Diplomarbeit

Beurteilung verschiedener Recyclingmaterialien zur Herstellung alternativer Zusatzstoffe für Zement

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Maschinenwesen und Betriebswissenschaften

von

Daniel Lemmen, B.Sc.

Mat.Nr.: 12230481

unter der Leitung von

Senior Scientist Dipl.-Ing. Dr. techn. Andreas Bartl

Assistant Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. techn. Jakob Lederer

Projektass. Dipl.-Ing. Simon Mika

Institut für Verfahrenstechnik, Umwelt und technische Biowissenschaften, E116-01-1

Ort, Datum

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Eidesstaatliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass die vorliegende Arbeit nach den anerkannten Grundsätzen für wissenschaftliche Abhandlungen von mir selbstständig erstellt wurde. Alle verwendeten Hilfsmittel, insbesondere die zugrunde gelegte Literatur, sind in dieser Arbeit genannt und aufgelistet. Die aus den Quellen wörtlich entnommenen Stellen, sind als solche kenntlich gemacht.

Das Thema dieser Arbeit wurde von mir bisher weder im In- noch Ausland einem/-r Beurteiler/-in zur Begutachtung in irgendeiner Form als Prüfungsarbeit vorgelegt. Diese Arbeit stimmt mit der von dem Begutachter beurteilten Arbeit überein.

Ich nehme zur Kenntnis, dass die vorgelegte Arbeit mit geeigneten und dem derzeitigen Stand der Technik entsprechenden Mitteln (Plagiat-Erkennungssoftware) elektronisch-technisch überprüft wird. Dies stellt einerseits sicher, dass bei der Erstellung der vorgelegten Arbeit die hohen Qualitätsvorgaben im Rahmen der geltenden Regeln zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis „Code of Conduct“ an der TU Wien eingehalten wurden. Zum anderen werden durch einen Abgleich mit anderen studentischen Abschlussarbeiten Verletzungen meines persönlichen Urheberrechts vermieden.

Ort und Datum	*Daniel Lemmen*

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Ich möchte meinen Betreuern Senior Scientist Dipl. -Ing. Dr. techn. Andreas Bartl, Assistant Prof. Mag. Dipl.-Ing. Dr. techn. Jakob Lederer, Projektass. Dipl.-Ing Simon Mika und dem Institut für Verfahrenstechnik, Umwelttechnik und technische Biowissenschaften für Ihre Anleitung, Hilfe und uneingeschränkte Unterstützung danken. Zudem bedanke ich mich bei Dominik Blasenbauer und Sebastian Rosenbusch, die mich während der Diplomarbeit zusätzlich unterstützt haben. Ich bin überaus dankbar für die großartige Zusammenarbeit und sehr froh Teil der Forschungsgruppe gewesen zu sein. Ein weiterer Dank geht an die BOKU Wien und Johannes Hron für eine sehr gute Zusammenarbeit im Rahmen der Diplomarbeit.

Zusätzlich möchte ich meiner Familie und besonders meinen Eltern danken, welche mir mein Studium ermöglicht haben. Insbesondere für die kontinuierliche Unterstützung und das gegebene Vertrauen. Ein besonderes Dankeschön geht auch an Amelie und Nicholas die mich zu jeder Zeit während und neben meinem Studium begleitet haben und mir uneingeschränkte Motivation und Unterstützung schenken. Zudem bedanke ich mich bei allen weiteren Wegbegleiter:innen und Freund:innen, welche mir eine sehr besondere und schöne Studienzeit geschenkt haben. Danke an die BGB für eine unvergessliche Zeit in Wien!

Danke!

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Angesichts des stetig wachsenden Betonverbrauchs und der Bauindustrie ist die Entwicklung nachhaltigerer Alternativen für die Zementherstellung von zentraler Bedeutung.

Die Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Frage, inwieweit alternative Zusatzstoffe für die Betonherstellung den emissionsstarken Zement teilweise ersetzen können.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei verschiedene Materialien untersucht, Bettaschen aus zwei Wirbelschicht-Müllverbrennungsanlagen mit der Körnung 0-2 mm und 0-8 mm, Pyrolysekoks aus der Verbrennung von Hackschnitzeln und eine durch Autogenmahlung hergestellte Feinfraktion aus Betonabbruch, welche überwiegend aus Zementstein besteht.

