle 2.3.: Schlüsselnummern laut österreichischer Abfallverzeichnisverordnung vom Jahr 2016 [33]

Abfallbezeichnung	SN	SN-Spez.	G/NG
[-]	[-]	[-]	[-]
Mineralfasern	31416	-	-
Asbestabfälle, Asbeststäube	31437	43	G

Hinsichtlich der Zuordnung zu einer Schlüsselnummer ist für künstliche Mineralfasern zwischen nicht gefährlichen und gefährlichen Abfällen zu unterscheiden. KMFs gelten als nicht gefährliche, neue Mineralwolleabfälle und sind der Schlüsselnummer SN 31416 zuzuordnen, wenn mindestens eines der folgenden Kriterien zutrifft [21, 31]:

- ab dem Jahr 1998 von einem Mitglied der österreichischen FMI produzierte KMF-Produkte
- KMF-Produkte mit dem RAL- oder EUCEB-Gütezeichen
- chemisch-analytischer Nachweis des nicht Zutreffens der gefahrenrelevanten Eigenschaft HP7 karzinogen

Kann dieser Nachweis nicht erbracht werden, sind Mineralwolleabfälle als gefährliche Abfälle unter der Schlüsselnummer SN 31437 einzuordnen. Die Zuordnung von alten KMFs zu dieser Schlüsselnummer veränderte den Umgang mit KMFs als Abfallfraktion grundlegend, denn künstliche Mineralfasern, welche als Abfall an Baustellen anfallen, können häufig nicht klar identifiziert werden. Information über Hersteller, Produktionsjahr oder chemische Zusammensetzung sind vor allem bei älteren Gebäuden meist nicht vorhanden, vergangene Sanierungsmaßnahmen nicht genau dokumentiert. Dieser Umstand führt dazu, dass oft nicht zwischen alter und neuer Mineralwolle unterschieden werden kann. Alte Mineralwolle muss im Gegensatz zu neuer Mineralwolle auf Deponien für gefährliche Abfälle entsorgt werden. Um eventuelle Fehlzuordnungen zu vermeiden, wird im Zweifelsfall davon ausgegangen, dass alte Mineralwolle vorliegt. Somit wird sichergestellt, dass keine gefährliche Mineralwolle auf Deponien für ungefährliche Abfälle landet.

Bei Mineralwolle, die vor 1998 in Gebäude eingebaut wurde, ist davon auszugehen, dass es sich um gefährliche handelt. Auch Mineralwolle, die nach 1998 eingebaut wurde und nicht das RAL- oder EUCEB-Gütesiegel trägt, ist als gefährlich einzustufen. [34]

Die Neuuzuordnung von alter Mineralwolle zu SN 31437 und somit zu gefährlichem Abfall hatte für die Industrie weitreichende Folgen. Laut ÖNORM EN ISO 21898 muss jeder Transport und jede Zwischenlagerung von gefährlichem Abfall in verpackter Form (z.B. BigBags) erfolgen. Gemäß Deponieverordnung ist die Ablagerung von gefährlichen Mineralwolleabfällen nur in Asbestkompartimenten von Baurestmassen-, Reststoff- oder Massenabfalldeponien zulässig. Aufgrund dieser Änderungen ist der Preis für die Entsorgung von einer Tonne Mineralwolleabfällen um das 3- bis 14- fache gestiegen. Es muss für die Deponierung alleine zwischen 250 - 1300 € bezahlt werden. Hinzu kommen die Kosten für die getrennte Sammlung und die für den aufwendigen Transport. [20, 31]

Die Eigenschaften und chemische Zusammensetzung von Mineralwolle und Asbest unterscheiden sich grundlegend. Aus diesem Grund ist die Zuordnung der alten Mineralwolle zu Asbestreststoffen von Industriepartnern kritisch hinterfragt worden. Laut der FMI [20] ist diese Zuweisung wissenschaftlich nicht belegbar und stellt eine österreichische, nicht EU-konforme Sonderregelung dar.

2019 wurde aus diesem Grund eine neue Abfallverzeichnisverordnung verabschiedet, die neuen Schlüsselnummern treten ab dem 01.01.2022 in Kraft. Eine Diversifizierung der Kategorie Mineralfaserabfälle soll zukünftig die Entsorgung von Dämmstoffen erleichtern. Mineralwolleabfälle sind laut Novellierung der österreichischen Abfallverzeichnisverordnung vom 23.09.2020 wie folgt laut Tabelle 2.4 zuzuordnen: [30]

Tabelle 2.4.: Schlüsselnummern laut österreichischer Abfallverzeichnisverordnung vom Jahr 2020 [30]

Abfallbezeichnung	SN	SN-Spez.	G/NG	Spezifizierung
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
Mineralfaserabfälle	31416	42	-	Steinwolle
ohne gefahrenrelevanten	31416	43	-	Glaswolle
Fasereigenschaften	31416	44	-	Mischung Steinwolle/Glaswolle
	31437	40	GN	Asbestabfälle, Asbeststäube
Mineralfaserabfälle	31437	41	G	künstliche Mineralfaserabfälle
mit gefahrenrelevanten	31437	42	GN	Steinwolle
Fasereigenschaften	31437	43	GN	Glaswolle
	31437	44	GN	Mischung Steinwolle/Glaswolle

Im Kreislaufwirtschaftspaket der Europäischen Union, einem Teilpaket des New European Green Deals, liegt ein Fokus auf der Verringerung des Deponievolumens in europäischen Ländern. Laut Artikel 4 Absatz (3) f) der europäischen Richtlinie über Abfalldeponien soll es für getrennt gesammelte Abfälle in Zukunft ein Deponieverbot geben.

"(3) Die Mitgliedstaaten treffen Maßnahmen, damit folgende Abfälle nicht auf einer Deponie angenommen werden:[...] f) Abfälle, die [...] für die Vorbereitung zur Wiederverwendung oder das Recycling getrennt gesammelt wurden [...]."[2]"

Im April 2021 veröffentlichte die Bundesrepublik Österreich eine neue Novelle zur geltenden Deponieverordnung, in welcher die Ziele der EU ein Stück weit umgesetzt werden. In ihr sind fundamentale Änderungen für die Deponierung von Mineralfaserabfällen enthalten. [4] Unverändert sind die Bedingungen, unter welchen Mineralfaserabfälle mit der Schlüsselnummer SN 31416 ohne gefahrenrelevante Eigenschaften abgelagert werden. Laut DV von 2021, Anhang 2 Kapitel zwei, müssen die folgenden Bedingungen erfüllt sein: Es dürfen keine Baustellenabfälle und organische Verunreinigungen nur in einem Ausmaß von höchstens 10 ϕ -% enthalten sein. [4] Für Mineralfaserabfälle mit gefahrenrelevanten Eigenschaften gelten gänzlich neue rechtliche Vorgaben, da diese zuvor der Abfallfraktion Asbestabfälle zugeordnet waren. Sie dürfen unter folgenden Bedingungen laut DV 2021 § 10c. Absatz 1 in Deponien für nicht gefährliche Abfälle ohne analytische Untersuchungen abgelagert werden:

"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 des 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]

Diese Novelle bringt Erleichterung in Bezug auf die Entsorgungsmöglichkeiten von Mineralfaserabfällen mit gefahrenrelevanten Eigenschaften. Die zusätzlichen Aufbereitungsschritte laut DV § 10c. Absatz 1/3 verteuern die Entsorgung jedoch merklich. Mit welchen Deponierungskosten pro Tonne Mineralfaserabfall zu rechnen ist, wird sich ab dem Jahr 2022 herausstellen.

Weiters wird ein Deponierungsverbot mit Ablauf des Jahres 2026 für Mineralfaserabfälle mit und ohne gefahrenrelevanten Eigenschaften festgelegt. Es soll Ende 2024 laut DV § 10c. Absatz 2 von Ministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie überprüft werden, ob:

“ausreichend nationale Recycling- oder Verwertungsmöglichkeiten für künstliche Mineralwollabfälle etabliert sind. Auf Basis der Ergebnisse wird eine [...] Anpassung des Datums des Inkrafttretens des Deponierungsverbots geprüft und [...] umgesetzt. [4]"

Die thematisierten rechtlichen Änderungen haben seit 2016 zum einen zu einer wesentlichen Vertuierung der Sammlung und Deponierung künstlicher Mineralfasern geführt. Auf der anderen Seite wird den involvierten Parteien durch die Ankündigung eines Deponierungsverbots ein Ultimatum gestellt. Diese Faktoren führen dazu, dass die Forschung an stofflichen Verwertungsverfahren von künstlichen Mineralfasern, insbesondere als Abfall, an Bedeutung gewonnen hat. Im folgenden Kapitel 3 wird auf bereits industriell eingesetzte Verfahren im Umgang mit KMF-Abfällen sowie den aktuellen Stand der Technik eingegangen.

2.2. Recycling von künstlichen Mineralfasern

Glas- und Steinwolleprodukte sind unter technischen Gesichtspunkten recyclingfähig, jedoch durch die Faktoren Arbeits- bzw. Gesundheitsschutz und Wirtschaftlichkeit limitiert. Rechtliche Grundlagen für das Recycling müssen noch geschaffen werden. Beim Recycling von Mineralwolleabfällen ist wichtig, dass der Abfall möglichst sortenrein vorliegt. Abfälle treten an verschiedenen Abschnitten des Lebenszyklus auf, wobei die größte Menge bei den letzten beiden anfällt: [6]

- Produktionsabfälle (sortenrein)
- Verschnittmaterial auf Baustellen (weitgehend sortenrein)
- Sanierungsarbeiten (nicht sortenrein)
- Abbrucharbeiten (nicht sortenrein)

Folgend werden die bekannten Recycling-Verfahren von Mineralwolle ausgeführt. Diese sind je nach Entwicklungsstand in zwei Gruppen eingeteilt: Stand der Technik und Stand der Forschung. Die Aufzählung ist exemplarischer Natur.

Stand der Technik

Die folgend aufgezählten Verfahren werden bereits industriell angewandt und sind somit Stand der Technik.

Recycling in der Primärproduktion

Die dänische Rockwool Gruppe bietet seit 1993 das Rockcycle System an, bei dem sortenreines, eigenes Verschnittmaterial von der Baustelle in Big Bags gesammelt und wieder von der Firma zurückgenommen wird. Andere Mineralwolleproduzenten, wie beispielsweise Isover, haben seitdem ähnliche Systeme etabliert. Das Verfahren der Firma Rockwool ist nur für die Rücknahme von neuer, sortenreiner Mineralwolle konzipiert, die vom Hersteller Rockwool produziert wurde. Gemeinsam mit den anfallenden Steinwolleresten werden diese in einer Recyclinganlage aufbereitet und gemeinsam mit den Primärrohstoffen wieder der Steinwolleproduktion zugeführt. Die Flumroc AG bietet eine ähnliche Lösung für deren neue Steinwolleprodukte an. Die zurückgenommenen Abfälle werden in einer Aufbereitungsstufe von Fremdstoffen befreit und danach zu Briketts gepresst. In Schacht- oder Rinnenöfen erfolgt dann gemeinsam mit Primärrohstoffen das Einschmelzen und Verspinnen der Einsatzstoffe. [6, 35]

Das Recycling von Mineralwolle in der Primärproduktion ist durch die Bedingung der Sortenreinheit stark limitiert. Dieses Verfahren beschränkt sich deshalb auf die Abschnitte der Produktionsabfälle und Verschnittmaterial auf Baustellen. Der mengenmäßig größte Teil der Mineralwolleabfälle kann in diesem Prozess nicht rezykliert werden. [6]

Verwertung in der Ziegelherstellung

Mineralwolleabfall kann in der Ziegelherstellung als mineralische Rohstoffkomponente eingesetzt werden. Es durchläuft in vorzerkleinerter Form gemeinsam mit den anderen Rohstoffkomponenten den gesamten Aufbereitungsprozess. Beim Brennprozess der Ziegel wirkt es aufgrund seiner glasigen Struktur als Sinterhilfsmittel. Bei diesem stofflichen Verwertungsprozess muss die Zerstörung von Störstoffen gewährleistet sein. Zusätzlich muss der Hersteller der Ziegel bei Verwendung von alter Mineralwolle garantieren können, dass gefährliche Fasergeometrien im Prozess des Brennens zerstört werden. [7]

Zerkleinerer von ACA-Industry

Der Zerkleinerer von ACA-Industry ist speziell ausgelegt auf das Aufschließen und Zerkleinern von Steinwolle und Glaswolle. Außerdem separiert er zur besseren späteren Sortierung und Verwertung die Verpackung von den Mineralwolleabfällen. Nach dem Aussortieren kann das vorzerkleinerte Material einer Verwertung zugeführt werden. Somit stellt ACA-Industry als Abfallaufbereiter keine Recyclingtechnologie zur Verfügung, sondern deren Zerkleinerer dient als Vorbereitung zur Verwertung von Mineralwolleabfällen. [36]

Stand der Forschung

Folgend findet sich eine Auflistung von Verfahren, an denen zur Zeit geforscht wird.

Mikrowellentechnologie

Dieses Verfahren zielt auf die Zerstörung der Struktur von alter Mineralwolle ab, um anschließend eine stoffliche Verwertung ohne potentielle Gefahren durchzuführen. Für die thermische Behandlung kommen Mikrowellen zum Einsatz. Über einen Zeitraum von 2-10 min wird eine Probe aus Mineralwolle in einer Multi-Mode-Mikrowellenanlage behandelt. Das Ergebnis der Untersuchungen zeigt, dass die Verschlackung mittels Mikrowellenbehandlung möglich ist. Die Behandlung von Mineralwolleabfällen mit Mikrowellen kommt industriell noch nicht zu Einsatz, stellt aber eine mögliche Vorbehandlungsstufe für das Recycling von alter Mineralwolle dar. [7]

Verwertung als Füllstoff in der Betonindustrie

Laut Cheng et al. [8] eignen sich konditionierte Steinwolleabfälle als grobe oder feine Gesteinskörnung oder ultrafeiner Füllstoff für die Herstellung zementhaltiger Verbundstoffe. Die Zugabe von Steinwolleabfällen verbessert deren Druckfestigkeit, Absorption und Spaltzugfestigkeit, die Rissausbreitung im Verbundstoff wird gehemmt. Zusätzlich kann durch den Einsatz von diesem Abfall eine Kostensenkung und Reduzierung des CO₂-Ausstoßes erzielt werden. [5, 8]

Herstellung von Geopolymerbeton

Ein Forschungsprojekt mit dem Namen Wool2Loop in Finnland beschäftigt sich mit einer Mahl- und Vorbehandlungstechnologie für Mineralwolleabfälle zum Zweck der Herstellung neuer Produkte. Anhand dieser soll durch Alkaliaktivierung Geopolymerbeton aus Mineralwolle produziert werden. Das Material verursacht potentiell um 80 % weniger CO₂-Emissionen als herkömmlicher Beton und kann für faserverstärkte Platten, Fassadenelemente, Trockenbeton oder Estriche eingesetzt werden. Im Rahmen des Projekts wird an einer ganzheitlichen Kreislaufwirtschaft für Mineralwolle gearbeitet. [37, 38, 39]

Das RecyMin Projekt

Das RecyMin Projekt an der Montanuniversität beschäftigt sich mit abfalltechnischen und -wirtschaftlichen sowie recyclingtechnischen Zusammenhängen. Ziel ist eine ganzheitliche Betrachtung der potentiellen Lösungsansätze für einen effizienteren, innovativen Umgang mit Mineralwolleabfällen. Das Projekt soll dazu dienen, die Chancen und Herausforderungen im stofflichen Recycling von KMFs, ausgelöst durch die rechtlichen Änderungen der letzten Jahre, technisch und wissenschaftlich zu beleuchten. Folgend findet sich eine Auflistung der zu betrachtenden Ansätze und Aspekte im Rahmen des Projekts. [5]

Konditionierung für Deponierung

Wie bereits in Kapitel 1 beschrieben, weist Mineralwolle für die Deponierung ungünstige Eigenschaften auf. Sie stellt eine Gefahr für die Standsicherheit der Deponie dar. Um die ungünstigen Eigenschaften zu verbessern, soll der Abfall anhand nass- sowie trockenmechanischer Aufbereitung vorverdichtet werden. Dazu erfolgt eine Zerkleinerungstufe, gefolgt von einem Agglomerationsprozess, der Brikettierung. Somit erhält die Mineralwolle eine höhere Gesamtdichte sowie eine höhere Druckfestigkeit. Dies soll eine sichere Deponierung ohne Senkungen der Deponieoberfläche gewährleisten. [5, 12]

Verwertung im Bergversatz

Eine weitere Einsatzmöglichkeit neben der Deponierung ist die Anwendung im Bergversatz. In Deutschland existiert bereits ein Verfahren um dies zu ermöglichen, während in Österreich noch keine Versatzprodukte aus Mineralwolleabfällen hergestellt werden. [40] Die Herstellung und Testung von hydraulisch abbindenden, pumpfähigen Versatzprodukten ist Teil des RecyMin Projekts.[5, 12]

Recycling in der Mineralwolleindustrie

Im Sinne der Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung bietet der Ansatz der Verwertung in der Mineralwolleindustrie die optimale Lösung. Primärrohstoffe werden reduziert, durch den Schmelzvorgang des Sekundärmaterials gefahrenrelevante Charakteristika zerstört sowie Deponievolumen gespart. Durch Verunreinigungen im Sekundärmaterial kann es zu Problemen im Einschmelzvorgang und zur Änderung der Zielzusammensetzung des Produkts kommen. Ein Verfahren für das direkte Einbringen von Abfällen wurde im Rahmen eines europäischen Forschungsprojekts entwickelt. [41] Trotz des Bestehens von Recyclingoptionen erfolgt in Österreich kein Recycling von Mineralwolleabfall. Wie bereits in diesem Kapitel erwähnt, betreiben Hersteller bereits Recycling, nehmen dafür jedoch nur ihre eigenen, unverschmutzten Abfälle von Kunden zurück. Abbruchmaterial erfüllt diese Bedingungen nicht, da hierbei weder Hersteller des Materials noch Reinheitsgrad bekannt sind. Das Untersuchen der relevanten Eigenschaften der Schmelze in Bezug auf Qualität des Endprodukts ist Teil des RecyMin Projekts. [5]

Verwertung in der Zementindustrie als Ersatzrohstoff

Ein weiterer Teil des RecyMin Projekts ist das Erforschen der Verwertungsmöglichkeiten von Mineralwolleabfällen in der Zementindustrie als Ersatzrohstoff bei der Klinkerherstellung. Mineralwolle könnte aus chemisch-mineralogischer Sicht Primärrohstoffe wie Kalkstein oder Ton substituieren. Durch den Hochtemperaturprozess im Drehrohfen findet ein Schmelzen der Fasern statt, gefahrenrelevante Eigenschaften gehen verloren. [5]

Verwertung in der Zementindustrie als Sekundärzumahlstoff

Mineralwolleabfälle können potentiell in der Zementindustrie auch als Sekundärzumahlstoff in der Vermahlung des Klinkers zu Zement rezykliert werden. Werden Mineralwolleabfälle als Zumahlstoff verwendet, dürfen sie keine gefahrenrelevanten Eigenschaften mehr aufweisen und müssen bereits latent-hydraulische Eigenschaften besitzen, da kein Hochtemperaturprozess stattfindet. Folgende Rahmenbedingungen müssen für den Einsatz als Sekundärzumahlstoff eingehalten werden:

- Zerstörung der gefahrenrelevanten Eigenschaften
- Erzeugung eines Produkts mit latent-hydraulischen Eigenschaften
- Erzeugung eines Produkts mit einer chemischen Zusammensetzung innerhalb der Grenzen, die für Zumahlstoffe in der Bindemittelindustrie festgelegt sind

Diese Arbeit beschäftigt sich, wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, mit dem Schritt der Aufbereitung der Mineralwolle zur Verwertung in der Zementindustrie. Es soll ein Verfahren gefunden werden, durch welches Mineralwolle und Mineralwolleabfälle die geforderten Eigenschaften erhalten. Hüttensand, ein Nebenprodukt der Eisen- und Stahlindustrie, fungiert in der Praxis bereits als Zumahlstoff in der Zementindustrie. Angelehnt an dessen Zusammensetzung und Eigenschaften soll Mineralwolleabfall dahingehend behandelt werden. Die Eignung von Hüttensand und anderen Sekundärzumahlstoffen für den Einsatz in der Zementindustrie wird in Kapitel 4 thematisiert.