Die Materialien wurden mittels Trommelmühle und Siebtechnik mechanisch aufarbeitet. Dabei lag ein besonderes Augenmerk auf der Optimierung des Mahlprozesses und den notwendigen Siebparameter, um einen möglichst hohen Feinkornanteil <0,063 mm zu erreichen. Anschließend wurden die Feinkornanteile mittels Laser-Diffraktion auf die Partikelgrößenverteilung und mittels Röntgenfluoreszenz auf die chemische Zusammensetzung getestet. Mittels der chemischen Zusammensetzungen können die alternativen Zusatzstoffe in einem auf SiO_2, CaO und Al_2O_3 genormten Dreiphasendiagramm bereits genormten AHWZs (ÖNORM 3309) und Klinker zugeordnet werden. Die Bettaschen befinden sich im Referenzbereich von Steinkohleflugasche und Zementstein im Referenzbereich von Klinker. Pyrolysekoks kann aufgrund der niedrigen Ordnungszahl von Kohlenstoff nicht zweifelsfrei chemisch, mittels RFA-Analyse, analysiert und eingeordnet werden. Zur notwendigen Einordnung in Festigkeitsklassen wurden anschließend Probenkörper mit den jeweiligen alternativen Zusatzstoffen hergestellt und gemäß DIN EN 206 nach 28 und 56 Tagen auf Druckfestigkeit geprüft.

Alle Probenkörper zeigen eine Festigkeitsentwicklung. Die Probenkörper mit Bettasche (0-2 mm) erreichen nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 26,8 MPa (C25/30) und nach 56 Tagen 32,3 MPa. Die Probenkörper mit Bettasche (0-8 mm) erreichen nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 29,4 MPa (C25/30) und nach 56 Tagen 32,8 MPa. Die Probenkörper mit überwiegend autogen abgetragene Zementstein aus Betonabbruch erreichen nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 25,9 MPa (C25/30) und nach 56 Tagen 30,1 MPa. Die Probenkörper mit Pyrolysekoks erreichen aufgrund einer höheren Partikelgrößenverteilung im Probenkörper nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 25 MPa und nach 56 Tagen 26,6 MPa.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abstract

The rising demand for concrete, driven by the ongoing expansion of the construction industry, highlights the urgent need for more sustainable supplementary cementitious materials in cement production. The thesis deals with the question to what extent supplementary cementitious materials for concrete production can partially replace the emission-intensive cement. In the course of this work, three different materials were investigated: bottom ash from two fluidized bed waste incineration plants with grain sizes of 0-2 mm and 0-8 mm, pyrolysis coke from the combustion of wood chips, and a demolished concrete produced by autogenous grinding, which consists predominantly of recycled concrete paste. The materials were mechanically processed using a drum mill and sieve technique. Particular attention was paid to the optimization of the grinding process and the necessary sieving parameters to achieve the highest possible fine fraction <0,063 mm. Subsequently, the fine fractions were tested for particle size distribution using laser diffraction and for chemical composition using X-ray fluorescence. Using the chemical compositions, the supplementary cementitious materials can be assigned in a ternary diagram normalized to SiO_2, CaO and Al_2O_3 to already standardized AHWZs (ÖNORM 3309) and clinker. The bed ashes are in the reference range of hard coal fly ash and recycled concrete paste in the reference range of clinker. Pyrolysis coke cannot be chemically analyzed and classified by means of XRF analysis due to the low atomic number of carbons. For the necessary classification into strength classes, specimens with the supplementary cementitious materials were then produced and tested for compressive strength according to DIN EN 206 after 28 and 56 days. All specimens show a strength development. The specimens with bottom ash (0-2 mm) reach a compressive strength of 26.8 MPa (C25/30) after 28 days and 32.3 MPa after 56 days. The specimens with bottom ash (0-8 mm) reach a compressive strength of 29.4 MPa (C25/30) after 28 days and 32.8 MPa after 56 days. The specimens with predominantly autogenously abraded recycled concrete paste from demolished concrete reach a compressive strength of 25.9 MPa (C25/30) after 28 days and 30.1 MPa after 56 days. The specimens with pyrolysis coke reach a compressive strength of 25 MPa after 28 days and 26.6 MPa after 56 days. Due to a high particle size distribution in the sample, pyrolysis coke shows the lowest results in the compressive strength.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Inhaltsverzeichnis