2.3. Sekundärzumahlstoffe in der Bindemittelindustrie

Laut US Geological Survey betrug 2020 die jährliche Produktionsmenge an Zement 4.1 Mrd. Tonnen. Der Einschätzung zufolge wird die Nachfrage bis 2050 auf 5.4 Mrd. Tonnen weltweit steigen, alleine 1 Mrd. Tonnen davon in China. Abbildung 2.6 zeigt die Entwicklung der Nachfrage auf dem globalen Markt. [42, 43]

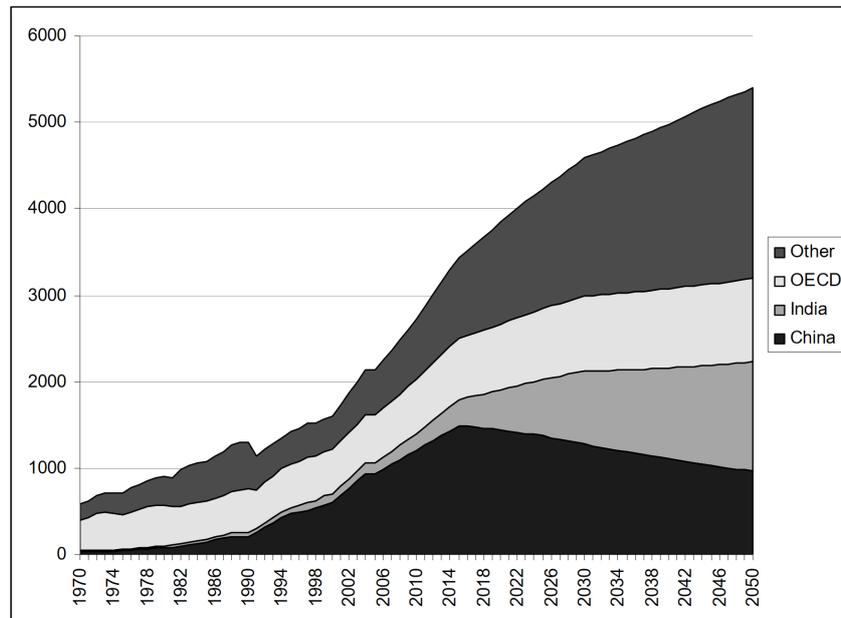


Abbildung 2.6.: Globale Nachfrage nach Zement unterteilt nach Regionen und Ländern von 1970 - 2050 laut US Geological Survey mit Stand 2006 [42]

Zement ist somit das am häufigsten hergestellte Material der Welt, die Zementindustrie zählt zu den größten CO_2 Produzenten. Durch den Einsatz von Sekundärstoffen bei der Herstellung von Zement kann eine Reduktion der Emissionen erzielt werden. Dies wird in der Praxis bereits umgesetzt. Die Lafarge Zementindustrie in Mannersdorf, Österreich, verwendet beispielsweise ausschließlich Ersatzbrennstoffe in ihrer Produktion. Auch Sekundärzumahlstoffe wie Hüttensand oder Gips aus Rauchgasentschwefelungsanlagen (REA) finden seit Jahren Anwendung in der Zementindustrie. Laut Vereinigung der Österreichischen Zementindustrie wurden im Jahr 2019 insgesamt über 1 Mio. Tonnen an Sekundärzumahlstoffen in der österreichischen Zementindustrie verarbeitet. Abbildung 2.7 zeigt die Einsatzmengen der wichtigsten Sekundärzumahlstoffe der Jahre 2015 - 2020. [9, 44]

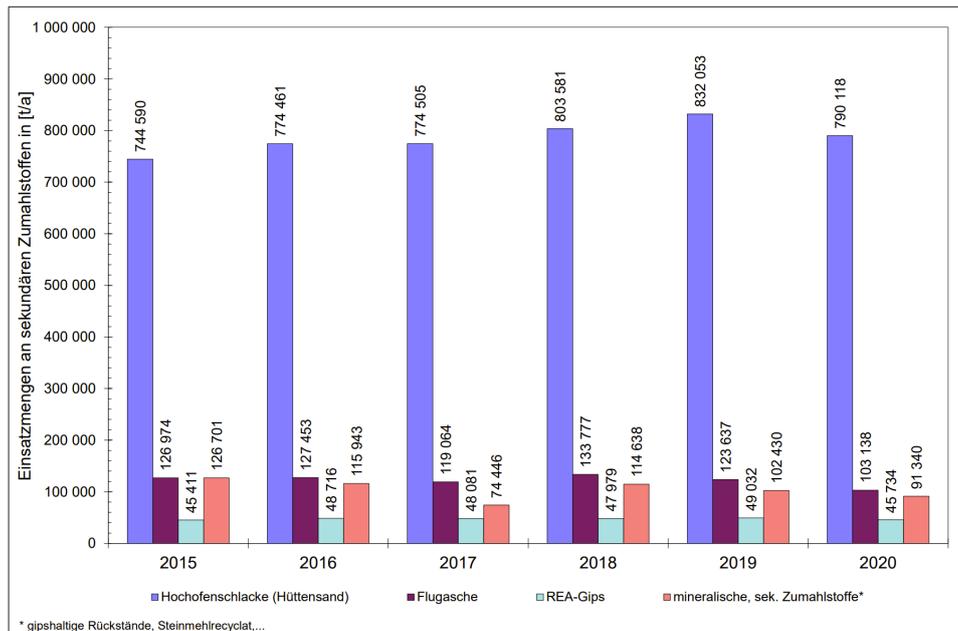


Abbildung 2.7.: Einsatzmengen sekundärer Zumahlstoffe in der österreichischen Zementindustrie von 2015 - 2020 [44]

Folgend wird auf die wichtigsten Sekundärzumahlstoffe eingegangen. Ein Fokus liegt auf Hüttensand, da das Ziel dieser Arbeit darauf beruht, Mineralwolleabfälle ähnlich wie Hüttensand aufzubereiten.

Hüttensand

Das meistverwendete latent-hydraulische Bindemittel ist granuliert Hochofenschlacke, Hüttensand genannt. Schlacke entsteht als Nebenprodukt im Hochofen, beim Abstich hat sie eine Temperatur von etwa 1450 °C. [45] Durch schnelles Abkühlen der flüssigen Hochofenschlacke entsteht ein Granulat mit sehr hohem Glasanteil. Dieser wird fein aufgemahlen und als Hüttensandmehl zur Klinkerherstellung eingesetzt. [46] Hochofenschlacke kommt in Form von Hüttensand seit mittlerweile über eineinhalb Jahrhunderten in der Bindemittelindustrie zum Einsatz. [10] Laut einschlägiger Fachliteratur wird Hüttensand als schnell abgekühlte, glasige Hochofenschlacke definiert. [45, 47]

Ausschlaggebend für die Eignung von Hüttensand in der Bindemittelindustrie sind die Faktoren Reaktivität, Mahlbarkeit und der Gehalt an unerwünschten Bestandteilen. [47] Sein latent-hydraulisches Reaktionsvermögen und der damit verbundene Beitrag zur Festigkeits- und Gefügeentwicklung ist das wichtigste Qualitätsmerkmal. Es sind zwei Mechanismen der latent-hydraulischen Erhärtung nachgewiesen, nämlich durch alkalische Anregung und durch sulfatische Anregung. Dem Festigkeitsbeitrag von Hüttensand, welcher in der Bindemittelindustrie zum Einsatz kommt, liegt vorrangig die alkalische Anregung durch den Zementklinker zugrunde.[11]

Die wesentlichen Eigenschaften

Der Faktor Reaktivität ist hauptsächlich durch die Zusammensetzung der Schlacke bestimmt. Insofern sind große Mengen an kristallinem Material bei der Herstellung von Hüttensand zu vermeiden. Je höher der Glasgehalt, desto geeigneter ist der Hüttensand für die Zementindustrie. [11] Hüttensand besteht zum größten Teil aus den Elementen Calcium, Magnesium, Aluminium, Silizium und Sauerstoff. Die Zusammensetzung variiert stark zwischen produzierenden Standorten. Eine Auflistung typischer Zusammensetzungen von Hüttensand findet sich in Abbildung 2.8.

Kennwert		Mittel	Max.	Min.	$S_{(n-1)}$	n
Unl. Rückst.	%	0,43	3,98	0,03	0,53	57
SiO ₂	%	35,56	39,41	30,53	2,05	90
Al ₂ O ₃	%	11,78	17,58	6,71	1,95	90
FeO	%	0,63	2,35	0,12	0,42	90
TiO ₂	%	0,67	3,16	0,16	0,47	86
MnO	%	0,51	1,70	0,07	0,31	89
CaO	%	40,15	45,90	32,10	2,37	90
MgO	%	7,99	17,27	1,67	2,43	90
Na ₂ O	%	0,49	1,73	0,13	0,26	76
K ₂ O	%	0,68	1,42	0,08	0,24	90
SO ₃ ²⁻	%	0,12	0,70	0,00	0,16	31
P ₂ O ₅	%	0,07	1,51	0,00	0,23	42
S ²⁻	%	1,31	2,30	0,58	0,35	86
CO ₂	%	0,16	0,76	0,00	0,17	70
H ₂ O	%	0,25	1,23	0,00	0,23	70
Reindichte	g/cm ³	3,00	2,97	2,80	0,82	53
Glasgehalt	Vol.-%	97,5	100,0	80,2	3,50	65
CaO/SiO ₂	-	1,13	1,35	0,87	0,10	90
$\frac{\text{CaO} + \text{MgO}}{\text{SiO}_2}$	-	1,36	1,57	1,03	0,10	90
F-Wert (Keil) *	-	1,58	1,95	1,23	0,14	90

Abbildung 2.8.: Grenzen der Zusammensetzung von Hüttensand [10]

Über die Größen Basizität oder Glasgehalt lassen sich Aussagen über die Eignung von Hüttensand schließen. Übliche in der Bindemittelindustrie eingesetzte Schlacke besteht aus > 90 % glasartigem Material. [10, 11] Ein glasartiges Gefüge bildet sich durch sehr schnelles Abkühlen der Schmelze. Dadurch wird Kristallbildung aus der Schmelze verhindert, der glasartige Zustand im Festkörper wird erhalten. Bei einem langsamen Erstarrungsprozess bilden sich Silikate, Sulfide oder Metalloxydverbindungen aus der Schmelze, denen wenig bis keine hydraulische Aktivität zugesprochen wird. [10]

Zementarten, die als Hauptbestandteil neben Zementklinker auch Hüttensand enthalten, werden Hüttenzement genannt. Es sind folgende Hauptvertreter bekannt:

- Hochofenzement (CEM III) mit 36 bis 95 w-% Hüttensand,
- Portlandhüttenzement (CEM II/A-S, CEM II/B-S) mit 6 bis 35 w-% Hüttensand und
- Portlandkompositzement (CEM II/A-SV/CEM II/B-SV) [11, 48]

Flugasche

Flugasche entsteht bei Verbrennungsprozessen in Kraftwerken. In einer Rauchgasreinigungsanlage werden die partikelförmigen Rückstände vom Abgas getrennt. Die Zusammensetzung von Flugasche variiert je nach verwendetem Brennstoff. Die Inhaltsstoffe sind mineralischer Natur, es können auch Spuren von Schwermetallen enthalten sein. Die Zugabe von Flugasche als Sekundärzumahlstoff steigert die Bearbeitbarkeit des Endprodukts Beton. Dies lässt sich auf eine Reduktion des Wasseranteils im Gefüge zurückführen. [49]

Silikastaub

Bei der Erzeugung von Silicium- und Ferrosiliciumlegierungen entsteht das Nebenprodukt Silikastaub. Es zählt zu den künstlichen puzzolanen Bindemitteln und findet Anwendung als Zumahlstoff in der Zementherstellung. Durch die Beimengung von Silikastaub zum Zement wird eine höhere Stabilität des Endprodukts erreicht. [50]

REA-Gips

Bei Rauchgasentschwefelungsanlagen fällt sogenannter REA-Gips als Nebenprodukt an. Bei der Reaktion von Kalk und Schwefeldioxid im Abgasstrom entsteht Calciumsulfat Dihydrat. In der Zementindustrie wird deshalb REA-Gips als Sulfatträger eingesetzt. Die Trocknungsphase des Endprodukts Beton wird dadurch optimiert. [51]

Vorteile des Einsatzes

Für den Einsatz von Sekundärzumahlstoffen in der Zementindustrie sprechen viele Gründe wirtschaftlicher, technologischer und nachhaltiger Natur. Durch deren Verwendung können wertvolle Primärrohstoffe substituiert werden. Dies geht einher mit einer Einsparung von Schadgasemissionen. Der CO_2 -Ausstoß der gesamten Industrie kann nachhaltig und langfristig verringert werden. Zusätzlich fallen die beschriebenen Sekundärzumahlstoffe als Abfälle oder Nebenprodukte in anderen Industrien an. Durch den Einsatz in der Zementindustrie können enthaltene Wertstoffe genutzt werden, potentiell gefährliche Eigenschaften werden eliminiert. Ein weiterer positiver Effekt ist das Verhindern der Deponierung der Abfälle oder Nebenprodukte. [48]

Potential von künstlichen Mineralfasern

Die Vorteile aus Kapitel 2.3 gelten auch für Mineralwolleabfälle. Zusammenfassend kommen KMFs aufgrund folgender Punkte als Sekundärzumahlstoffe für die Zementindustrie in Frage:

- Die Zementindustrie ist durch die geplante Klimaneutralität Europas mit dem Jahr 2050 dazu gezwungen, vermehrt auf Sekundärstoffe in der Zementherstellung zu setzen. Sekundärrohstoffe, Sekundärzumahlstoffe sowie Ersatzbrennstoffe werden in den kommenden Jahren an Bedeutung gewinnen. [1, 9]
- Aufgrund der geplanten Dekarbonisierung der Stahlindustrie ist in Zukunft mit einem Sinken der jährlichen Hüttensandproduktion zu rechnen. Die Zementindustrie ist auf diesen Zumahlstoff für die Herstellung spezifischer Produkte angewiesen, es muss ein Substituent gefunden werden. [9]
- Die Zementindustrie fungiert als Reststoffverwerterin für verschiedene Industrien, eine Verwertung von KMFs ist naheliegend. [52]
- Mineralwolleabfälle werden derzeit deponiert. Mit dem geplanten Deponierungsverbot ab 2027 in Österreich wird diese Option nicht mehr zur Verfügung stehen. Eine alternative Verwertungsmöglichkeit muss gefunden werden. [4]
- KMFs besitzen ähnliche chemische Eigenschaften wie Hüttensand. Durch das Hinzufügen von Ergänzungstoffen kann potentiell eine weitgehend idente Zusammensetzung erreicht werden. [11, 12]
- Die gefahrenrelevanten Eigenschaften von Mineralwolleabfällen können im Rahmen der Vorbereitung des Materials für den Einsatz als Sekundärzumahlstoff eliminiert werden.

3. Material und Methode

In diesem Teil der Arbeit werden die eingesetzten Materialien, der Versuchsaufbau und die praktische Versuchsdurchführung beschrieben. Die Bezeichnung der Versuche erfolgt durch Verwendung der Abkürzung von Identifikation (ID) und den fortlaufenden Zahlen von 1 - 10. Die Versuche werden in Folge ID 1 - ID 10 genannt.

3.1. Oxidgehalt

Die eingesetzten Materialien für die Versuche sind mit ihren chemischen Zusammensetzungen als Oxide angegeben. Die Analysen mittels RFA wurden im Rahmen 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) zur Verfügung gestellt.

Zement - CEM II

Bei den Versuchen ID 1 - ID 3 ist anteilig Zement in der Probe enthalten. Die Probe wird aus einem Steinwolle-Zement-Brikett (SW-CEM-B) hergestellt. Das Ausgangsmaterial besteht zu 95 w-% aus Steinwolle Sonorock 035, siehe Tabelle 3.1, und zu 5 w-% aus Zement vom Typ CEM II/B-M (S-L) 32,5 R. Von dem Stoff CEM II und dem SW-CEM-Brikett ist keine RFA vorhanden. Diese ist für die Arbeit nicht relevant.

Glaswolle - Isover

Die Glaswolle der Firma Isover vom Typ 604818 kommt in der Probenaufbereitung, siehe Kapitel 3.2, zum Einsatz. Es wurden im Rahmen dieser Arbeit keine Schmelz- und Granuliersversuche mit Glaswolle durchgeführt. Die chemische Zusammensetzung der Glaswolle laut RFA findet sich in Tabelle 3.1.

Steinwolle - Rockwool

Das Primärmaterial Sonorock 035 der Firma Rockwool kam bei den Versuchen ID4-ID 10 zum Einsatz. Die chemische Zusammensetzung der Steinwolle laut RFA findet sich in Tabelle 3.1.

Tabelle 3.1.: Oxidgehalt von Glaswolle und Steinwolle laut RFA

Parameter	Glaswolle Isover	Steinwolle Rockwool
[-]	[w-%]	[w-%]
Cl	0.08	<0,025
Na ₂ O	14.53	1.74
MgO	3.09	10.33
Al ₂ O ₃	1.51	15.44
SiO ₂	63.91	40.48
P ₂ O ₅	0.13	0.33
SO ₃	0.22	0.18
K ₂ O	0.80	1.14
CaO	7.24	16.10
TiO ₂	0.05	1.35
Cr ₂ O ₃	<0,025	0.28
MnO	0.57	0.63
Fe ₂ O ₃	0.56	8.76
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 ₂ O ₃	<0,025	0.36
B ₂ O ₃	1.14	<0,025
LOI	5.86	2.62

Eierschalenpulver

Eierschalenpulver enthält einen großen Anteil an Calcium und wird in Folge bei den Versuchen als Calciumträger verwendet. Der Anteil an TOC beträgt ca. 6 %. Die chemische Zusammensetzung des Ergänzungstoffes laut RFA findet sich in Tabelle 3.2.

Tabelle 3.2.: Oxidgehalt von Eierschalpulver laut RFA

Parameter	Eierschalpulver
[-]	[w-%]
CaO	50.70
MgO	0.61
P ₂ O ₅	0.24
SO ₃	0.10
Na ₂ O	0.06
K ₂ O	0.02
LOI	47.30

Calciumcarbonat-Pulver

Calciumcarbonat (CaCO₃) besteht hauptsächlich aus Calcium und ist deshalb als Calciumträger geeignet. Zusätzlich ist der Anteil an Organik im Vergleich zu Eierschalpulver gering. Die chemische Zusammensetzung des Calciumcarbonat-Pulvers laut Produktbeschreibung der Firma Carl Roth ist in Tabelle 3.3 ersichtlich. [53]

Tabelle 3.3.: Chemische Zusammensetzung von Calciumcarbonat-Pulver [53]

Parameter	Calciumcarbonat-Pulver
[-]	[w-%]
CaCO ₃	>98.50
SO ₄	<0.50
Cl	<0.05
Sb	<0.01

Kohlenstoff-Pulver

Als Reduktionsmittel kommt ein hochreines und graphitisches Aufkohlungsmittel der Firma CS-Additives zum Einsatz. Die Produktbezeichnung lautet Carbolux G, die chemische Zusammensetzung laut Produktblatt ist in Tabelle 3.4 zu finden. [54]

Tabelle 3.4.: Chemische Zusammensetzung von C-Pulver Carbolux G[54]

Parameter	Carbolux G
[-]	[w-%]
C	50.70
S	0.61
Asche	0.24
N	0.10
flüchtige Bestandteile	0.06

3.2. Probenaufbereitung

Wie bereits in Kapitel 1.1 beschrieben, ist vor dem Einbringen von Mineralwolle in den Elevatorofen eine Probenaufbereitung notwendig. Die durchgeführten Maßnahmen zur Volumenreduktion von Mineralwolle sind in Kapitel 3.2 ausgeführt. Bevor der Aufbereitungsvergleich abgeschlossen wurde, erfolgten bereits Granuliersversuche mit Steinwolle, um die Nassgranulationsanlage auf deren Funktionalität zu überprüfen. Für diese Versuche kommen Steinwolle-Zement-Briketts (SW-CEM-B) zum Einsatz, da dieses Material zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung zur Verfügung steht. [12] Die Aufbereitung der SW-CEM-B ist in Kapitel 3.2 ausgeführt.

SW-CEM-B

Zur ersten Inbetriebnahme der Nassgranulationsanlage erfolgt für die ersten Versuche das Einschmelzen einer Mischung aus Steinwolle und Zement. Die Zusammensetzung der Steinwolle ist Tabelle 3.1 zu entnehmen. Das Material liegt in brikettierter Form, siehe Abbildung 3.1 (a), vor. Das Brikett stammt von einer Versuchsreihe von Sattler et al. [55] vom Lehrstuhl für Abfallverwertung und Abfallwirtschaft der Montanuniversität Leoben. Eine Vorzerkleinerung des Briketts mit Hammer und Meißel ist notwendig, das Ergebnis dieser ist in Abbildung 3.1 (b) zu sehen. Zum Herstellen einer möglichst homogenen Probe erfolgt das Brechen des vorzerkleinerten Briketts auf durchschnittlich 2 mm mit dem Brecher BB50 der Firma Retsch. Die aufbereitete Probe, siehe Abbildung 3.1 (c), wird zusätzlich mit einem Riffelteiler homogenisiert.

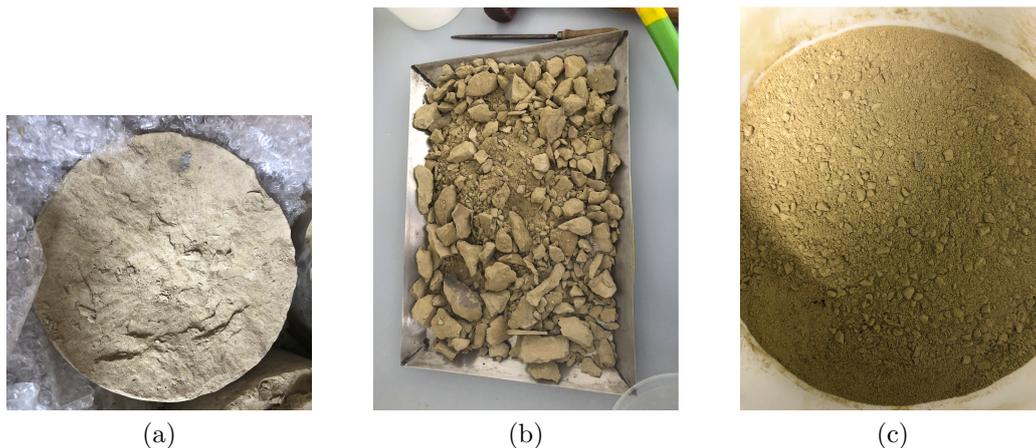


Abbildung 3.1.: (a) Brikett von Sattler [55] (b) Brikett nach Vorzerkleinerung (c) Brikett nach Brechen auf 2 mm

Primärprodukt Mineralwolle

Steinwolle und Glaswolle haben eine geringe Dichte und sind stark kompressibel. Vor dem Einbringen in einen Schmelztiegel muss eine Verdichtung des Primärmaterials stattfinden, um die benötigte Mindestmenge an Produktgranulat erzeugen zu können. Für eine erste zementtechnologische Analyse wird pro Versuch eine Produktmenge von 0.8-1.5 kg benötigt. Das Volumen der Steinwolle muss somit in einer Form reduziert werden, dass eine möglichst große Masse in den Graphittiegel passt. Die durchgeführten Vorversuche ID a-ID d zur Volumenreduktion werden folgend beschrieben. Es wird Glaswolle der Firma Isover vom Typ 7916400 anhand unterschiedlicher Methoden verdichtet. Das Primärmaterial hat eine Dichte von 102 kg/m^3 . Die Ergebnisse inklusive Abbrennraten und Volumenreduktionsfaktor sind in Tabelle 4.1 zu finden. [12]

ID a: Volumenreduktion mit Laborgasbrenner

Ein Stück Glaswolle, ersichtlich in Abbildung 3.2 (a), ist in einer Blechwanne positioniert und unter einem Gasabzug auf zwei Schamottsteinen gelagert. Mit dem Ziel der Volumenreduktion erfolgt das manuelle Niederbrennen des Materials an der Oberseite mit einem Laborgasbrenner. Dabei kommt es zu keiner Umlagerung des Materials. Abbildung 3.2 (b) zeigt das Stück Glaswolle nach dem Abbrennvorgang.

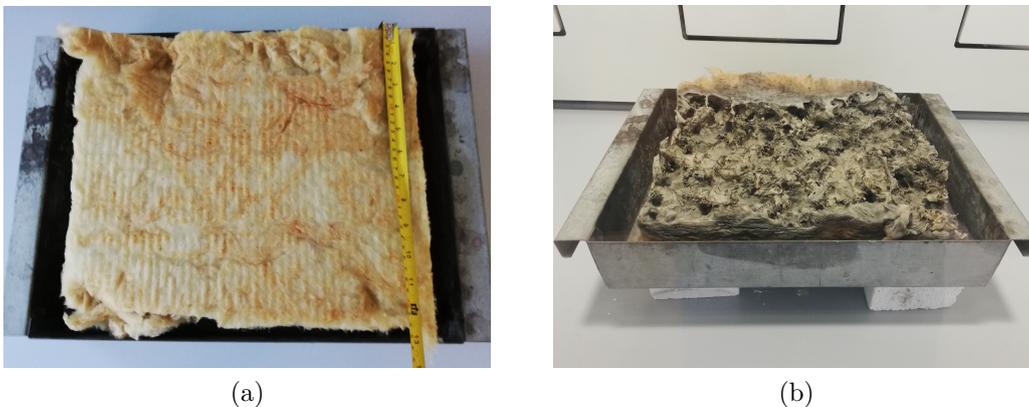


Abbildung 3.2.: ID a: (a) Glaswolle bei $t = 0$ (b) Glaswolle nach Volumenreduktion mit Laborgasbrenner nach $t = 20 \text{ min}$

ID b: Volumenreduktion mit Aufschweißbrenner

Der Versuch der Volumenreduktion durch Abbrennen erfolgt unter Verwendung eines Aufschweißbrenners. Das verwendete Stück Glaswolle liegt in einer Blechwanne. Der Einsatz eines Aufschweißbrenners, zu sehen in Abbildung 3.3 (a), soll die Abbrennraten deutlich erhöhen. Das abgebrannte Material ist in Abbildung 3.3 dargestellt.



Abbildung 3.3.: ID b: (a) Glaswolle bei $t = 0$ (b) Glaswolle nach Volumenreduktion mit Aufschweißbrenner nach $t = 10$ min und Wechsel des Probenbehälters

ID c: Volumenreduktion durch Mixen und Trocknen

Ein weiterer Ansatz zur Volumenreduktion von Mineralwolle ist das Zerkleinern der Mineralwolle mit Wasser in einem Mixer mit nachfolgender Filterung und anschließender Trocknung im Trockenschrank. Die Mineralwolle ISOVER 7916400 wird im ersten Schritt in faustgroße Stücke geschnitten. Für den Versuch kommt ein herkömmlicher Küchenmixer der Firma Philips zu Einsatz, darin erfolgt das Zerkleinern einer Emulsion aus Leitungswasser und der vorzerkleinerten Mineralwolle. Die Mischung aus Mineralwolle und Wasser durchläuft anschließend einen Filterungsprozess, siehe Abbildung 3.4 (a) mit Filternuttsche und Wasserstrahlpumpe. In Abbildung 3.4 (b) ist rechts die getrocknete, zerkleinerte Mineralwolle zu sehen. Im Vergleich liegt links daneben unbehandelte Mineralwolle mit identischem Gewicht.

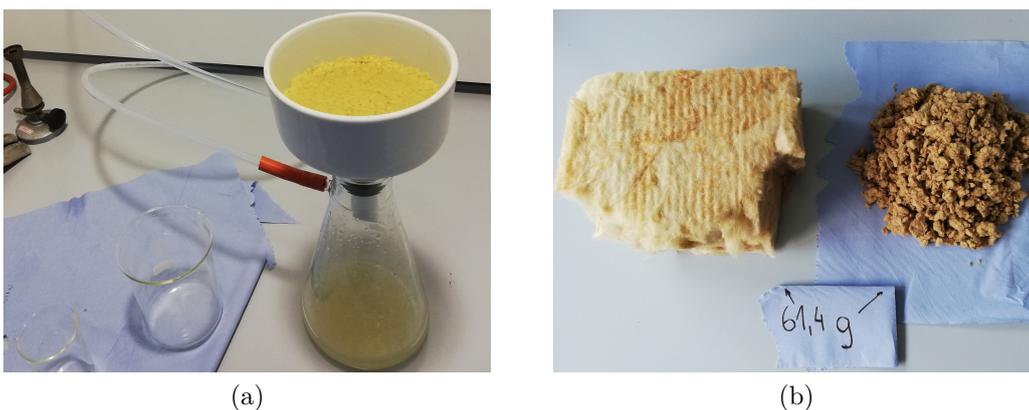


Abbildung 3.4.: ID c: (a) Versuchsaufbau der Volumenreduktion durch Mixen und Trocknen (b) Vergleich unbehandelter (links) und behandelter (rechts) Glaswolle nach Volumenreduktion durch Mixen und Trocknen

ID d: Volumenreduktion durch Brikettierung

Wie in Kapitel 2.2 beschrieben, wendet eine Forschungsgruppe im Projekt RecyMin zum Erreichen einer höheren Dichte der Mineralwolle die Methode der Brikettierung an. In Folge wird diese auch für die Probenaufbereitung getestet.

Im Rahmen dieser Arbeit kommen Steinwolle- und Glaswolleprimärprodukte für die Brikettierung zum Einsatz. Die Brikettierpresse wird von der Firma ATS Recyclingsystems zur Verfügung gestellt. Die Herstellung der Briketts erfolgt unter der maximalen Pressdruckbelastung von 13 bar für 3 Sekunden, es wird kein Bindemittel zugesetzt. Die hergestellten Briketts, zu sehen in Abbildung 3.5, haben einen Durchmesser von 7.5 cm, ihre Höhe variiert je nach Menge an zugeführtem Material zwischen 4 und 7 cm.



Abbildung 3.5.: Hergestellte Briketts aus Glaswolle (links) und Steinwolle (rechts) mittels Versuchsanlage der Firma ATM-Recyclingsystems

Es geht aus den Ergebnissen heraus, dass die erreichte Volumenreduktion bei Versuch ID d signifikant höher ist als bei ID a - ID c. Aus diesem Grund wird für diese Arbeit die Brikettierung als Verfahren für die Mineralwolleaufbereitung gewählt. Die Ergebnisse der Versuche ID a - ID d sind in Tabelle 4.1 in Kapitel 4 zu finden.

3.3. Mischungsrechner

Die chemische Zusammensetzung von Sekundärzumahlstoffen in der Zementindustrie ist reglementiert. Die Oxidgehalte und Basizitäten müssen innerhalb festgelegter Grenzen liegen. Gleiches gilt in Folge auch für Mineralwolle als potentieller Sekundärzumahlstoff. Für die Versuchsreihe wurde vorweg eine Zielzusammensetzung des Produktgranulats gewählt. Diese sollte gerade den Mindestgehalt an CaO erfüllen, da das Hinzufügen eines Calciumträgers zusätzliche Kosten verursacht und somit möglichst gering gehalten werden soll.

Für das Erstellen der gewünschten Zusammensetzung kommt ein Mischungsrechner (MR) zum Einsatz. Das Ziel ist, die Eingangsstoffe in einer Weise zu mischen, dass das entstehende Mischungsprodukt innerhalb der durch die Bindemittelindustrie vordefinierten Grenzen liegt. Die Vorgaben sind in Tabelle 3.5 zusammengefasst und enthalten Maximum- und Minimumgrenzen für Oxidgehalte sowie solche für Basizitäten.

Tabelle 3.5.: Maximum- und Minimumgrenzen der Oxidgehalte und Basizitäten für Sekundärzumahlstoffe in der Bindemittelindustrie [56]

Parameter	Grenzen	
	Minimum	Maximum
[-]	[w-%]	[w-%]
SiO ₂	31.00	39.00
Al ₂ O ₃	7.00	18.00
MgO	2.00	17.00
CaO	38.00	46.00
CaO+MgO+SiO ₂	66.00	100.00

Parameter	Grenzen	
	Minimum	Maximum
[-]	[-]	[-]
CaO/SiO ₂	0.87	1.35
(CaO+MgO)/SiO ₂	1.03	1.57
(CaO+MgO)/(Al ₂ O ₃ +SiO ₂)	0.60	1.2

Der verwendete Mischungsrechner ist von Eisner [56] im Rahmen seiner Bachelorarbeit mit dem Titel 'Eisenhüttenschlacken: Stoffliche Verwertung in der Zementindustrie' programmiert worden. Mithilfe des Tools wird zuerst ein Primärstoff definiert und dessen chemische Zusammensetzung eingetragen. Danach können Ergänzungsstoffe nach dem gleichen Prinzip hinzugefügt werden. Der Mischungsrechner zeigt nach erfolgter Kalkulation die einzuwiegenden Massen an Primärstoff und Ergänzungsstoff als Output an. Das Tool von Eisner kommt bereits beim US-B-Projekt am Lehrstuhl für Thermoprozesstechnik der Montanuniversität Leoben zum Einsatz.

Mischungen von Primärstoffen und Ergänzungsstoffen

Diese Arbeit bedient sich dieses Mischungsrechners für die Erstellung von geeigneten Mischungen aus Mineralwolle und Calciumträger. Einsatzstoffe sind Steinwolle vom Typ Sonorock 035 und je nach Versuch Eierschalpulver oder Calciumcarbonat. Die Grenzen für das Produktgranulat der mineralischen Phase orientieren sich, gleich wie im US-B-Projekt, an den Vorgaben für Hüttensand. Steinwolle ist calciumärmer als Hüttensand, der Ergänzungsstoff dient deshalb dazu, den Mindestgehalt an CaO für Sekundärzumahlstoffe zu erreichen.

Die Verwendung von Eierschalpulver oder Calciumcarbonat verursacht zusätzliche Kosten. Aus diesem Grund orientiert sich die Mischung der Versuche ID 4 - ID 9 an der unteren Grenze an CaO. Diese liegt laut Tabelle 3.5 bei 32 %. Für Versuch ID 10 wird eine Mischung mit höherem CaO-Gehalt von 38 % erstellt. Tabelle 3.6 zeigt die Zielzusammensetzung der Versuche anhand deren Oxid-Anteilen und Basizitäten.

Tabelle 3.6.: Oxidgehalte und Basizitäten für Produktgranulat mit den Maximum- und Minimumgrenzen für Sekundärzumahlstoffe in der Bindemittelindustrie [56]

Parameter	Anteile				
	Minimum	Maximum	ID4 - ID6	ID7 - ID9	ID10
[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Anteil Steinwolle	0.01	1.00	0.79	0.76	0.67
Anteil Calciumquelle	0.00	1.00	0.21	0.24	0.33
Anteil SiO	0.31	0.39	0.38	0.38	0.35
Anteil Al ₂ O ₃	0.07	0.18	0.14	0.15	0.13
Anteil MgO	0.02	0.17	0.11	0.10	0.09
Anteil CaO	0.32	0.46	0.33	0.33	0.38
CaO/SiO ₂	0.87	1.35	0.87	0.87	1.08
CaO+MgO+SiO ₂	0.66	1.00	0.82	0.81	0.82
(CaO+MgO)/SiO ₂	1.03	1.57	1.16	1.13	1.33
(CaO+MgO)/(Al ₂ O ₃ +SiO ₂)	0.60	1.20	0.85	0.81	0.97
F-Wert nach Keil	1.23	1.95	1.37	1.37	1.58

Bei den Versuchen ID 1 - ID 3 wurde auf das Hinzufügen eines Calciumträgers verzichtet, da diese zum Testen der Versuchsanlage verwendet wurden. Das Ziel war somit nicht das Erreichen einer chemischen Zusammensetzung des Produktgranulats, die der von Hütten sand gleicht. Das Produktgranulat dieser Versuche wird in Folge auch nicht auf dessen chemische Zusammensetzung analysiert.

Reduktionsmittelzugabe

Steinwolle beinhaltet Metalloxide, welche im Schmelzprozess durch die Zugabe des Reduktionsmittels C-Pulver ausreduziert werden und eine separate Metallphase bilden. Dazu erfolgt ausgehend von den Oxiden FeO, MnO und TiO₂ die stöchiometrische Berechnung der benötigten Masse an Reduktionsmittel.

3.4. Thermische Behandlung und Abkühlung

Das Schmelzen der Steinwolle Mischung im Elevatorofen und die darauffolgende Abkühlung mittels Nassgranulationsanlage stellen die zentralen Verfahrensschritte für die Herstellung von Granulat aus Steinwolle dar. In diesem Kapitel wird der Versuchsaufbau sowie die Versuchsdurchführung beschrieben.

Versuchsaufbau

Die Hauptaggregate für die Versuchsdurchführung sind das Schmelzaggregat und die Nassgranulationsanlage. Folgend wird der Versuchsaufbau beider Elemente ausgeführt.

Schmelzaggregat - Elevatorofen ELHT 16/18

Für die thermische Behandlung kommt ein Elevatorofen der Firma Thermconcept zum Einsatz. Die technischen Spezifikationen sind in Tabelle 3.7 zu finden.

Tabelle 3.7.: Technische Spezifikationen des Elevatorofens [57]

Bezeichnung	ELHT 16/18
Temp. Max.	1800 °C
Innenabmessung	B 250 x T 250 x H 250 mm
Volumen	15.6 l
Außenabmesser	B 620 x T 770 x H 1900 mm
Leistung	7.2 kW

Die Bedienung des Elevatorofens in Betrieb erfolgt ausschließlich mit geeigneter persönlicher Schutzausrüstung (PSA). Die Probe ist auf dem elektro-mechanisch angetriebenen Ofentisch platziert. Der Ofentischaufbau ist in Abbildung 3.6 zu sehen.

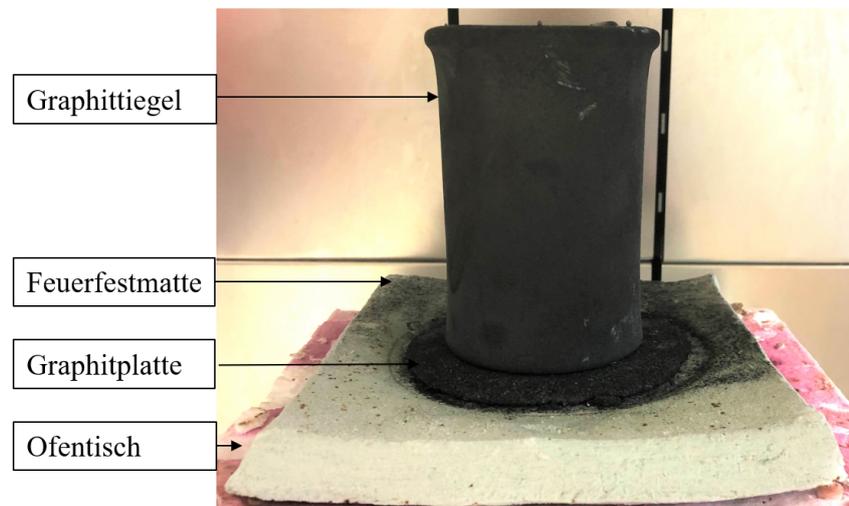


Abbildung 3.6.: Ofentischaufbau für die thermische Behandlung im Elevatorofen ELHT 16/18

Um ein Ankleben des Tiegels am Ofentisch zu verhindern, wird dieser nicht direkt auf dem Ofentisch, sondern auf einer Platte aus Graphit positioniert. Zusätzlich kommt unter die Graphitplatte noch eine Feuerfestmatte zum Schutz des Feuerfestmaterials vor dem Graphitabbrand. Die Ofenkammer wird zum Tiegelschutz mit Argon gespült.

Abkühlung - Nassgranulationsanlage

Die Nassgranulationsanlage wurde 2019 von Hafner im Rahmen seiner Masterarbeit mit dem Titel 'Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Nassgranulationsanlage im Technikummaßstab' konstruiert. Hafner verwendete bei seiner Arbeit die Nassgranulationsanlage in Kombination mit einem Induktionstiegelofen, aus welchem direkt in die Anlage abgestochen wurde. Der Abguss wurde von ihm nicht manuell mit einer Tiegelzange ausgeführt. Die einzelnen Bauteile der Anlage sind in der Masterarbeit dokumentiert, es wird daher auf sie in Folge hier nicht im Detail eingegangen. [58] Abbildung 3.7 zeigt eine gesamtheitliche Darstellung des Aufbaus inklusive Pumpe.

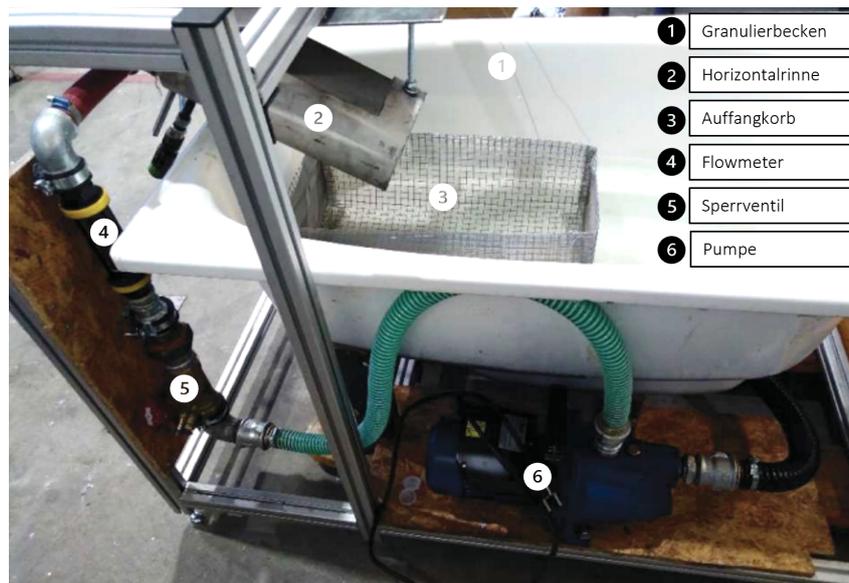


Abbildung 3.7.: Versuchsaufbau der Nassgranulationsanlage nach Hafner [58]

Von dem Versuchsaufbau aus Abbildung 3.7 ausgehend wurden im Rahmen dieser Arbeit Adaptierungen und Optimierungen durchgeführt. Grund für diese waren die Verwendung eines anderen Ofentyps und die damit einhergehende Veränderung der Abgussmethode. In Folge wird zwischen drei Versuchsaufbauten unterschieden, welche mit A bis C charakterisiert werden und in Tabelle 3.8 zusammengefasst sind.

Tabelle 3.8.: Versuchsaufbauten der Nassgranulationsanlage

Bezeichnung	Versuch	Charakterisierungsmerkmal
Versuchsaufbau A	ID 1	mit Vertikalrinne
Versuchsaufbau B	ID 2 - ID 6	mit Vertikalrinne und Horizontalrinne
Versuchsaufbau C	ID 7 - ID 10	mit Horizontalrinne

Abbildung 3.8 zeigt den modifizierten Versuchsaufbau A der Nassgranulationsanlage für die Versuche im Rahmen dieser Arbeit.

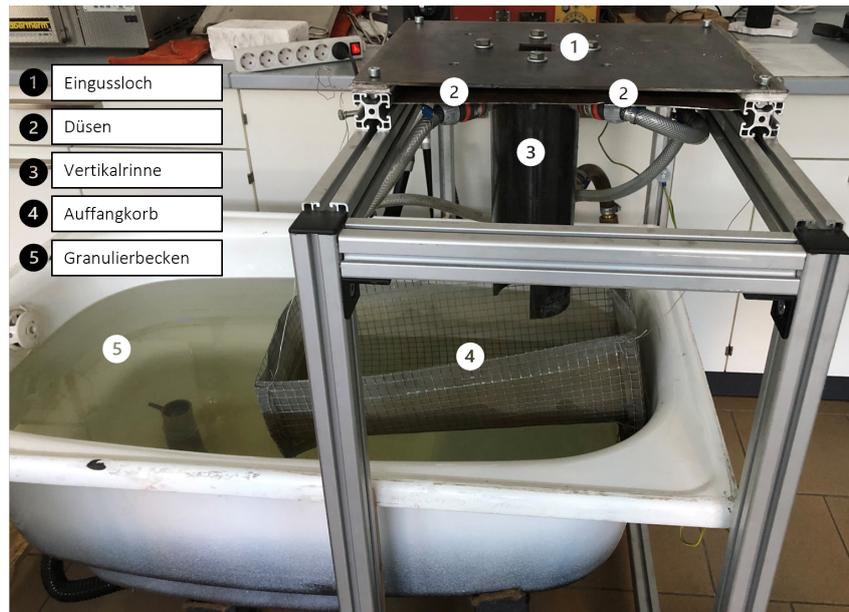


Abbildung 3.8.: Versuchsaufbau A mit Vertikalrinne

Ausgehend von Versuchsaufbau A wurde die Anlage zum Vermeiden einer Haufenbildung direkt unter dem Vertikalrohr adaptiert. Der daraus entstandene Versuchsaufbau B besteht aus einer Vertikal- und einer Horizontalrinne. Auch kam es bei den Versuchsdurchführungen zu Anpackungen in der Vertikalrinne, welche aufgrund dessen dann bei Versuchsaufbau C entfernt wurde. Versuchsaufbau B und C sind in Abbildung 3.9 aufgezeigt.



(a)



(b)

Abbildung 3.9.: (a) Versuchsaufbau B mit Vertikal- und Horizontalrinne (b) Versuchsaufbau C mit Horizontalrinne

Es wird im Rahmen der Nassgranulationsversuche zwischen externem und internem Wasserkreislauf unterschieden. Der interne Kreislauf bezieht sich auf die von der Pumpe im Kreislauf geförderte Wassermenge. Die Wassermenge wurde im Laufe der Versuche gesteigert und dokumentiert, siehe Tabelle 3.10. Der Grund für die Steigerung der Wasserzufuhr ist die Vermutung, dass die Schmelze im Granuliertvorgang nicht ausreichend gekühlt wird. Laut Literatur [10, 58, 59] beträgt das optimale Verhältnis von Wasser zu Schlacke bei einer modernen Nassgranulationsanlage, die dem Stand der Technik entspricht, 10 L Wasser pro kg Schlacke. Dieses Verhältnis ist für die glasige Erstarrung der Schlacke ausschlaggebend. Je höher die Abkühlrate, desto höher ist der Anteil an glasig erstarrter Schlacke. Beim Auftreffen in das Kühlbecken erstarrt bei allen Nassgranulationsversuchen ein Teil der Schmelze schaumförmig weiß. Eine Darstellung davon findet sich in Kapitel 4.5. Da zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführungen keine Analyseergebnisse zum Glasgehalt des Produktgranulats vorliegen, wird davon ausgegangen, dass die schaumig erstarrte Schlacke keinen oder nur geringen Glasgehalt aufweist. Dies wurde jedoch anhand der mineralogischen Analyse, siehe Kapitel 4.3, widerlegt.

Versuchsdurchführung

Die Durchführung der thermischen Behandlung und anschließenden Nassgranulation wird folgend ausgeführt und soll zur Reproduzierbarkeit für Folgeversuche dienen. Eine detaillierte Versuchsbeschreibung liegt dem Anhang A.1 bei. Allgemein wurde für alle Versuche eine Ofentemperatur von 1600 °C mit einer schnellstmöglichen Aufheizrate und Haltezeit von 1.5 Stunden gewählt. Die Temperatúrauswahl erfolgte unter Berücksichtigung der zu erwartenden Schmelzpunkte, um ausreichend Reaktionszeit zu gewährleisten. Für die thermische Behandlung ergeben sich folgende Durchführungsschritte:

- Einwiegen der Mineralwolle und der Ergänzungsstoffe in Graphittiegel
- Vorbereiten der Ofentischunterlage, Tiegelplatzierung und Elevatorofenstart
- Aufdrehen der Argonspülung bei einer Ofentemperatur von 300 °C
- Bereitstellung der Betriebsmittel der Nassgranulationsanlage
- Positionierung und Fokussierung des Messequipments (IR- und Videokamera)

Die eingewogenen Massen an Einsatzstoffen sind in Tabelle 3.9 für alle durchgeführten Versuche zu finden.

Tabelle 3.9.: Massenangaben der Einsatzstoffe für Erstellung der Mischungen

Versuch	Primärmaterial	Masse	Calciumträger	Masse	Masse Reduktionsmittel	Masse gesamt
[-]	[-]	[g]	[-]	[g]	[g]	[g]
ID 1	SW-CEM-B	642.70	-	-	-	642.70
ID 2	SW-CEM-B	671.30	-	-	-	671.30
ID 3	SW-CEM-B	582.00	-	-	-	582.00
ID 4	Sonorock 035	377.41	Eierschalenspulver	109.89	-	487.30
ID 5	Sonorock 035	418.54	Eierschalenspulver	121.86	-	540.40
ID 6	Sonorock 035	398.25	Eierschalenspulver	115.95	-	514.20
ID 7	Sonorock 035	409.94	Eierschalenspulver	133.67	5.29	548.90
ID 8	Sonorock 035	389.93	Eierschalenspulver	127.14	5.03	522.10
ID 9	Sonorock 035	875.52	Eierschalenspulver	285.48	11.29	1172.30
ID 10	Sonorock 035	577.26	Calciumcarbonat	285.02	7.23	869.50

Nach dem Ende der Haltezeit vom Elevatorofen auf 1600 °C erfolgt der Abguss der Schmelze nach folgenden Schritten:

- Start der Nassgranulationsanlage (Pumpe)
- Start der Messaufzeichnung (IR- und Videokamera)
- Einschalten der externen Wasserquelle (optional)
- Entnahme des Graphittiegels und Abguss der Schmelze
- Ausschalten der Nassgranulationsanlage (Pumpe), der Messaufzeichnung (IR- und Videokamera) und der externen Wasserquelle (optional)
- Entnahme des Produktgranulats, siehe Abbildung 3.10

Abbildung 3.10 zeigt das Produktgranulat. Die weiß gefärbten Körner sind schaumig erstarrt.



Abbildung 3.10.: Abgekühltes Produktgranulat im Auffangkorb der Nassgranulationsanlage

In Tabelle 3.10 ist eine Gesamtübersicht der Versuchsparameter für die thermische Behandlung und die Abkühlung zu finden.

Tabelle 3.10.: Übersicht der Versuchsparameter für thermische Behandlung und Abkühlung

Versuch	Temp	Tiegel	Volumenstrom Argon	Versuchs- aufbau	Wassermenge	
[-]	[°C]	[-]	[L/min]	[-]	intern [L/min]	extern [L/min]
ID 1	1600	1.1	2	A	30	-
ID 2	1600	2.1	2	B	30	-
ID 3	1600	1.2	2	B	30	30
ID 4	1600	2.2	2	B	30	-
ID 5	1600	3.1	2	B	30	30
ID 6	1600	3.2	2	B	30	30
ID 7	1600	4.1	2	C	80	30
ID 8	1600	4.2	2	C	80	30
ID 9	1600	5.1	2	C	80	30
ID 10	1600	5.2	2	C	80	30

Des Weiteren ist der Tabelle 3.11 eine detaillierte Beschreibung der Nassgranulationsparameter zu entnehmen.

Tabelle 3.11.: Versuchsaufbaubeschreibung der Nassgranulationsanlage

Versuch	Versuchsaufbau	Setup der Nassgranulationsanlage
[-]	[-]	[-]
ID 1	A	4 Sprühdüsen konzentrisch angeordnet direkt unterhalb des Eingusslochs
ID 2	B	3 Sprühdüsen konzentrisch angeordnet direkt unterhalb des Eingusslochs, 3 senkrecht eingebaute Einsprühvorrichtungen entlang des Vertikalrohrs
ID 3	B	3 Sprühdüsen konzentrisch angeordnet direkt unterhalb des Eingusslochs, 4 Kupferrohre mit gequetschten Enden unterhalb der Sprühdüsen
ID 4	B	3 Sprühdüsen konzentrisch angeordnet direkt unterhalb des Eingusslochs, 4 Kupferrohre mit gequetschten Enden unterhalb der Sprühdüsen, Gartenschlauchdüse waagrecht bei Wannende
ID 5	B	3 Sprühdüsen konzentrisch angeordnet direkt unterhalb des Eingusslochs, 4 Kupferrohre mit gequetschten Enden unterhalb der Sprühdüsen
ID 6	B	Gartenschlauchdüse waagrecht bei Wannende
ID 7	C	gequetschter Schlauch waagrecht bei Wannende, ohne Flowmeter, Düsen oder Sperrventil
ID 8	C	gequetschter Schlauch waagrecht bei Wannende, ohne Flowmeter, Düsen oder Sperrventil
ID 9	C	gequetschter Schlauch waagrecht bei Wannende, ohne Flowmeter, Düsen oder Sperrventil
ID 10	C	gequetschter Schlauch waagrecht bei Wannende, ohne Flowmeter, Düsen oder Sperrventil

3.5. Aufbereitung Produktgranulat

Eine Analyse der chemischen Zusammensetzung und der Bindemittleignung soll Aufschluss über die Eignung des Produkts als Sekundärzumahlstoff geben. Folgend werden die Schritte beschrieben, die als Vorbereitung für die Analyse dienen. Ein Ablauf der durchzuführenden Aufbereitungsschritte ist in Abbildung 3.11 dargestellt.

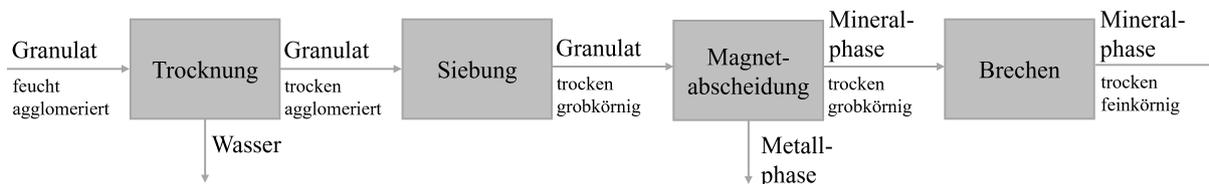


Abbildung 3.11.: Ablauf der Aufbereitung des Produktgranulats zur Analyse

Nach erfolgreicher Aufbereitung erfolgt die Übergabe des Produktgranulats an das AnalySELabor zur Durchführung einer RFA und einer ersten bautechnologischen Analyse.

3.6. Analyse Produktgranulat

In diesem Kapitel erfolgt eine kurze Beschreibung der bautechnologischen Analyseverfahren zur Bestimmung des Aktivitätsindex (AI) und der R^3 -Reaktivität.

Aktivitätsindex

Der Aktivitätsindex beschreibt die Druckfestigkeit eines Gemischs aus Prüfzement und aufbereitetem hydraulisch wirksamen Zusatzstoff für die Betonherstellung (AHWZ) im Verhältnis zur Druckfestigkeit des reinen Prüfzements. Der AHWZ in diesem Fall ist das aufbereitete Produktgranulat aus Steinwolle mit Ergänzungsstoffen. Das Verhältnis von Wasser zu Bindemittel (W/B) gemäß ÖN B 3309 liegt für diese Prüfung bei 25/75. Die Druckfestigkeit des hergestellten Presslings wird nach 28 Tagen geprüft. Der AI muss nach 28 Tagen mindestens 90 % betragen. Liegt der AI über 87 %, kann der AI nach 90 Tagen noch einmal geprüft werden und muss mindestens 95 % betragen. [60, 61]

R^3 - Reaktivität

Das angewandte Verfahren ist relativ neuwertig und testet die Eignung des Granulats isoliert von den Eigenschaften von Prüfzement. Bei diesem Versuch wird die Matrix entfernt und rein der AHWZ unter Zugabe von aktivierenden Reagenzien überprüft. Dieses Verfahren basiert auf der Reaktion des Granulats mit Portlandit in einer verdünnten KOH- K_2SO_4 -Lösung. Die Reaktivität des Probenmaterials wird über die während der Reaktion freigesetzten Wärme und dem in den Reaktionsprodukten gebundenen Wasser in einem Kalorimeter gemessen. [60, 62]

4. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel erfolgt die Zusammenfassung der Ergebnisse. Die Methoden der Volumenreduktion sind im direkten Vergleich zueinander dargestellt. Danach werden die unterschiedlichen Versuchsparameter der thermischen Behandlung und Abkühlung in Bezug auf deren Einfluss auf das Produktgranulat diskutiert. Weiters findet sich eine Darstellung der Analyseergebnisse zu den Oxidgehalten des Produktgranulats und den bautechnologischen Untersuchungen.

4.1. Volumenreduktion

Die Ergebnisse der in Kapitel 3.2 beschriebenen Vorversuche mit Glaswolle der Firma Isover vom Typ 7916400 sind hier dargestellt. Es wird der Volumenreduktionsfaktor eingeführt, welcher das Verhältnis von Mineralwolvolumen am Anfang des jeweiligen Versuchs zum Volumen am Ende des Versuchs beschreibt. Dieser Wert findet sich gemeinsam mit den Versuchsparametern in Tabelle 4.1

Tabelle 4.1.: Ergebnisse der Vorversuche zur Volumenreduktion

Versuch	Methode	Volumen am Anfang	Volumen am Ende	Volumen- reduktionsfaktor
[-]	[-]	[cm ³]	[cm ³]	[-]
ID a	Laborgasbrenner	11500	5540	2.1
ID b	Aufschweißbrenner	9280	1420	6.5
ID c	Mixen und Trocknen	3700	1100	3.4
ID d	Brikettierung	6860	94	72

Folgende Beobachtungen sind für die einzelnen Versuchsmethoden zu nennen:

ad ID a)

An der Oberfläche ist die Ausbildung einer verhärteten, hitzeresistenten Schicht zu beobachten. Durch das Anschmelzen der Mineralwolle bildet sich diese und verlangsamt den weiteren Abbrennprozess. Die geringe Rate lässt sich durch die kleine Flamme und niedrige Flammtemperatur erklären. Der Volumenreduktionsfaktor liegt bei 2.1.

ad ID b)

Die Flammtemperatur des Aufschweißbrenners ist höher als die des Laborgasbrenners. Zusätzlich produziert der Aufschweißbrenner eine großflächigere Flamme, die eine größere Oberfläche der Mineralwolleprobe gleichzeitig niederbrennt. Der Volumenreduktionsfaktor liegt für ID b bei 6.5.

ad ID c)

Das Volumen der unkomprimierten Mineralwolle beträgt 3700 cm^3 . Im Vergleich dazu nimmt das gefilterte, getrocknete Material 1100 cm^3 ein. Das Volumen wird folglich um den Volumenreduktionsfaktor 3.7 verkleinert.

ad ID d)

Die erzielte Verdichtung des Materials durch Brikettierung ist im Vergleich zu den vorhergehenden Versuchen effizienter und signifikant höher. Der Volumenreduktionsfaktor liegt für ID d bei 72 und übersteigt somit die restlichen Versuche mit einem Faktor größer 10. Aus diesem Grund erfolgt die Aufbereitung der Steinwolle für die thermische Behandlung mittels Brikettierung und stellt auch für die Zukunft eine mögliche Aufbereitung der Mineralwolleabfälle zum weiteren Recycling dar.

4.2. Temperaturerfassung mittels Infrarotkamera

Die Auswertung der Daten der Infrarotkamera gibt Aufschluss über die Temperatur der Schmelze während des Abgusses. Die Ergebnisse der Auswertung der Infrarotkamera-Daten sind in Tabelle 4.2 zu finden.

Tabelle 4.2.: Ergebnisse der Abgussdauer und Temperaturbestimmung anhand Infrarotkamera-Daten

Versuch	Versuchsaufbau	Masse	Abgussdauer	Abgussdauer korr.	Temp. Max.
[-]	[-]	[g]	[s]	[s]	[°C]
ID 1	A	642.70	22	-	1193
ID 2	B	671.30	28	-	1134
ID 3	B	582.00	16	-	1212
ID 4	B	487.30	13	-	1235
ID 5	B	540.40	12	-	1220
ID 6	B	514.20	15	-	1277
ID 7	C	548.90	8	14	960
ID 8	C	522.10	12	36	911
ID 9	C	1172.30	14	56	738
ID 10	C	869.50	36	37	941

Mithilfe der Infrarotkamera-Daten kann auch die Abgussdauer ermittelt werden. Aus dem aufgezeichneten Infrarotvideo wird ein Bildausschnitt gewählt, in dem der Abgussstrang bestmöglich aufgezeichnet wird. Die in der Tabelle 4.2 dargestellte Maximaltemperatur beschreibt die Maximaltemperatur in diesem gewählten Bildausschnitt gemittelt über die Dauer des Versuchs. Die Abgussdauer ergibt sich aus der Interpretation des Temperaturverlaufs in diesem Bildausschnitt.

Der gewählte Versuchsaufbau hat einen großen Einfluss auf die Ermittlung der Abgussdauer und der Maximaltemperatur des Bildausschnitts. Bei Versuchsaufbau A und B erfolgt der Abguss in die Vertikalrinne. Die Schmelze wird in einem klar definierten Bereich, nämlich dem Eingussloch, abgossen. Der Fokus der Infrarotkamera kann vor Versuchsablauf genau auf diesen Bereich gelegt werden. Daraus folgt eine verlässliche Aufzeichnung der Temperatur über den Abgussvorgang, die Abgussdauer kann genau bestimmt werden. Der Abguss der Schmelze bei Versuchsaufbau C erfolgt direkt in die Horizontalrinne. Der Bereich, in dem die Schmelze auftritt, ist dadurch nicht genau definiert und liegt in einem größeren Schwankungsbereich. Das Fokussieren der Infrarotkamera und das Definieren des Bildausschnitts für die Auswertung ist in Folge fehlerbehafteter. Beim Auftragen der Temperatur über die Zeit der Infrarotkamera-Daten wird dies klar ersichtlich. Abbildung 4.1 zeigt repräsentativ den Verlauf von ID 6 für den Versuchsaufbau mit Vertikalrinne und von ID 9 für den Versuchsaufbau ohne Vertikalrinne.

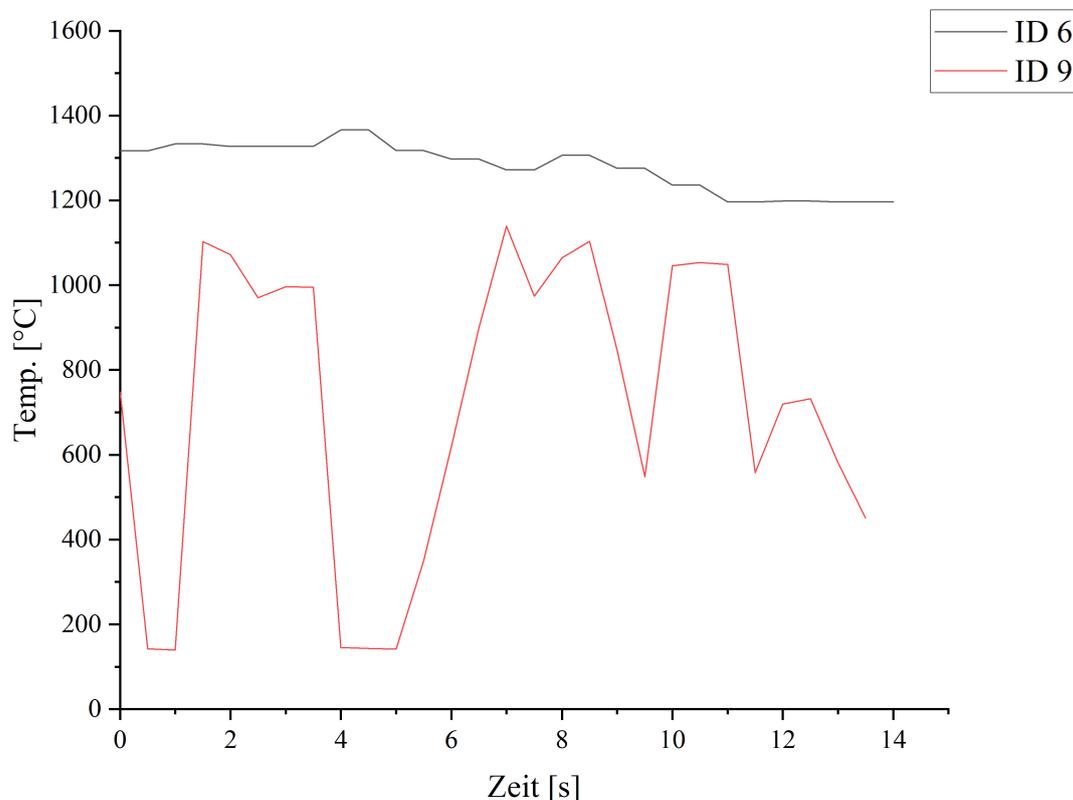


Abbildung 4.1.: Verlauf der maximalen Durchschnittstemperatur laut Infrarotkamera-Daten für ID 6 (Versuchsaufbau B) und ID 9 (Versuchsaufbau C)

Die große Schwankungsbreite bei Versuchsaufbau C führt dazu, dass die Abgussdauer laut Infrarotkamera-Daten nicht repräsentativ ist. Aus diesem Grund findet sich in Tabelle 4.2 für diese Versuche eine korrigierte Abgussdauer, welche aus den Aufzeichnungen der Versuche mit einer Videokamera abgeleitet wird. Für den Versuch ID 9 ergibt sich somit eine Abgussdauer von 56 anstatt 14 s. Für weitere Berechnungen wird für ID 7 - ID 10 die korrigierte Abgussdauer herangezogen.

4.3. Verhältnis Wasser zu Schlacke

Das Verhältnis von Wasser zu Schlacke beim Abguss in die Nassgranulationsanlage ist für die glasige Erstarrung der Schlacke ausschlaggebend. In Tabelle 4.3 ist dieses Verhältnis dargestellt. Die Wassermenge setzt sich aus der internen und externen Wasserquelle laut Tabelle 3.10 zusammen. Als Abgussdauer wurden die Werte aus Kapitel 4.2 herangezogen.

Tabelle 4.3.: Ergebnisse des Verhältnisses Wasser/Schlacke bei den Nassgranulationsversuchen

Versuch	Masse	Abgussdauer	Schlacken- massenstrom	Wasser- menge	Verhältnis Wasser/Schlacke
[-]	[g]	[s]	[kg/min]	[L/min]	[L/kg]
ID 1	642.70	22	1.75	30	17
ID 2	671.30	28	1.44	30	21
ID 3	582.00	16	2.18	60	27
ID 4	487.30	13	2.25	30	13
ID 5	540.40	12	2.70	60	22
ID 6	514.20	15	2.06	60	30
ID 7	548.90	14	2.35	120	51
ID 8	522.10	36	0.87	120	138
ID 9	1172.30	56	1.26	120	96
ID 10	869.50	37	1.41	120	85

Aus Tabelle 4.3 geht hervor, dass das Verhältnis von Wasser zu Schlacke deutlich über dem empfohlenen Wert nach Stand der Technik liegt. [58]

4.4. Optische Bewertung Produktgranulat

In diesem Unterkapitel wird auf die optische Bewertung des Produktgranulats eingegangen. Abbildung 4.2 (a) - (c) zeigt das Produktgranulat verschiedener Versuche, anhand derer in Folge mögliche Ursachen für die optischen Abweichungen diskutiert werden. Zum Vergleich ist in Abbildung 4.2 (d) herkömmlicher Hüttensand aus der Masterarbeit von Hafner [58] dargestellt.

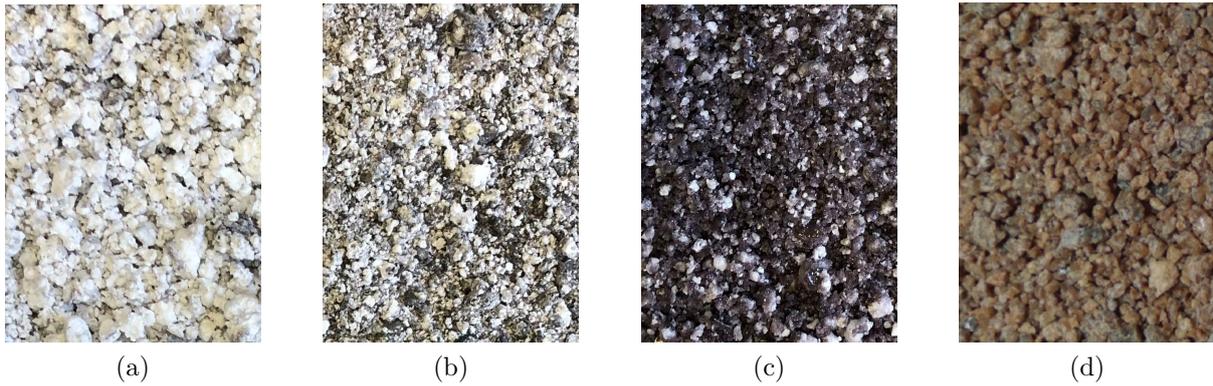


Abbildung 4.2.: (a) Schaumig erstarres Produktgranulat von ID 7 (b) Mischung aus schaumig und optisch glasig erstarrem Produktgranulat von ID 9 (c) optisch glasig erstarres Produktgranulat von ID 8 (d) herkömmlicher Hüt tensand von Hafner [58]

Die wahrscheinlich wichtigsten Einflussgrößen auf die Optik des Produktgranulats sind das Verhältnis von Wasser zu Schlacke und die Einsatzstoffe selbst. Aus Tabelle 4.3 ist zu entnehmen, dass bei Versuch ID 9 im Vergleich zu ID 7 das Verhältnis von Wasser zu Schlacke mehr als doppelt so hoch eingestellt wurde. Das Verhältnis bei ID 8 liegt zwischen den beiden. Daraus kann abgeleitet werden, dass bei einer geringeren Abkühlrate eher schaumiges Erstarren eintritt. Ist diese hoch, wird eine optisch glasige Erstarrung des Produktgranulats herbeigeführt. Das schaumige Erstarren ist primär jedoch vermutlich durch stoffspezifische Eigenschaften des Primärmaterials Steinwolle bedingt. Wie in Kapitel 4.6 noch ausgeführt wird, kann durch die optische Charakterisierung keine Aussage über den Glasgehalt des Produktgranulats getroffen werden.

4.5. Oxidgehalt Produktgranulat

Die chemische Zusammensetzung des Produktgranulats anhand RFA ist in Tabelle 4.4 für die Versuche ID 4- ID 6 und ID 7 ersichtlich. Zum Vergleich sind in der Tabelle auch die Oxidgehalte laut Mischungsrechner beigefügt. Das Produktgranulat aus Versuch ID 4- ID 6 ist im Zuge der Aufbereitung vereinigt worden, um eine möglichst große Menge an Probenmaterial zu generieren. Für diese Versuche wurde die gleiche Mischung verwendet. Aus diesem Grund sind die Versuche ID 4- ID 6 als ein Produkt zusammengefasst. Die chemische Zusammensetzung des Produktgranulats anhand RFA ist für die Versuche ID 9 und ID 10 in Tabelle 4.5 dargestellt. Zum Vergleich sind auch hier in der Tabelle die Oxidanteile laut Mischungsrechner beigefügt.

Tabelle 4.4.: Ergebnisse der Oxidgehalte vom Produktgranulat der Versuche ID 4-ID 6 und ID 7 laut MR und RFA

Parameter	ID 4 - ID 6		ID 7	
	MR	RFA	MR	RFA
[-]	[w - %]	[w - %]	[w - %]	[w - %]
SiO ₂	38.07	39.15	38.02	37.76
TiO ₂	-	0.98	-	0.74
Al ₂ O ₃	13.61	18.17	14.50	17.61
Fe ₂ O ₃	-	0.58	-	0.09
FeO	-	-	-	-
MnO	-	0.40	-	0.30
MgO	11.00	8.97	9.70	8.94
CaO	33.12	28.45	33.08	31.93
K ₂ O	-	0.80	-	0.48
Na ₂ O	-	1.23	-	0.90
P ₂ O ₅	-	0.03	-	0.01
SO ₃	-	-	-	-
S	-	0.12	-	0.08
LOI corr	-	0.34	-	0.32
Summe	-	99.21	-	99.18

Tabelle 4.5.: Ergebnisse der Oxidgehalte vom Produktgranulat der Versuche ID 8-ID 10 laut MR und RFA

Parameter	ID 8		ID 9		ID 10	
	MR	RFA	MF	RFA	MR	RFA
[-]	[w - %]					
SiO ₂	38.02	38.08	38.02	37.69	35.23	36.74
TiO ₂	-	0.75	-	0.94	-	1.29
Al ₂ O ₃	14.50	19.39	14.50	20.05	13.44	17.25
Fe ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-
FeO	-	0.15	-	0.13	-	0.36
MnO	-	0.29	-	0.35	-	0.37
MgO	9.70	8.69	9.70	8.31	8.99	8.05
CaO	33.08	30.63	33.08	30.09	38.00	34.22
K ₂ O	-	0.45	-	0.70	-	0.43
Na ₂ O	-	0.67	-	1.00	-	0.72
P ₂ O ₅	-	<0.10	-	<0.10	-	<0.10
SO ₃	-	-	-	-	-	-
S	-	<0.10	-	<0.1	-	<0.10
LOI corr	-	0.46	-	0.30	-	0.15
Summe	-	99.67	-	99.65	-	99.69

Die Abweichung zwischen der theoretischen Zusammensetzung laut Mischungsrechner und der chemischen Zusammensetzung laut RFA ist in Tabelle 4.6 dargestellt. Eine positive Zahl bedeutet, dass der jeweilige Oxidgehalt laut RFA höher ist als im Mischungsrechner berechnet wurde.

Tabelle 4.6.: Differenz zwischen Oxidgehalten vom Produktgranulat laut MR und RFA

Versuch	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	CaO
[-]	[w-%]	[w-%]	[w-%]	[w-%]
ID 4 - 6	1.07	4.56	-2.03	-4.67
ID 7	-0.26	3.11	-0.76	-1.14
ID 8	0.06	4.88	-1.02	-2.45
ID 9	-0.32	5.55	-1.39	-2.99
ID 10	1.51	3.81	-0.94	-3.78

Eine graphische Darstellung der Abweichungen aus Tabelle 4.6 findet sich in Abbildung 4.3.

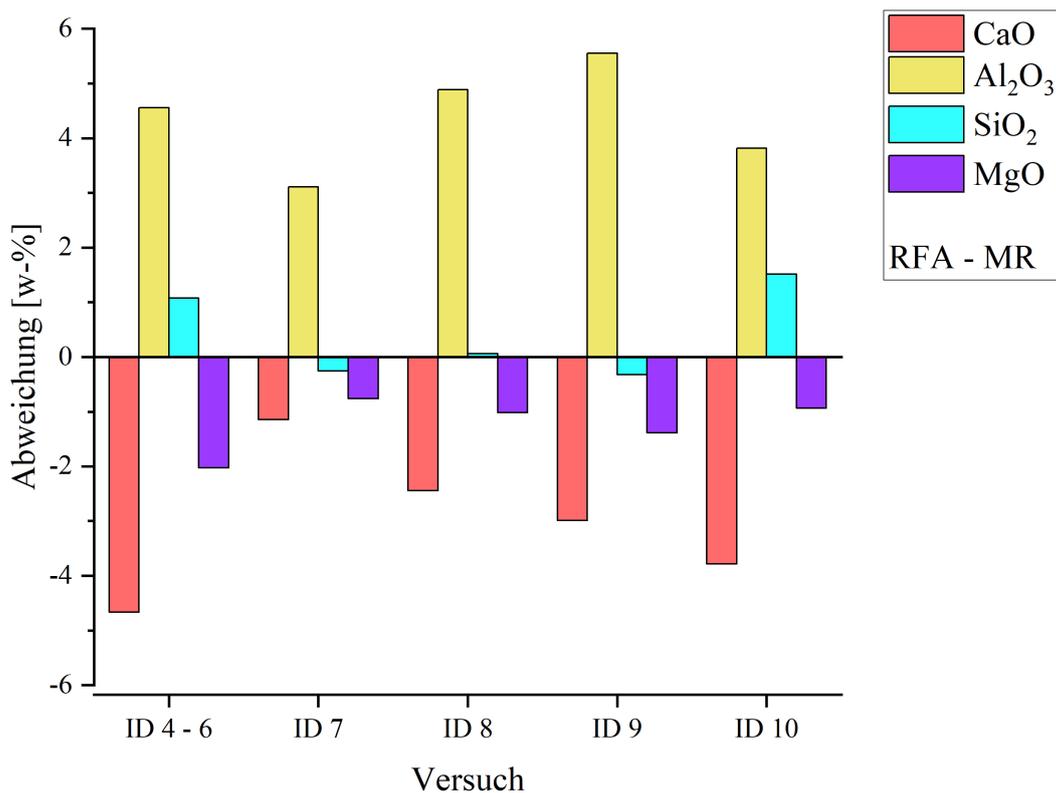


Abbildung 4.3.: Differenz zwischen Oxidgehalt vom Produktgranulat laut MR und RFA

Die Ergebnisse der chemischen Analyse mittels RFA unterscheiden sich teilweise von den eingestellten chemischen Zusammensetzungen des Mischungsrechners. Zu beachten ist, dass vor der RFA die Metallphase im Granulat im Rahmen der Produktaufbereitung entfernt wurde.

Laut Tabelle 3.1 hat das Primärmaterial Steinwolle der Firma Rockwool einen Fe_2O_3 -Anteil von knapp 9.0 %. Das Massenverhältnis von Steinwolle und Ergänzungsstoff liegt bei den Versuchen bei 2-3 zu 1, in der Mischung sind demnach ca. 3.0-4.5 % Eisenoxid enthalten. Diese sind bei der RFA nicht mehr im Granulat enthalten. Diese 3.0-4.5 % teilen sich somit anteilmäßig auf die verbleibenden Oxide auf.

Der Gehalt laut RFA an SiO_2 ist bei den Versuchen ID 7- ID 9, wie in Tabelle 4.6 zu sehen, weitgehend ident mit dem laut Mischungsrechner. Ähnlich verhält es sich für MgO , auffällig ist eine konstante Abweichung von etwa 1 w-% bei den Versuchen ID 7- ID 10. Der Anteil an Al_2O_3 laut RFA unterscheidet sich stark von dem berechneten Anteil. Die Abweichung schwankt zwischen 3 und 6 w-%, wobei die Anteile laut RFA höher sind als jene des Mischungsrechners. Genau umgekehrt verhält es sich bei dem Anteil an CaO . Hier liegt der Anteil laut RFA unter dem des Mischungsrechners. Die Abweichung liegt für CaO zwischen 1 und 5 w-%. Eine RFA weist häufig Analyseschwankungsbreiten von < 5 % auf.

Ein möglicher Grund für die Abweichungen ist die chemische Zusammensetzung der Einsatzstoffe als Basis für den Mischungsrechner. Die chemische Zusammensetzung der Steinwolle wurde anhand RFA bestimmt. Die Analysemethode ist für die Bestimmung chemischer Zusammensetzungen weitgehend verlässlich. Es wurden jedoch nicht alle Analysen in demselben Analyselabor durchgeführt. Um eine bessere Vergleichbarkeit der Daten zu ermöglichen, sollten sämtliche RFA Untersuchungen im selben Analyselabor durchgeführt werden.

Zusätzlich kann es durch die durchgeführte Brikettierung als Aufbereitungsschritt zu Verunreinigung des Primärmaterials gekommen sein. Die eingesetzte Versuchsanlage von ATM-Recyclingsystems dient zur Brikettierung unterschiedlicher Materialien, unter anderem Metallen. Eine systematische Verunreinigung der Briketts durch Metallreste in der Anlage von vorhergegangenen Versuchen ist nicht auszuschließen, folglich ist eine Gegenüberstellung des Primärmaterials und des brikettierten Materials anzustreben.

Die chemische Zusammensetzung des Ergänzungsstoffes Eierschalenpulver ist ebenso anhand RFA bestimmt, die Ergebnisse der RFA waren zum Zeitpunkt der Zusammenstellung der Mischungen jedoch noch nicht bekannt. In Folge wurde eine Zusammensetzung laut Hersteller für den Mischungsrechner herangezogen. Der Massenanteil an CaO im Eierschalenpulver beträgt laut Hersteller 62.2 %. Die tatsächliche laut RFA nur 50.5 %. Daraus ergibt sich, dass für die Versuche ein höherer Calciumgehalt angenommen wurde als tatsächlich im Eierschalenpulver enthalten ist.

Allgemein kann von einer gewissen Produktqualitätsschwankung ausgegangen werden, welche den niedrigeren Massenanteil von CaO laut RFA im Vergleich zum Mischungsrechner erklärt. Für den Versuch ID 10 wurde Calciumcarbonat anstatt Eierschalpulvers eingesetzt. Der Gehalt an CaO ist laut RFA auch geringer als durch den Mischungsrechner berechnet. Die chemische Zusammensetzung des verwendeten Calciumcarbonats wurde ebenso von den Herstellerdaten abgeleitet, das Rohmaterial Calciumcarbonat wurde nicht zusätzlich im Rahmen dieser Versuchsreihe mit RFA analysiert. Die Abweichung zwischen dem CaO-Anteil laut MR und dem laut RFA kann eventuell auf den gleichen Ursprung zurückgeführt werden, wie bei den Versuchen ID 4 - ID 9. Zur Abklärung müsste eine RFA des Calciumcarbonats durchgeführt werden. Woher die große Abweichung von Al_2O_3 kommt, soll durch die Beprobung des Primärmaterials und des brikettierten Materials erreicht werden.

Das Einwiegen der Einsatzstoffe in das Probengefäß stellt eine weitere Fehlerquelle dar. Durchgeführt wird dieses mit einer Waage der Firma Mettler Toledo, welche in regelmäßigen Abständen nach den gültigen Standards für Prüf- und Kalibrierlabore überprüft wird. Die Probenvorbereitung erfolgt für alle Versuche nach der gleichen Methode, ausgeführt von der gleichen Person. Die eingewogenen Massen wurden fotografisch aufgezeichnet. Die genannten Faktoren lassen vermuten, dass ein Fehler beim Einwiegen nicht Ursache für die festgestellten Abweichungen ist. Jedoch kann es durch das Mischen der Probe und der Befüllung des Graphittiegels zu einer gewissen Entmischung und Abweichung kommen. Dies sollte sich jedoch im Rahmen eines systematischen Fehlers niederschlagen und keinen so großen Einfluss haben.

4.6. Bautechnologische Analysen

In diesem Kapitel finden sich die Ergebnisse der bautechnologischen Analysen in Form der Kenngrößen Aktivitätsindex und R^3 -Reaktivität. Als Referenz gelten die identifizierten Bewertungskriterien für herkömmlichen Hüttensand. Es wurde nur das Produktgranulat aus den Versuchen ID 8 - ID 10 analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4.7 zu finden.

Die Kriterien in Tabelle 4.7 beziehen sich auf die ÖNorm B 3309 sowie eine von Steindl et al. [60] durchgeführte Literaturrecherche. Die analysierten Proben weisen Basizitäten innerhalb der vorgegebenen Grenzen auf. Der Glasgehalt aller Proben, inklusive ID 4 - ID 7, beträgt $> 99\%$ und liegt somit auch innerhalb der erwünschten Spezifikationen von $> 90\%$. Dieses Ergebnis ist kohärent mit den Ergebnissen des Wasser zu Schlacke Verhältnisses aus Kapitel 4.3. Für das glasige Erstarren des Produktgranulats stand entgegen anfänglicher Vermutung somit bei allen Versuchen ausreichend Kühlwasser zu Verfügung.

Das Steigern der Wassermenge im Laufe der Versuchsreihe bewirkte zwar, wie in Kapitel 4.4 beschrieben, eine optische Änderung des Produktgranulats, aber keine Qualitätsänderung in Bezug auf den Glasgehalt.

Der gemessene AI nach 28 Tagen liegt aktuell für ID 10 im vorgegebenen Bereich. ID 8 und ID 9 können potentiell bei einem Überprüfen des AI nach 90 Tagen noch die Mindestdruckfestigkeit erreichen. Es ist allgemein bekannt, dass Hüttensand erst später eine erhöhte Endfestigkeit im Vergleich zu Normzement erreicht. Mit großer Wahrscheinlichkeit verhält es sich für das Produktgranulat aus Steinwolle ähnlich.

Anhand der Ergebnisse der R^3 - Analyse ist sichtbar, dass die Reaktivität des Produktgranulats vergleichbar mit der von Hüttensand ist. ID 8 verfehlt knapp mit 5.98 g/ 100 g Leim die Mindestmenge an gebundenem Wasser. Dies hängt vermutlich mit dem niedrigen CaO-Gehalt zusammen, der etwas unter der Mindestgrenze für Sekundärzumarbstoffe liegt. Der F-Wert nach Keil, eine zementspezifische Kenngröße, ist bei allen Proben < 1.4 und entspricht somit laut Steindl et al. [60] jenem von aktuell eingesetzten Hüttensanden.

Tabelle 4.7.: Ergebnisse der bautechnologischen Analysen des Produktgranulats [60]

Eigenschaft	Kriterium	ID 8	ID 9	ID 10	aktuell erfüllt	Anmerkung
		gemäß ÖN B 3309				
CaO+MgO+SiO ₂	> 67.00 w-%	77.40	76.10	79.01	alle	75 bis > 90, HÜS bei 83.5
(CaO+MgO)/SiO ₂	> 1.00	1.03	1.02	1.15	alle	nicht zu hoch, bis 1.6
Glasgehalt	> 67.00 w-%	> 99.0	> 99.0	> 99.0	alle	> 90 % angestrebt
MgO	< 18.00 w-%	8.69	8.31	8.05	alle	
Aktivitätsindex nach 28 Tagen	0.90 %	0.85	0.88	0.97	ID 10	mögl. hoch, W/B bei 25/75
P ₂ O ₅ gesamt	5.00 w-%	< 0.10	< 0.10	< 0.10	alle	unbedenklich
		gemäß Literaturrecherche				
R ³ gebundenes Wasser	> 6 g / 100 g Leim	5.98	6.06	6.12	ID 9, ID 10	Schätzung auf Basis Hüttensand
R ³ kumulative Wärme	> 250 J/g Schlacke	331.31	336.38	377.92	alle	Schätzung auf Basis Hüttensand
FeO	möglichst niedrig	0.15	0.13	0.36	alle	mögl. niedrig
MnO	möglichst niedrig	0.29	0.35	0.37	alle	
TiO ₂	möglichst niedrig	0.75	0.94	1.29	alle	unbedenklich
F-Wert nach Keil	möglichst hoch	1.41	1.42	1.48	alle	aktuelle HÜS < 1.5
(CaO+MgO)/(Al ₂ O ₃ +SiO ₂)	< 1.2	0.68	0.67	0.78	alle	beeinflusst evtl. amorph. Anteil

5. Zusammenfassung und Ausblick

Der erste Teil der Arbeit beschäftigt sich im Allgemeinen mit Mineralwollen, einer Untergruppe der künstlichen Mineralfasern. Die aktuellen Entwicklungen in Bezug auf deren Entsorgung wird in Folge aufgezeigt. Österreich hat in der DV-Novelle 2021 klar definiert, ab dem Jahr 2027 ein Deponierungsverbot für Mineralwolleabfälle umzusetzen. Voraussetzung dafür ist, dass bis 2024 wirtschaftlich vertretbare Verfahren gefunden werden. Die Industrie hat in Folge bis 2026 Zeit, an innovativen Verwendungs-, Verwertungs- und Recyclingverfahren zu forschen. EU-weit gibt es einige Projekte, welche sich mit dieser Thematik beschäftigen, unter anderen das RecyMin-Projekt an der Montanuniversität Leoben. Ein Arbeitspaket des RecyMin-Projekts beschäftigt sich mit der Verwertung von Mineralwolleabfällen in der Zementindustrie. Für diesen Verwertungsweg spricht die Notwendigkeit der Zementindustrie, Emissionen zu senken. Dazu kommt, dass in den kommenden Jahren die Verfügbarkeit von Hüttensand, dem mengenmäßig größten Sekundärzumahlstoff, aufgrund der Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlindustrie abnehmen wird. Das Hauptziel dieser Arbeit ist deshalb, ein Granulat aus Steinwolle herzustellen, welches potentiell als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie verwertet werden kann. Es gilt, Parameter für eine erfolgreiche thermische Behandlung und Nassgranulation der Steinwolle zu finden. Als Vergleich dient herkömmlicher Hüttensand, welcher ähnliche Eigenschaften aufweist.

Das Komprimieren der voluminösen Steinwolle stellt den ersten Aufbereitungsschritt dar. Hierfür kristallisiert sich die Brikettierung mit einem Volumenreduktionsfaktor von 72, siehe Tabelle 5.1, als die effizienteste Verdichtungsmethode heraus.

Tabelle 5.1.: Zusammenfassung der Ergebnisse im Rahmen der Vorversuche

Versuch	Methode	Volumenreduktionsfaktor
[-]	[-]	[-]
ID a	Laborgasbrenner	2.1
ID b	Aufschweißbrenner	6.5
ID c	Mixen und Trocknen	3.4
ID d	Brikettierung	72

Nach der Volumenreduktion erfolgt für das Erreichen der geforderten chemischen Zusammensetzung das Mischen der brikettierten Steinwolle mit Ergänzungsstoffen. Das Mischungsverhältnis wird unter Verwendung eines Mischungsrechners berechnet und die Mischung erstellt. Die Ergänzungsstoffe Eierschalpulver und Calciumcarbonat dienen bei den Versuchen als Calciumträger. Ausschlaggebend für den Einsatz als Sekundärzumahlstoff ist die Reaktivität und chemische Zusammensetzung des Produktgranulats.

Nach dem Einwiegen kommt es zur thermischen Behandlung und Abkühlung. Die gewählte Ofentemperatur für die thermische Behandlung mit 1600 °C erweist sich als geeignet. Beim Abguss kühlt die Schmelze auf ca. 1300 C° und kann beinahe vollständig abgegossen werden. Bei der Nassgranulation variieren die Parameter Wasserzufuhr und Versuchsaufbau je nach Versuch, sie bewirken jedoch, basierend auf dem Glasgehalt, keine signifikante Veränderung des Produktgranulats. Abbildung 5.1 zeigt den Oxidgehalt der Einsatzstoffe sowie die des Produktgranulats der jeweiligen Versuche im Vergleich zu herkömmlichen Hüttensanden (HÜS).

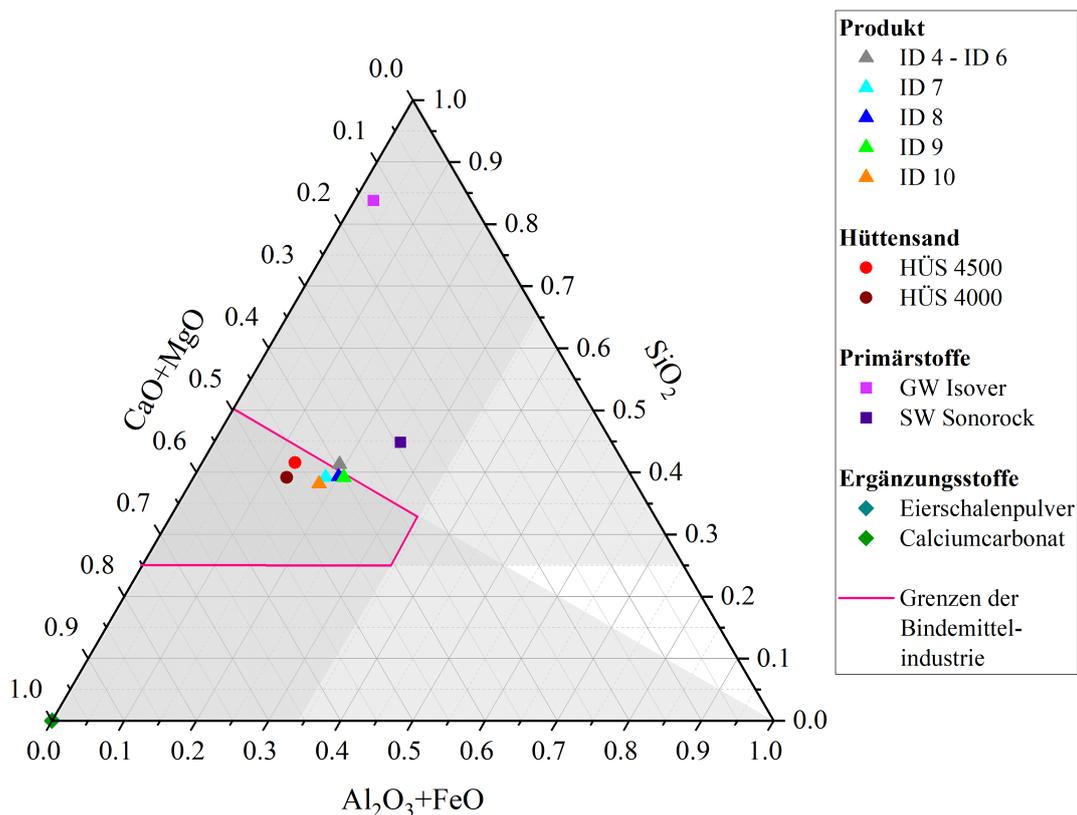


Abbildung 5.1.: Oxidgehalt laut RFA für die Einsatzstoffe und das Produktgranulat der einzelnen Versuche

In der Abbildung 5.1 ist zu sehen, wie unterschiedlich die chemische Zusammensetzung der Primärprodukte Steinwolle und Glaswolle ist. Um Glaswolle in der Bindemittelindustrie einsetzen zu können, wird ein signifikant höherer Anteil an Calciumträger benötigt. Dies bedeutet jedoch auch einen größeren Kostenaufwand.

Aus dem Ternärdiagramm geht ebenso hervor, dass die Oxidgehalte der Produkte in einem kleinen Bereich schwanken, jedoch alle sehr nahe an der unteren Grenze an CaO und MgO angesiedelt sind. Das Hinzufügen eines Calciumträgers wirkt sich negativ auf die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens aus, da dieser aktuell als Primärstoff zugekauft wird. Das Ziel war deshalb das Erstellen einer Mischung, die gerade innerhalb der Spezifikationen für CaO liegt. Daraus resultierend fallen die Versuche ID 4- ID 9 knapp unter die Mindestgehalte an CaO. Das Produktgranulat aus Versuch ID 10 erfüllt als einziges Produktgranulat alle betrachteten Anforderungen für den Einsatz in der Bindemittelindustrie. Als potentielle Alternative zu Primärstoffen als Calciumträger ist hier Flugasche zu nennen.

Die chemische Zusammensetzung laut RFA weicht bei allen Versuchen von jener des Mischungsrechners ab. Vor allem der Gehalt an Al_2O_3 ist bei der RFA signifikant höher. Die Ursache dafür konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht geklärt werden, die aufgezeigten Klärungsmöglichkeiten werden weiter verfolgt.

Eine bautechnologische Analyse des Produktgranulats zeigt ein hüttensandähnliches Verhalten. Der Aktivitätsindex und die Reaktivität des Produktgranulats wurden bestimmt. Laut den Spezifikationen für Hüttensand nach ÖNORM B 339 liegt das Produktgranulat aus Versuch ID 10 vollständig innerhalb der Grenzen. Das Produktgranulat der Versuche ID 8 und ID 9 erfüllt die Spezifikationen in Bezug auf die Basizitäten, der Aktivitätsindex unterschreitet jedoch knapp die Mindestgrenze. Der durch die Nassgranulation erreichte Glasgehalt liegt bei allen durchgeführten Versuchen bei $> 99\%$, erfüllt somit deutlich die Vorgabe laut Norm. Die Analyseergebnisse zeigen in Summe deutlich, dass Steinwolle in Kombination mit einem Calciumträger eine potentielle Eignung als Sekundärzumahlstoff in der Zementindustrie aufweist. Um eine definitive Aussage über die zu verwendenden Parameter für die Versuchsdurchführung treffen zu können, müssen aufbauend auf dieser Arbeit weitere Versuche durchgeführt werden.

Zu klären ist im Rahmen zukünftiger Versuche und Analysen die große Abweichung an Al_2O_3 zwischen RFA und Mischungsrechner. Zu diesem Zweck wurde bereits eine Analyse der hergestellten Briketts geplant. Somit kann das Einbringen einer Verunreinigung durch den Brikettiervorgang überprüft werden. Zusätzlich erfolgt im gleichen Zeitrahmen eine Überprüfung der chemischen Eigenschaften der verwendeten Einsatzstoffe Glaswolle, Steinwolle, Eierschalpulver und Calciumcarbonat. Zusätzlich soll in Zukunft eine Erhöhung des CaO-Gehalts in der Mischung durchgeführt werden, um die Unterschreitung der Grenze für den Oxidgehalt zu beseitigen.

Ein weiterer Aspekt für eine weiterführende Betrachtung ist der Aufbau der Nassgranulationsanlage. Im Rahmen der Versuche ID 1- ID 10 kam es zu verschiedenen Modifikationen, die nach Auswertung der Ergebnisse keine Veränderung der Granulatqualität bewirkten.

Als Folge daraus soll an einem möglichst benutzungsfreundlichen, einfachen Versuchsaufbau gearbeitet werden, um zukünftig reproduzierbare Ergebnisse zu erzielen.

Glaswolle wurde in dieser Arbeit nicht bearbeitet. Die Eignung von Glaswolleabfällen für eine ähnliche Verwertung wird im Rahmen des RecyMin-Projekts weiterbearbeitet. Unter Zugabe eines größeren Anteils an Calciumträger kann wahrscheinlich ein Produktgranulat aus Glaswolle mit ähnlichen Eigenschaften, wie sie aktuell erzielt wurden, hergestellt werden. Diesbezüglich müssen in Zukunft noch weitere Untersuchungen durchgeführt werden. Der wichtigste Schritt, der dieser Arbeit folgen muss, ist jedoch eine holistische Betrachtung der Wirtschaftlichkeit des beschriebenen Verfahrens. Wichtige Faktoren sind die Energiekosten für die thermische Behandlung sowie die Kosten für das Hinzufügen von Calciumträgern. Die Herstellungskosten des Produktgranulats aus Mineralwolleabfall sind den Deponierungskosten gegenüber zu stellen. Auch gehören CO₂-Einsparungen miteinkalkuliert, die aus der Verwertung des Produktgranulats in der Zementindustrie entstehen. Im Sinne der Nachhaltigkeit ist es notwendig, Rohstoffkreisläufe langfristig zu schließen und die Deponierung als Entsorgungsmöglichkeit weiter zu minimieren. Durch die Bereitstellung eines Verwertungsverfahrens für Mineralwolleabfälle werden diese zukünftig nicht mehr deponiert werden. Insofern wird es wichtig sein, weiter an diesem Ansatz zu arbeiten und die Behandlungsschritte der Mineralwolle zu optimieren.

Literaturverzeichnis

- [1] Andreas Löschel. „European Green Deal und deutsche Energiewende zusammen denken!“ In: *Wirtschaftsdienst* 100.2 (2020), S. 78–79. DOI: 10.1007/s10273-020-2566-x.
- [2] Rat der Europäischen Union. *Richtlinie über Abfalldeponien*. 4.07.2018.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:01999L0031-20180704&from=EN>
- [3] Clemens Deilmann, Jan Reichenbach, Norbert Krauß, Karin Gruhler. *Materialströme im Hochbau: Potentiale für eine Kreislaufwirtschaft*. Hrsg. von Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung. Deutschland, 2017.
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/zukunft-bauen-fp/2017/band-06-dl.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [4] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. *Deponieverordnung: Depo VO*. 26.08.2021.
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20005653/DV0%5C%202008%5C%2c%5C%20Fassung%5C%20vom%5C%2026.08.2021.pdf>
- [5] Theresa Sattler, Robert Galler und Daniel Vollprecht. „Entwicklung innovativer Recyclingverfahren für Mineralwolleabfälle – Projekt RecyMin“. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 164.12 (2019), S. 552–556. ISSN: 0005-8912. DOI: 10.1007/s00501-019-00922-w.
- [6] Wolfgang Albrecht. „Recycling von Wärmedämmstoffen“. In: *Bauphysik Kalender 2019: Energieeffizienz Kommentar DIN V 18599 19* (2019), S. 121–138. DOI: 10.1002/9783433609842.ch4.
- [7] A Müller, B Leydolph und K Stanelle. „Stoffliche Verwertung von Mineralwolleabfällen – Technologien für die Strukturumwandlung“. In: *Keramische Zeitschrift* 61.6 (2009), S. 367–375.
- [8] An Cheng, Wei-Ting Lin und Ran Huang. „Application of rock wool waste in cement-based composites“. In: *Materials & Design* 32.2 (2011), S. 636–642. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.08.014.

- [9] Bellmann, Erika und Zimmermann, Patrick. *Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen*. Hrsg. von WWF Deutschland. Berlin.
https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/WWF_Klimaschutz_in_der_Beton-_und_Zementindustrie_WEB.pdf
.
- [10] Andreas Ehrenberg. *Hüttensand - Ein leistungsfähiger Baustoff mit Tradition und Zukunft: Teil 1*. 2006.
<https://www.yumpu.com/de/document/read/8617021/huttensand-ein-leistungsfahiger-baustoff-mit-tradition-und-zukunft/23>
.
- [11] Christian Schneider. „Zur Konstitution von Hüttensand, seiner quantitativen Bestimmung und seinem Festigkeitsbeitrag im Zement“. Dissertation. Clausthal: Fakultät für Natur- und Materialwissenschaften, 14. November 2007.
https://dokumente.ub.tu-clausthal.de/servlets/MCRFileNodeServlet/import_derivate_00000414/db109176.pdf
.
- [12] Daniel Vollprecht et al. „Innovative Deponierung sowie Recycling von Mineralwolleabfällen im Bergversatz, in der Zement- und in der Mineralwolleindustrie“. In: *Mineralische Nebenprodukte und Abfälle*. Hrsg. von Stephanie Thiel et al. Neuruppin: TK, 2019, S. 480–492. ISBN: 978-3-944310-47-3.
https://www.vivis.de/wp-content/uploads/MNA6/2019_MNA_480-493_Vollprecht
.
- [13] Katharina Stroh Michael Axmann. *Künstliche Mineralfasern*. Hrsg. von Umwelt-Wissen am Bayerischen Landesamt für Umwelt. 2008.
https://www.preisinger.info/download/kmf_kuenstliche_mineralfasern.pdf
.
- [14] Österreichisches Normungsinstitut. *Wärmedämmstoffe für Gebäude - Werkmäßig hergestellte Produkte aus Mineralwolle (MW) - Spezifikation*. Wien, 15.03.2015.
- [15] Margit Pfundstein et al. *Dämmstoffe: Grundlagen, Materialien, Anwendungen*. Walter de Gruyter, 2012. ISBN: 978-3-920043-18-8.
- [16] Informationsstelle Kreislaufwirtschaft des LfU. *Künstliche Mineralfasern*. Hrsg. von Bayerisches Landesamt für Umwelt. Bayern.
www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/entsorgung_einzeln_abfallarten/doc/kmf.pdf
.

- [17] Theresa Sattler et al. „Volume 09 - March 2020“. In: *Detritus* 9 (2020), S. 174–180. ISSN: 2611-4135. DOI: 10.31025/2611-4135/2020.13904.
- [18] Roland Gellert et al. *Dämmstoffe*. DE GRUYTER, 2007. ISBN: 978-3-920034-18-8. DOI: 10.11129/detail.9783955530211.
- [19] Hermann Salmang, Horst Scholze und Rainer Telle. *Keramik*. 7th 2007.;7. Aufl.; Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2007;2006; ISBN: 978-3-540-63273-3.
- [20] Fachvereinigung Mineralwolleindustrie. *Q&A zur Entsorgung von Mineralwolle in Österreich*. Hrsg. von Fachvereinigung Mineralwolleindustrie. 2018.
https://www.fmi-austria.at/wp-content/uploads/2018/11/FMI_QA-Mineralwolle-%C3%96sterreich_20181122.pdf
- .
- [21] Frank U. Vogdt et al. *Leitfaden Recyclingpotential von Mineralwolle*. Hrsg. von Forschungsinitiative Zukunft BAU.
<https://www.irbnet.de/daten/rswb/19089008967.pdf>
- .
- [22] Huber, Michael. „Entsorgung von Dämmstoffabfällen in Österreich“. Masterarbeit. Wien: Universität für Bodenkultur, Mai 2013.
<https://www.nachhaltiges-bauen.jetzt/wp-content/uploads/2015/05/Entsorgung-von-Daemmstoffabfaellen.pdf>
- .
- [23] Europäische Kommission. *EU-Protokoll über die Bewirtschaftung von Bau- und Abbruchabfällen*. Hrsg. von Generaldirektion Binnenmarkt, Industrie, Unternehmertum und KMU.
www.ec.europa.eu/docsroom/documents/20509/attachments/1/translations/de/renditions/native
- .
- [24] Satu Huuhka. „Demolished buildings: Empirical evidence on types, ages and construction materials“. In: *Central Europe towards sustainable Building Conference*. Czech Technical University in Prague. 2016, S. 1105–1112.
- [25] Europäisches Parlament und Rat. *Verordnung über die Einstufung, Kennzeichnung und Verpackung von Stoffen und Gemischen: CLPVO*. 10.05.2021.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008R1272-20210510&from=EN>
- .
- [26] RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung e.V. *GÜTEZEICHEN ÜBERSICHT*. Bonn.
https://www.ral-guetezeichen.de/wp-content/uploads/sites/2/RAL_Guetezeichen_Uebersicht.pdf
- .

- [27] European Certification Board. *By-Laws of the European Certification Board for Mineral Wool Products (EUCEB)*.
<http://www.euceb.org/uploads/2016-06-14%5C%20EUCEB%5C%20EXHIBITS%5C%20-%5C%20Appendix.pdf>
.
- [28] Europäisches Parlament und Rat. *Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle: AbfRRL*. 26.08.2021.
<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705&from=EN>
.
- [29] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. *Recycling - Baustoffverordnung: RBV*. 26.08.2021.
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20009212/RBV%5C%2c%5C%20Fassung%5C%20vom%5C%2026.08.2021.pdf>
.
- [30] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. *Abfallverzeichnisverordnung: AbfVVO*. 26.08.2021.
<https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung/Bundesnormen/20003077/Abfallverzeichnisverordnung%5C%2c%5C%20Fassung%5C%20vom%5C%2026.08.2021.pdf>
.
- [31] Länderarbeitskreis, Abfallwirtschaft, BMNT Abteilung V/6. *Künstliche Mineralfaserabfälle – KMF-Abfälle ab der Baustelle: Leitfaden*. Hrsg. von Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. 2019.
https://www.bmk.gv.at/themen/klima_umwelt/abfall/Kreislaufwirtschaft/verwertung/studien/kmf.html
.
- [32] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. *Recycling - Baustoffverordnung: RBV*. 29.06.2015.
https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2015_II_181/BGBLA_2015_II_181.pdfsig
.
- [33] Bundesministers für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. *Abfallverzeichnisverordnung: AbfVVO*. 23.12.2008.
https://www.ris.bka.gv.at/Dokumente/BgblAuth/BGBLA_2008_II_498/BGBLA_2008_II_498.pdfsig
.
- [34] Claus Asam. *Künstliche Mineralfaserdämmstoffe*. Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung, Jan.

2011. ISBN: 978-3-87994-606-8.
https://www.bbsr.bund.de/BBSR/DE/veroeffentlichungen/berichte-kompakt/2011/DL_1_2011.pdf?__blob=publicationFile&v=2
- [35] 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.*
https://www.isover.de/documents/broschure/ISOVER_RETURN_fr_WDVS_Steinwolle.pdf
- [36] ACA Industry. *Zerkleinerer zum Recycling von Mineralwolle, Steinwolle, Rockwool und anderen Dämmstoffen.* 2020.
<https://acaindustry.de/steinwolle-und-rockwool/>
- [37] Barbara Kozub et al. „Foamed Geopolymer Composites with the Addition of Glass Wool Waste“. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 14.17 (2021). ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma14174978.
- [38] Juho Yliniemi et al. „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. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.06.022.
- [39] Wool2Loop. 2021.
<https://www.wool2loop.eu/en/>
- [40] J. Gröper und D. Lack. „Verfahren zur Verwertung von Dämmmaterialabfällen aus Mineralwolle in Spezialbaustoffen“. In: *Tagungsband zur Recy & Depotech-Konferenz.* Bd. 13, S. 161–166.
- [41] PAROC GROUP OY AB. *Waste Injection into the Melting Furnace in Stone Wool Production: PAROC-WIM.* Hrsg. von Europäische Kommission. Finland und Sweden.
https://webgate.ec.europa.eu/life/publicWebsite/index.cfm?fuseaction=search.dspPage&n_proj_id=2126&docType=pdf
- [42] Michael Taylor, Dolf Gielen und Cecilia Tam. *Energy Efficiency and CO2 Emissions from the Global Cement Industry: IEA, Paris, 4-5 September 2006.* Paris.
www.researchgate.net/profile/Cecilia-Tam/publication/237232402_Energy_Efficiency_and_CO2_Emissions_from_the_Global_Cement_Industry/links/0f31753ba82c270956000000/Energy-Efficiency-and-CO2-Emissions-

- from-the-Global-Cement-Industry.pdf
- .
- [43] U.S. Geological Survey. *Mineral Commodity Summaries: CEMENT*. Hrsg. von U.S. Geological Survey.
<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2021/mcs2021-cement.pdf>
- .
- [44] Gerd Mauschwitz. *Emissionen aus Anlagen der österreichischen Zementindustrie: Berichtsjahr 2020*. Hrsg. von Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und Technische Biowissenschaften.
https://www.zement.at/downloads/downloads_2021/Emissionen_2020.pdf
- .
- [45] Harry FW Taylor et al. *Cement chemistry*. Bd. 2. Thomas Telford London, 1997. ISBN: 0-7277-2592-0.
<https://www.icevirtuallibrary.com/doi/pdf/10.1680/cc.25929.fm>
- .
- [46] Konrad Zilch, Claus Jürgen Diederichs und Rolf Katzenbach. *Handbuch für Bauingenieure: Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit-Fachwissen in einer Hand*. Springer-Verlag, 2013. ISBN: 978-3-662-07714-6. DOI: 10.1007/978-3-662-07713-9.
- [47] Nele De Belie, Marios Soutsos und Elke Gruyaert. *Properties of fresh and hardened concrete containing supplementary cementitious materials*. Bd. 25. Springer, 2018. ISBN: 78-3-319-70605-4. DOI: 10.1007/978-3-319-70606-1.
- [48] Zement Taschenbuch. *Verein Deutscher Zementwerke, Verlag Bau+ Technik, 50*. 2002.
- [49] P Scur. „Mineralische Sekundärrohstoffe für die Verwertung in der Zementindustrie-Anforderungen an die Qualität“. In: *Flaschen, Schlacken, Stäube aus Abfallverbrennung und Metallurgie. TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, Neuruppin* (2013).
- [50] Safwan A Khedr und Mohamed Nagib Abou-Zeid. „Characteristics of silica-fume concrete“. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 6.3 (1994), S. 357–375.
- [51] Bundesverband der Gipsindustrie e. V. *GIPS-Datenbuch*. Berlin, 2013.
https://www.gips.de/fileadmin/user_upload/gipsdatenbuch_2013.pdf
- .
- [52] Alfonso Aranda Usón et al. „Uses of alternative fuels and raw materials in the cement industry as sustainable waste management options“. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 23 (2013), S. 242–260. ISSN: 13640321. DOI: 10.1016/j.rser.2013.02.024.
- [53] R. Niemand und S. Lorsee. *Spezifikation: Artikelnummer: 6230: Calciumcarbonat*. Hrsg. von Carl Roth GmbH + Co. KG. Karlsruhe, DTL.

- <https://www.carlroth.com/at/en/a-to-z/calcium-carbonate/p/6230.11>
- .
- [54] CS-Additives. *Carbolux G*.
<https://www.cs-additive.de/en/products-overview/carbon-product-specialities/>
- .
- [55] Theresa Sattler et al. „Effects of cement addition and briquetting of rock wool on its geomechanical stability in landfills“. In: *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA* 38.4 (2020), S. 408–414. DOI: 10.1177/0734242X20906876.
- [56] Peter Eisner. „Eisenhüttenschlacken: Stoffliche Verwertung in der Zementindustrie (in Bearbeitung)“. Bachelorarbeit. Leoben: Institut für Thermoprozesstechnik - Montanuniversität Leoben, 2021.
- [57] Thermconcept. *Technical Data Elevator Furnaces: Elevator ELS 16/18*.
https://www.thermconcept.com/data/files/1062/en/Technical_Data_Elevator-Furnaces_ELS0811-ELHT1618.pdf
- .
- [58] Thomas Johannes Hafner. „Planung, Bau und Inbetriebnahme einer Nassgranulationsanlage im Technikumsmaßstab“. Masterarbeit. Leoben: Institut für Thermoprozesstechnik - Montanuniversität Leoben, November 2019.
- [59] Klaus Doschek-Held und Harald Raupenstrauch. „Hochtemperaturprozesstechnik“. In: *BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte* 165.7 (2020), S. 289–296. ISSN: 0005-8912. DOI: 10.1007/s00501-020-00993-0.
- [60] F. Steindl et al. *Forschungsprojekte US-B, GT-SM: Analyse und Vergleich der Produktqualitätsmerkmale von 4 Schlacken aus der Stahlproduktion: Bewertungsschema zur Bindemittleignung, 15.10.2021*. Graz.
- [61] *ÖNORM B 3309: Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung (AHWZ)*.
- [62] Xuerun Li et al. „Reactivity tests for supplementary cementitious materials: RILEM TC 267-TRM phase 1“. In: *Materials and Structures* 51.6 (2018). ISSN: 1359-5997. DOI: 10.1617/s11527-018-1269-x.

Abbildungsverzeichnis

2.1	Gesamtübersicht und Einteilung der unterschiedlichen Faserarten [13] . . .	4
2.2	Darstellung zweier Arten von Mineralwolle. (a) Glaswolle - gelb (b) Steinwolle - grau, gelb [15]	4
2.3	Schematische Darstellung des Prozesses der Herstellung von Steinwolle mit einem Kupolofen als Schmelzaggregat [21]	8
2.4	(a) RAL-Gütezeichen 388 für Erzeugnisse aus Mineralwolle [26] (b) EUCEB-Gütezeichen für Mineralwolleprodukte [27]	10
2.5	Zeitliche Abfolge der rechtlichen Änderungen in Bezug auf künstliche Mineralfasern von 2016 - 2021 [4, 20, 30, 22, 31, 32, 33, 2]	13
2.6	Globale Nachfrage nach Zement unterteilt nach Regionen und Ländern von 1970 - 2050 laut US Geological Survey mit Stand 2006 [42]	22
2.7	Einsatzmengen sekundärer Zuschlagstoffe in der österreichischen Zementindustrie von 2015-2020 [44]	23
2.8	Grenzen der Zusammensetzung von Hüttensand [10]	24
3.1	(a) Brikett von Sattler [55] (b) Brikett nach Vorzerkleinerung (c) Brikett nach Brechen auf 2 mm	30
3.2	ID a: (a) Glaswolle bei $t = 0$ (b) Glaswolle nach Volumenreduktion mit Laborgasbrenner nach $t = 20$ min	31
3.3	ID b: (a) Glaswolle bei $t = 0$ (b) Glaswolle nach Volumenreduktion mit Aufschweißbrenner nach $t = 10$ min und Wechsel des Probenbehälters . . .	32
3.4	ID c: (a) Versuchsaufbau der Volumenreduktion durch Mixen und Trocknen (b) Vergleich unbehandelter (links) und behandelte (rechts) Glaswolle nach Volumenreduktion durch Mixen und Trocknen	32
3.5	Hergestellte Briketts aus Glaswolle (links) und Steinwolle (rechts) mittels Versuchsanlage der Firma ATM-Recyclingsystems	33
3.6	Ofentischaufbau für die thermische Behandlung im Elevatorofen ELHT 16/18	36
3.7	Versuchsaufbau der Nassgranulationsanlage nach Hafner [58]	37
3.8	Versuchsaufbau A mit Vertikalrinne	38
3.9	(a) Versuchsaufbau B mit Vertikal- und Horizontalrinne (b) Versuchsaufbau C mit Horizontalrinne	38
3.10	Abgekühltes Produktgranulat im Auffangkorb der Nassgranulationsanlage .	41

3.11	Ablauf der Aufbereitung des Produktgranulats zur Analyse	43
4.1	Verlauf der maximalen Durchschnittstemperatur laut Infrarotkamera-Daten für ID 6 (Versuchsaufbau B) und ID 9 (Versuchsaufbau C)	46
4.2	(a) Schaumig erstarrtes Produktgranulat von ID 7 (b) Mischung aus schaumig und optisch glasig erstarrtem Produktgranulat von ID 9 (c) optisch glasig erstarrtes Produktgranulat von ID 8 (d) herkömmlicher Hüttensand von Hafner [58]	48
4.3	Differenz zwischen Oxidgehalt vom Produktgranulat laut MR und RFA . .	50
5.1	Oxidgehalt laut RFA für die Einsatzstoffe und das Produktgranulat der einzelnen Versuche	56
A.1	ID d: (a) Brikettierpress-Versuchsanlage der Firma ATM-Recyclingsystems (b) Hergestellte Briketts aus Steinwolle	71
A.2	Zusammensetzung der Mischung für Versuche ID 4- ID 9 laut Mischungsrechner von Eisner. [56]	72
A.3	Zusammensetzung der Mischung für Versuch ID 10 laut Mischungsrechner von Eisner [56]	72
A.4	(a) Einwiegen der Einsatzstoffe (b) Umfüllen der homogenisierten Probe in Graphittiegel (c) Fertig befüllter Graphittiegel mit Probe	73
A.5	Versuchsaufbau der Nassgranulationsanlage mit Infrarotkamera	75
A.6	(a) Entnahme des Graphittiegels aus dem Elevatorofen (b) Abguss der Schmelze in Nassgranulationsanlage	76
A.7	(a) Produktgranulat vor dem Einbringen in den Trockenschrank (b) Siebturm mit Rüttelplatte für die Siebung des getrockneten Produktgranulats .	77
A.8	Parameterdarstellung der Siebung des getrockneten Produktgranulats . . .	78
A.9	Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 4- 6 laut Mischungsrechner und RFA	79
A.10	Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 7 laut Mischungsrechner und RFA	80
A.11	Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 8 laut Mischungsrechner und RFA	80
A.12	Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 9 laut Mischungsrechner und RFA	81
A.13	Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 10 laut Mischungsrechner und RFA	81

Tabellenverzeichnis

2.1	Mittlerer Oxidgehalt von 7 Steinwolleprodukten, 11 Steinwolleabfällen, 6 Glaswolleprodukten und 15 Glaswolleabfällen mittels RFA, durchgeführt von der Firma CRB	5
2.2	Absatz der Dämmstoffe in Österreich für die Jahre 2008 - 2013 [22]	8
2.3	Schlüsselnummern laut österreichischer Abfallverzeichnisverordnung vom Jahr 2016 [33]	14
2.4	Schlüsselnummern laut österreichischer Abfallverzeichnisverordnung vom Jahr 2020 [30]	15
3.1	Oxidgehalt von Glaswolle und Steinwolle laut RFA	28
3.2	Oxidgehalt von Eierschalpulver laut RFA	29
3.3	Chemische Zusammensetzung von Calciumcarbonat-Pulver [53]	29
3.4	Chemische Zusammensetzung von C-Pulver Carbolux G[54]	29
3.5	Maximum- und Minimumgrenzen der Oxidgehalte und Basizitäten für Sekundärzumahlstoffe in der Bindemittelindustrie [56]	34
3.6	Oxidgehalte und Basizitäten für Produktgranulat mit den Maximum- und Minimumgrenzen für Sekundärzumahlstoffe in der Bindemittelindustrie [56]	35
3.7	Technische Spezifikationen des Elevatorofens [57]	36
3.8	Versuchsaufbauten der Nassgranulationsanlage	37
3.9	Massenangaben der Einsatzstoffe für Erstellung der Mischungen	40
3.10	Übersicht der Versuchsparameter für thermische Behandlung und Abkühlung	41
3.11	Versuchsaufbaubeschreibung der Nassgranulationsanlage	42
4.1	Ergebnisse der Vorversuche zur Volumenreduktion	44
4.2	Ergebnisse der Abgussdauer und Temperaturbestimmung anhand Infrarotkamera-Daten	45
4.3	Ergebnisse des Verhältnisses Wasser/Schlacke bei den Nassgranulationsversuchen	47
4.4	Ergebnisse der Oxidgehalte vom Produktgranulat der Versuche ID 4- ID 6 und ID 7 laut MR und RFA	49
4.5	Ergebnisse der Oxidgehalte vom Produktgranulat der Versuche ID 8- ID 10 laut MR und RFA	49
4.6	Differenz zwischen Oxidgehalten vom Produktgranulat laut MR und RFA .	50

4.7	Ergebnisse der bautechnologischen Analysen des Produktgranulats [60] . .	54
5.1	Zusammenfassung der Ergebnisse im Rahmen der Vorversuche	55

A. Anhang

A.1. Arbeitsanweisung Versuchsdurchführung

An der Thematik der Steinwolleaufbereitung soll nach Abschluss dieser Arbeit möglichst effizient weitergearbeitet werden. Um einen guten Wissenstransfer zu gewährleisten, ist in diesem Kapitel eine detaillierte Arbeitsanweisung vorzufinden, in welcher die wichtigsten Schritte für die Versuchsdurchführung beschrieben sind. Dort finden sich alle Parameter, um zukünftige Versuche nach dem gleichen Verfahren durchzuführen.

Brikettierung

Als erster Schritt muss das Einsatzmaterial vorzerkleinert werden. Die gewählte Methode ist hierbei das Brikettieren.

Um Mineralwolle brikettieren zu können, muss zuvor der Faserverband grob gelöst werden. Hierfür werden unter Verwendung von Schere und Abbruchklingennmesser Mineralwollestücke in faustgroße Stücke geschnitten. Dadurch erhöht sich die Schüttgutdichte signifikant. Der weitere Prozessschritt der Agglomeration wird dadurch erleichtert. Abbildung A.1 (a) zeigt die für die Brikettierung der Mineralwolle eingesetzte Brikettierpresse der Firma ATM-Recyclingsystems. Zur Herstellung eines Briketts wird über den Trichter, zu sehen in Abbildung A.1 (a), Mineralwolle in die Presse geleert und per Hand oder Holzstück vorkomprimiert. Durch Betätigen der Hydraulikpresse schiebt der Presstempel das eingefüllte Material in die Verdichtungskammer. Nach wiederholtem Vorgang des Zurückfahrens des Presstempels, Nachstopfens und wieder Vorfahrens des Presstempels kann ein Brikett gepresst werden. Die Brikettierung erfolgt unter der maximalen Pressdruckbelastung von 13 bar für 3 Sekunden, es wird kein Bindemittel eingesetzt. Die hergestellten Briketts, siehe Abbildung A.1 (b), haben einen Durchmesser von 7.5 cm, ihre Höhe variiert je nach Menge an zugeführtem Material zwischen 4 und 7 cm.



Abbildung A.1.: ID d: (a) Brikettierpress-Versuchsanlage der Firma ATM-Recyclingsystems (b) Hergestellte Briketts aus Steinwolle

Die Festigkeit der hergestellten Briketts ist niedrig. Bei geringer Druckbelastung zerfallen diese in staubähnliches Granulat. Für die weiterführende Verwendung ist dies einerseits von Vorteil, da keine weiteren Zerkleinerungsschritte gesetzt werden müssen und eine Homogenisierung einfach ist. Andererseits kommt es beim Handling mit den Briketts zu starker Staubentwicklung.

Mischungsrechner

Der Mischungsrechner dient dazu, die gewünschte chemische Zusammensetzung des herzustellenden Granulats zu berechnen. Einsatzstoffe sind die brikettierte Mineralwolle und Ergänzungsstoffe.

In den Abbildungen A.2 und A.3 ist die Benutzungsmaske des Solvers mit den eingetragenen Daten der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche dargestellt. Als BenutzerIn trägt man die chemische Zusammensetzung der Einsatzstoffe in die Maske ein und definiert die Randbedingungen durch Eintragen der unteren und oberen Grenzen im Mischungsrechner. Danach wird über die Solverfunktion eine Mischung erstellt. Kann eine Mischung erstellt werden, die alle Parameter erfüllt, sind alle Felder neben den Randbedingungen grün eingefärbt.

	A	B	C	D	J	K	S	T	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ
1			Mineralwollen		Additiv		Zielzusammensetzungen								
2			SW (rockwool Sonorock 035)		Eierschalenpulver		HÜS 4500								
3		In Verwendung	1		1		1								
4		$\theta = \text{nein}, 1 = \text{ja}$	m-%	o. ppm	Masse/kg	m-%	Masse/kg	m-%	Masse/kg	Ausreduktionsraten			reset		
5		SiO2	40.483%	0.3608	0.000%	0.0000	36.853%	0.3985	0.3985	Fe	0.98				
6		TiO2	1.35%	0.0121	0.07%	0.0002	0.55%	0.0055	0.0055	Mn	0.8				
7		Al2O3	15.44%	0.1376	0.00%	0.0000	11.97%	0.1197	0.1197	Cr	0.8				
8		FeO	3.94%	0.0351	0.00%	0.0000	0.40%	0.0040	0.0040						
9		MnO	0.63%	0.0056	0.00%	0.0000	1.39%	0.0139	0.0139	Zielmenge in kg	1				
10		MgO	10.33%	0.0921	0.00%	0.0000	8.73%	0.0873	0.0873						
11		Cr	0.00%	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%	0.0000	0.0000						
12		CaO	16.10%	0.1435	62.20%	0.1704	34.60%	0.3496	0.3496	Kriterienmatrix für Zielwertzusammensetzungen					
13		K2O	1.14%	0.0102	0.00%	0.0000	0.96%	0.0096	0.0096	Kriterium	Gewichtung	abs. Differenz	Gew. Differenz		
14		Na2O	1.74%	0.0155	0.00%	0.0000	0.42%	0.0042	0.0042	SiO2	0	0.018304629	0		
15		P2O5	0.33%	0.0030	0.00%	0.0000	0.10%	0.0010	0.0010	Al2O3	0	0.025392834	0		
16		SO3	0.18%	0.0016	0.10%	0.0003	1.72%	0.0172	0.0172	MgO	0	0.009692759	0		
17		S	0.00%	0.0000	0.00%	0.0000	0.68%	0.0068	0.0068	CaO	0	0.018784277	0		
18		LOI	2.62%	0.0234	3.60%	0.1030	0.10%	0.0010	0.0010	CaO/SiO2	0	0.007175032	0		
19		Summe HB	94.29%	0.8403	99.97%	0.2739236	101.82%	1.0182	1.0182	CaO+MgO+SiO2	0	0.027401647	0		
20		V (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	(CaO+MgO)/SiO2	0	0.028856578	0		
21		Ni (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	(CaO+MgO)/(Al2O3+SiO2)	0	0.028698457	0		
22		Cu (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	F-Wert nach Keil	0	0.131224477	0		
23		Zn (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Zielmenge	1	2.64751E-07	2.64751E-07		
24		Ga (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Summe			2.64751E-07		
25		Rb (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0						
26		Sr (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Minima/Maxima Randbedingungen					
27		Y (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil	Minimum	Maximum	Mischung	Differenz	
28		Zr (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil SW	1%	100%	76%	24%	JA
29		Nb (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil GW	0%	100%	0%	-100%	JA
30		Cs (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil -	0%	100%	0%	-100%	JA
31		Ba (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil Ca-Quelle	0%	100%	24%	-76%	JA
32		Pb (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil Ca-Quelle / LD	0%	100%	0%	-100%	JA
33		Th (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil Al-Quelle	0%	100%	0%	-100%	JA
34		Summe Spuren	0.0000%	0.000000	0.0000%	0.000000	0.0000%	0.000000	0.000000	Anteil SiO	31%	39%	38.02%	-1%	JA
35		Summe Ist-Masse/kg	94.29%	0.8403	99.97%	0.2739	101.82%	1.0182	1.0182	Anteil Al2O3	7%	18%	14.50%	-3%	JA
36		Soil-Masse/kg		0.891269663		0.27400581		1		Anteil MgO	2%	17%	9.70%	-8%	JA
37										Anteil CaO	32%	46%	33.08%	-13%	JA
38		CaO/SiO2	0.40		#DIV/0!		0.88			CaO/SiO2	0.87	1.35	0.87	-0.48	NEIN
39		CaO+MgO+SiO2	66.91%		#DIV/0!		83.54%			CaO+MgO+SiO2	66%	100%	80.80%	-19%	JA
40		(CaO+MgO)/SiO2	0.65		#DIV/0!		1.10			(CaO+MgO)/SiO2	1.03	1.36	1.13	-0.23	JA
41		(CaO+MgO)/(Al2O3+SiO2)	0.47		#DIV/0!		0.84			(CaO+MgO)/(Al2O3+SiO2)	0.00	1.20	0.81	-0.39	JA
42		F-Wert nach Keil	0.89		#DIV/0!		1.24			F-Wert nach Keil	1.23	1.95	1.37	-0.58	JA
43										SW/GW	0.00	100.00	1.00	-99.00	JA
44										sonstiges	0.00	100.00	1	-99.00	JA
45										sonstiges	0.00	100.00	1	-99.00	JA

Abbildung A.2.: Zusammensetzung der Mischung für Versuche ID 4 - ID 9 laut Mischungsrechner von Eisner. [56]

	A	B	C	D	J	K	S	T	AD	AE	AF	AG	AH	AI	AJ
1			Mineralwollen		Additiv		Zielzusammensetzungen								
2			SW (rockwool Sonorock 035)		Ca-Quelle/Karbonat		HÜS 4500								
3		In Verwendung	1		1		1								
4		$\theta = \text{nein}, 1 = \text{ja}$	m-%	o. ppm	Masse/kg	m-%	Masse/kg	m-%	Masse/kg	Ausreduktionsraten			reset		
5		SiO2	40.483%	0.3356	0.00%	0.0000	36.853%	0.3985	0.3985	Fe	0.98				
6		TiO2	1.35%	0.0112	0.07%	0.0005	0.55%	0.0055	0.0055	Mn	0.8				
7		Al2O3	15.44%	0.1280	0.00%	0.0000	11.97%	0.1197	0.1197	Cr	0.8				
8		FeO	3.94%	0.0327	0.00%	0.0000	0.40%	0.0040	0.0040						
9		MnO	0.63%	0.0052	0.00%	0.0000	1.39%	0.0139	0.0139	Zielmenge in kg	1				
10		MgO	10.33%	0.0856	0.00%	0.0000	8.73%	0.0873	0.0873						
11		Cr	0.00%	0.0000	0.00%	0.0000	0.00%	0.0000	0.0000						
12		CaO	16.10%	0.1334	65.34%	0.2285	34.60%	0.3496	0.3496	Kriterienmatrix für Zielwertzusammensetzungen					
13		K2O	1.14%	0.0095	0.00%	0.0000	0.96%	0.0096	0.0096	Kriterium	Gewichtung	abs. Differenz	Gew. Differenz		
14		Na2O	1.74%	0.0144	0.00%	0.0000	0.42%	0.0042	0.0042	SiO2	0	0.0461871	0		
15		P2O5	0.33%	0.0027	0.00%	0.0000	0.10%	0.0010	0.0010	Al2O3	0	0.01475559	0		
16		SO3	0.18%	0.0015	0.00%	0.0000	1.72%	0.0172	0.0172	MgO	0	0.002571656	0		
17		S	0.00%	0.0000	0.00%	0.0000	0.68%	0.0068	0.0068	CaO	0	0.030445753	0		
18		LOI	2.62%	0.0217	4.26%	0.1851	0.10%	0.0010	0.0010	CaO/SiO2	0	0.201411653	0		
19		Summe HB	94.29%	0.7816	99.96%	0.4138708	101.82%	1.0182	1.0182	CaO+MgO+SiO2	0	0.013180691	0		
20		V (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	(CaO+MgO)/SiO2	0	0.237443263	0		
21		Ni (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	(CaO+MgO)/(Al2O3+SiO2)	0	0.122286884	0		
22		Cu (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	F-Wert nach Keil	0	0.339167024	0		
23		Zn (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Zielmenge	1	1.47352E-08	1.47352E-08		
24		Ga (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Summe			1.47352E-08		
25		Rb (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Minima/Maxima Randbedingungen					
26		Sr (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil	Minimum	Maximum	Mischung	Differenz	
27		Y (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil SW	1%	100%	67%	33%	JA
28		Zr (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil GW	0%	100%	0%	-100%	JA
29		Nb (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil -	0%	100%	0%	-100%	JA
30		Cs (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil Ca-Quelle	0%	100%	9%	-91%	JA
31		Ba (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil Ca-Quelle / LD	0%	100%	0%	-100%	JA
32		Pb (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil Al-Quelle	0%	100%	0%	-100%	JA
33		Th (PPM)	0	0.000000	0	0.000000	0	0.000000	0	Anteil SiO	31%	39%	35.23%	-4%	JA
34		Summe Spuren	0.0000%	0.000000	0.0000%	0.000000	0.0000%	0.000000	0.000000	Anteil Al2O3	7%	18%	13.44%	-4%	JA
35		Summe Ist-Masse/kg	94.29%	0.7816	99.96%	0.4139	101.82%	1.0182	1.0182	Anteil MgO	2%	17%	8.99%	-8%	JA
36		Soil-Masse/kg		0.828933612		0.414036433		1		Anteil CaO	38%	46%	38.00%	-8%	JA
37										CaO/SiO2	0.87	1.35	1.08	-0.27	JA
38		CaO/SiO2	0.40		#DIV/0!		0.88			CaO+MgO+SiO2	66%	100%	82.22%	-18%	JA
39		CaO+MgO+SiO2	66.91%												

Einwiegen der Einsatzstoffe in den Graphittiegel

Die laut Mischungsrechner bestimmten Massen an Einsatzstoffen gehören in einen Probenbehälter eingewogen. Abbildung A.4 (a) zeigt den Probenbehälter mit den bereits eingewogenen Massen an brikettierter Steinwolle (gelb/grau) und Calciumträger (weiß). Für das Einwiegen kommt die Waage PJ 6000 der Fimra Mettler Toledo zum Einsatz. Es ist darauf zu achten, dass diese eben steht. Die Homogenisierung erfolgt durch Verschließen des Probenbehälters und Schütteln für $t = 1.5$ min, wobei eventuell eine andere Form der Mischung gewählt werden sollte. Die vollständig homogenisierte Probe wird in den Graphittiegel eingewogen, die gesamte Probemasse notiert. Dieser Schritt ist in Abbildung A.4 (b) dargestellt. Es ist darauf zu achten, in den Probenbehälter einen Überschuss an Probe einzuwiegen. Der Graphittiegel wird, wie in Abbildung A.4 (c) zu sehen ist, maximal befüllt, der Überschuss an Material aus dem Probenbehälter entsorgt.

Jeder Graphittiegel kommt bei zwei Schmelzversuchen zum Einsatz. Mehr Durchgänge sind aufgrund des Abbrennens des Graphitmaterials im Elevatorofen nicht möglich, da die Wandstärke bei jedem Versuch abnimmt. Ein Brechen des Tiegels muss zum Personenschutz und Schutz des Ofens unbedingt verhindert werden.

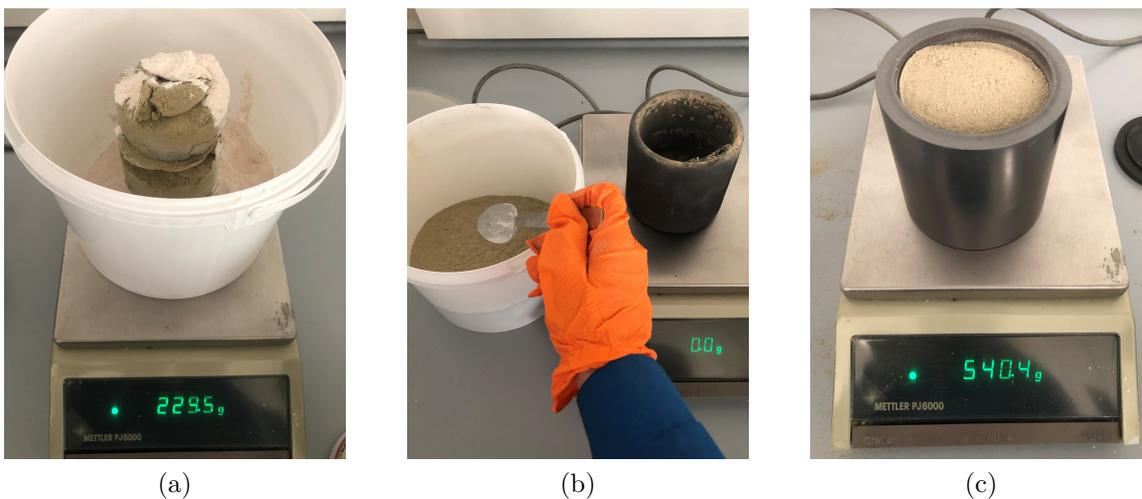


Abbildung A.4.: (a) Einwiegen der Einsatzstoffe (b) Umfüllen der homogenisierten Probe in Graphittiegel (c) Fertig befüllter Graphittiegel mit Probe

Vorbereiten Ofentisch

Vor dem Start des Elevatorofens müssen die Feuerfestmatte und die Graphitplatte auf dem Ofentisch platziert werden. Diese dienen zum Schutz des Ofentischs. Im Fall eines Versagens des Graphittiegels tritt die Schlacke nicht unmittelbar mit dem Feuerfestmaterial des Ofentischs in Kontakt, sondern mit der Graphitplatte und der Feuerfestmatte. Diese sind aufgrund der geringeren Kosten wesentlich günstiger zu ersetzen. Aufgrund einer Modifizierung des Feuerfestmaterials des Elevatorofens wird die Vorbereitung des Ofentischs für zukünftige Versuche eventuell anders ausgeführt.

Anschließen der Argongasflasche

Ab einer Betriebstemperatur von 300 °C in der Ofenkammer ist Argon als Schutzgas in die Ofenkammer zu leiten. Dafür wird vor dem Einschalten des Ofens eine Argongasflasche über einen Schlauch mit der Ofenkammer verbunden. Graphit ist an Luft bis ungefähr 400 °C beständig, darüber findet eine Oxidation des Graphitmaterials statt. Das Gas soll durch den Aufbau einer sauerstoffarmen Atmosphäre die Abbrenngeschwindigkeit des Graphittiegels signifikant reduzieren.

Platzieren des Graphittiegels im Elevatorofen

Es folgt das Platzieren des Graphittiegels auf dem Ofentisch und der Start des Ofens. Die Probe ist für ca. 2.5-3 h in der Ofenkammer. Dabei wird sie schnellstmöglich auf 1600 °C erhitzt und auf dieser Maximaltemperatur für 1.5 h gehalten. Ab einer Temperatur von 300 °C in der Ofenkammer erfolgt das Hinzuschalten des Schutzgases Argon mit 2 l/min.

Aufbau der Nassgranulationsanlage

Das Granulierbecken ist direkt vor dem Elevatorofen platziert, das Einfüllen von Leitungswasser findet über einen Schlauch statt. Dies erfolgt während des Erhitzens der Probe im Ofen. Zum Zweck der Überprüfung der vollen Funktionalität wird nach vollständigem Befüllen der Wanne die Pumpe eingeschaltet, die DüsenEinstellungen überprüft. Es ist darauf zu achten, dass der maximale Füllstand der Badewanne durch Zulauf der externen Wasserquelle während des Abgusses nicht überschritten wird.

Positionierung der Infrarotkamera

Zur Aufzeichnung von Schmelztemperatur und Abstichdauer kommt eine Infrarotkamera zum Einsatz. Deren Spezifikationen sind der Masterarbeit von Hafner [58] zu entnehmen. Der zu detektierende Bereich ist einzustellen, der Fokus der Kamera wird auf den Auftrittspunkt der Schmelze im Wasserbad gestellt. Der Emissionskoeffizient der Schmelze wird mit 0.85 angenommen. Abbildung A.5 zeigt die Platzierung der Infrarotkamera links neben der Nassgranulationsanlage.



Abbildung A.5.: Versuchsaufbau der Nassgranulationsanlage mit Infrarotkamera

Abguss der Schmelze in Nassgranulationsanlage

Der Graphittiegel mit der Schmelze hat nach Ende des Ofenprogramms eine Temperatur von 1600°C . Für die Durchführung des Abgusses sind zwei geschulte Personen notwendig. Eine ist zuständig für die Entnahme und den Abguss der Schmelze. Die andere hat die Aufgabe, alle parallelen Tätigkeiten auszuführen. Die einzelnen Schritte sind folgend aufgelistet:

- Start der Pumpe von Nassgranulationsanlage
- Start der Aufnahme von Infrarotkamera
- Runterfahren des Ofentischs
- Einschalten der externen Wasserzufuhr
- Entnahme des Graphittiegels mit Ofenzange, siehe Abbildung A.6 (a)
- Abguss der Schmelze, siehe Abbildung A.6 (b)
- Ausschalten der Pumpe und der externen Wasserzufuhr
- Entnahme des Auffangkorbs mit Granulat

Für zukünftige Versuche soll an einem Versuchsaufbau gearbeitet werden, der einen reproduzierbaren Abgussvorgang gewährleistet.

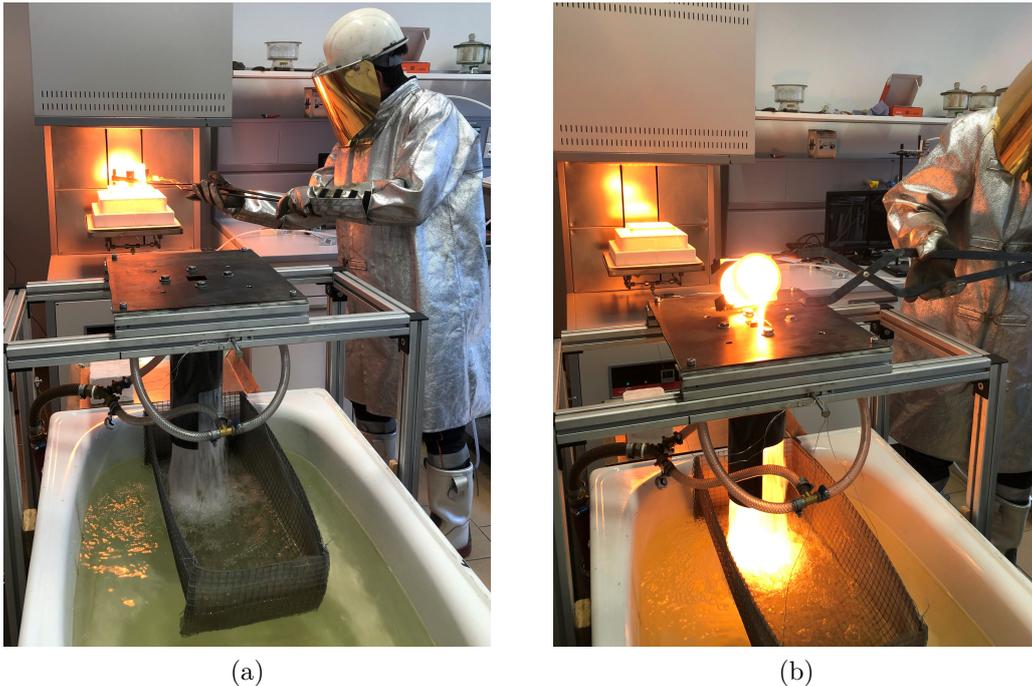


Abbildung A.6.: (a) Entnahme des Graphittiegels aus dem Elevatorofen (b) Abguss der Schmelze in Nassgranulationsanlage

Produktaufbereitung

Als Vorbereitung zur Analyse folgt eine Aufbereitung des hergestellten Granulats. In diesem Kapitel sind die durchzuführenden Schritte im Detail mit den gewählten Parametern aufgelistet.

Trocknung des hergestellten Granulats

Das erstarrte, gekühlte Granulat liegt nun im Auffangkorb vor. Zur Reproduzierbarkeit erfolgt das Trocknen des Produkts im Trockenschrank bei 105 °C für 24 h. Eventuelle Lagerungs- und Alterungsprozesse sollen dadurch verhindert werden. Dafür wird das Granulat aus dem Auffangkorb auf ein Blech gekippt und auf diesem, siehe Abbildung A.7 (a), gleichmäßig verteilt.

Siebung

Das getrocknete Material besteht zu einem Teil aus agglomerierten Stücken. Diese können aufgrund ihrer geringen Stabilität und hohen Porosität mithilfe einer standardisierten Trockensiebung nach DIN 66165 aufgebrochen werden. Es wird zwar eine Siebung durchgeführt, das Ziel ist jedoch keine Klassierung, sondern das Auftrennen des Agglomerats. Der Siebturm und die Rüttelplatte sind in Abbildung A.7 (b) zu sehen.



(a)



(b)

Abbildung A.7.: (a) Produktgranulat vor dem Einbringen in den Trockenschrank (b) Siebturm mit Rüttelplatte für die Siebung des getrockneten Produktgranulats

Eine Darstellung der Parameter für die Trockensiebung findet sich in Abbildung A.8.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1	Siebung:											
2												
3	Untersuchtes Material: ID 2 und ID 3											
4	Siebungsbedingungen: amplitude 1.5 mm/"g" für 10min											
5												
6	Korngröße											
7		[μm]			Sieb leer m Sieb leer [g]	Sieb voll m Sieb voll [g]	Produkt delta m [g]	Rückstand R [%]	Durchgang D [%]	Verteilungs- dichte q [1/ μm]		
8	500	5600	-	5600	368	368	0.00	100.00	0.0000000			
9	250	5600	-	3150	359	369	9.20	98.52	0.0000061			
10	125	3150	-	2000	340	501	160.60	27.39	72.61	0.0002253		
11	71	2000	-	1000	298	633	335.20	81.46	18.54	0.0005407		
12	63	1000	-	500	268.3	355.8	87.50	95.58	4.42	0.0002823		
13	32	500	-	250	241.9	261.3	19.40	98.71	1.29	0.0001252		
14	20	250	-	63	280.5	287.5	7.00	99.84	0.16	0.0000604		
15	0	63	-	0	418.8	419.8	1.00	100.00	0.00	0.0000256		
16		0	-	0						0.0000000		
17		0	-	0								
18			-	0			619.90					
19												
20	Einwaagebehälter leer:		[g]	1594.9								
21	Einwaagebehälter voll:		[g]	1694.9								
22	Einwaage:		[g]	621								
23	Produktverlust:		[g]	1.10								

Abbildung A.8.: Parameterdarstellung der Siebung des getrockneten Produktgranulats

Magnetabscheidung

Im Prozess des Granulierens bilden sich Eisenagglomerationen. Diese werden vor der Analyse des Produkts mithilfe eines Magneten aus dem Granulat entfernt. Hierbei kommt kein standardisiertes Prozedere zum Einsatz, der Magnet wird über das Granulat bewegt.

Brechen

Die bautechnologische Analyse erfordert das Granulat in feinkörniger Form. Der letzte Schritt der Produktaufbereitung ist deshalb das Brechen des Granulats auf 5 mm mit dem Brecher BB50 der Marke Retsch. Das gebrochene Produkt wird in Probensäckchen abgepackt und für die weiteren Analysen übergeben.

A.2. Ergebnisdarstellung MR und RFA

In den folgenden Diagrammen findet sich eine graphische Darstellung des Oxidgehalts vom Produktgranulat je Versuch. Die schraffierten Bereiche stellen die Grenzen für Sekundärzumarstoffe in der Bindemittelindustrie dar. Der ungefüllte Datenpunkt steht für den Oxidgehalt laut Mischungsrechner, der gefüllte für den Oxidgehalt laut RFA. Es ist zu sehen, dass bei den Versuchen ID 4 - ID 9 mindestens ein Wert außerhalb der Grenzen liegt. Das Produktgranulat aus ID 10 erfüllt als einziges alle Kriterien laut RFA.

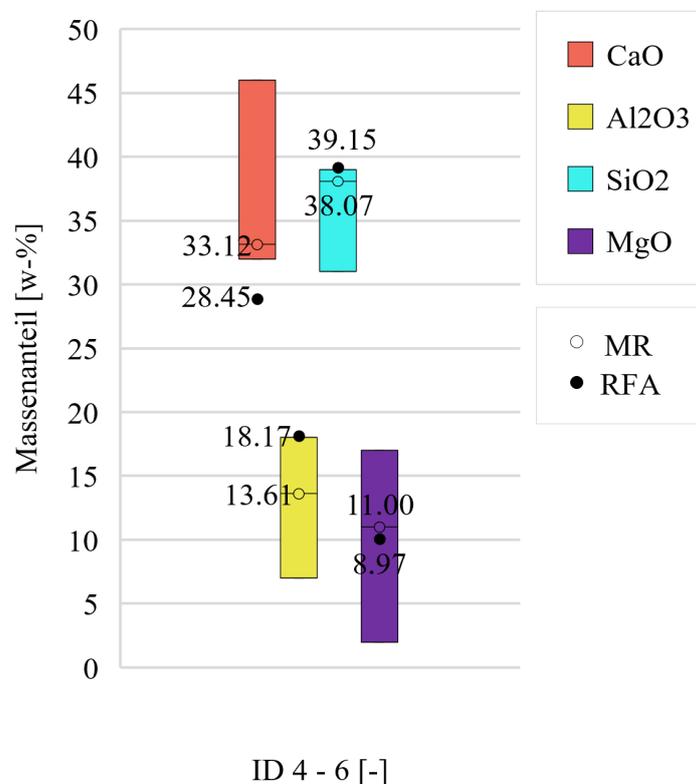


Abbildung A.9.: Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 4-6 laut Mischungsrechner und RFA

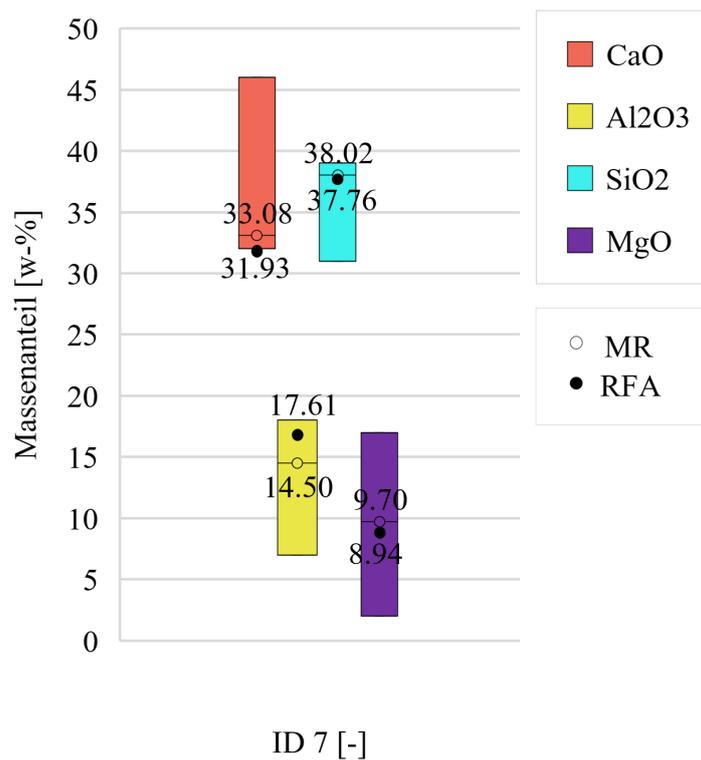


Abbildung A.10.: Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 7 laut Mischungsrechner und RFA

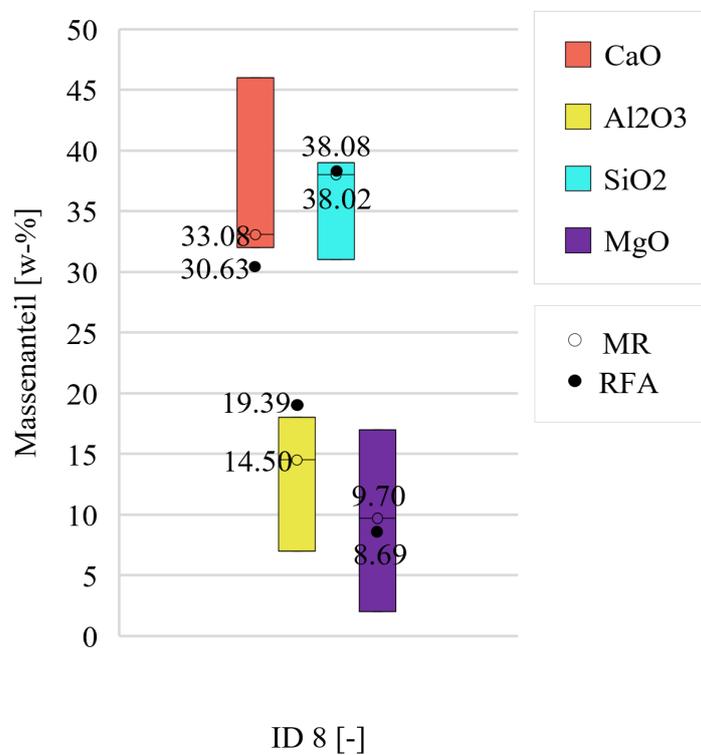


Abbildung A.11.: Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 8 laut Mischungsrechner und RFA

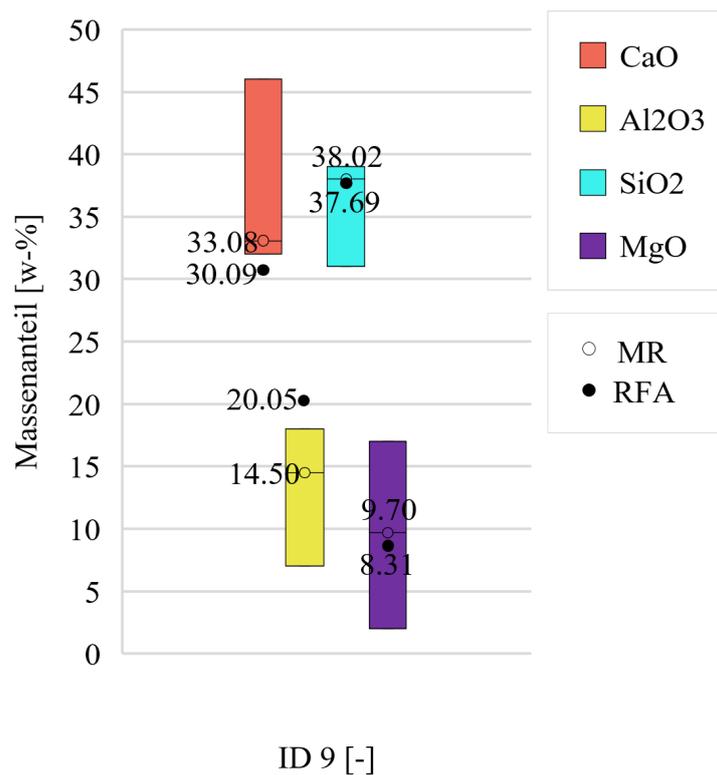


Abbildung A.12.: Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 9 laut Mischungsrechner und RFA

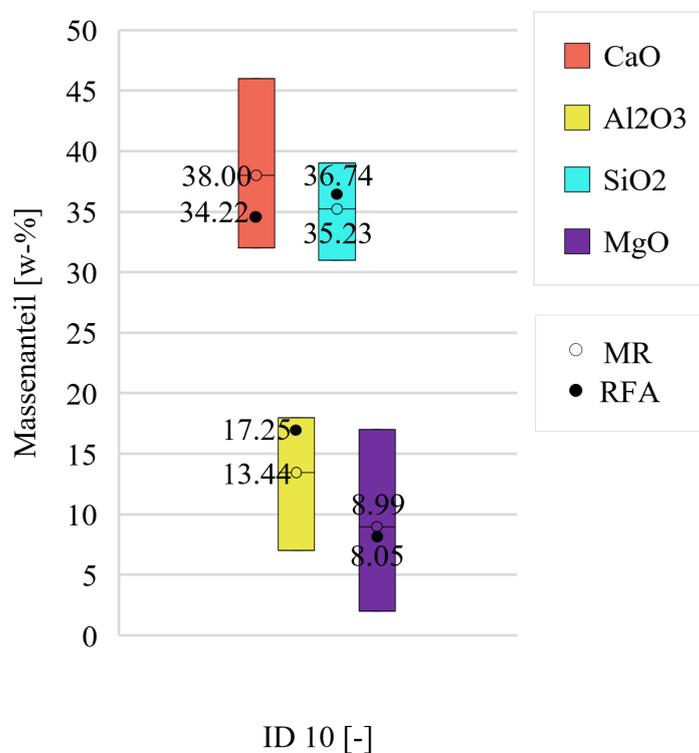


Abbildung A.13.: Oxidgehalt des Produktgranulats aus Versuch ID 10 laut Mischungsrechner und RFA