EIDESSTAATLICHE ERKLÄRUNG 2

DANKSAGUNG 3

KURZFASSUNG 4

ABSTRACT 5

NOMENKLATUR 3

1 EINLEITUNG 1

2 THEORIE 2

2.1 AUSBEUTUNG NATÜRLICHER RESSOURCEN 3

2.2 STAND DER TECHNIK 4

2.2.1 UNTERSUCHTE ALTERNATIVE ZUSATZSTOFFE FÜR AHWZ IM ÜBERBLICK 4

2.2.2 EUROPÄISCHE NORMREGELUNG AHWZ 8

2.3 AUFBEREITUNG DER ALTERNATIVEN ZUSATZSTOFFE 9

2.3.1 SIEBEN 9

2.3.2 MAHLEN 11

3 MATERIAL UND METHODEN 14

3.1 PROBENMATERIALIEN 14

3.1.1 BETTASCHEN (FB-IBA) 14

3.1.2 ZEMENTSTEIN AUS BETONABBRUCH (RC-ZS) 18

3.1.3 PYROLYSEKOKS (PK) 19

3.2 MECHANISCHE AUFBEREITUNG 20

3.2.1 BACKENBRECHER 20

3.2.2 TROMMELMÜHLE 20

3.2.3 SIEBTURM 23

3.3 ANALYTISCHE METHODEN 24

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.3.1 RFA ... 24
3.3.2 MASTERSIZER ... 25
3.3.3 FESTIGKEITSMESSUNG ... 27

4 AUSWERTUNG UND DISKUSSION ... 35

4.1 MECHANISCHE AUFBEREITUNG ... 35
4.1.1 MAHLPROZESS ... 35
4.2 SIEBEN ... 36
4.2.1 VORVERSUCHE SIEBLINIE ... 36
4.2.2 BETTASCHEN (FB-IBA) ... 42
4.2.3 ZEMENTSTEIN AUS BETONABBRUCH (RC-ZS) ... 47
4.2.4 PYROLYSEKOKS (PK) ... 50
4.2.5 MASTERSIZER ... 54
4.3 CHEMISCHE ANALYSE ... 57
4.3.1 RFA ... 57
4.4 PRÜFUNG FESTBETON-DRUCKFESTIGKEIT ... 63
4.4.1 AUSWERTUNG DRUCKFESTIGKEIT ... 66

5 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK ... 69

6 LITERATURVERZEICHNIS ... 72

7 ABBILDUNGSVERZEICHNIS ... 76

8 TABELLENVERZEICHNIS ... 79

9 ANHANG ... 81

9.1 SIEBANALYSE ... 81
9.2 MASTERSIZER ... 86
9.3 RFA-ANALYSE ... 89
9.4 DRUCKFESTIGKEITSVERSUCHE ... 92

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Nomenklatur

AHWZ	Aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für Betonherstellung
WS-MVA A	Wirbelschicht Müllverbrennungsanlage A
WS-MVA B	Wirbelschicht Müllverbrennungsanlage A
MSW	engl. Municipal solid waste
FB-IBA	engl fluidized bed incineration bottom ash aus WS-MVA
FSTP	engl. Fine Slag Treatment Plant
ESC	Wirbelstromabscheider
FB-IBA A-02	Bettasche aus WS-MVA A mit 0-2 mm Körnung
FB-IBA A-08	Bettasche aus WS-MVA A mit 0-8 mm Körnung
FB-IBA B-02	Bettasche aus WS-MVA B mit 0-2 mm Körnung
FB-IBA B-08	Bettasche aus WS-MVA B mit 0-8 mm Körnung
P_IBA-02	Probenkörper mit alternative Zusatzstoff FB-IBA aus ursprünglicher Körnung 0-2 mm
P_IBA-08	Probenkörper mit alternative Zusatzstoff FB-IBA aus ursprünglicher Körnung 0-8 mm
RC-ZS	Durch Autogenmahlung hergestellte Feinfraktion aus Betonabbruch, welche überwiegend aus Zementstein besteht
RC-ZS-O	Zementstein ohne Isopropanol gemahlen
RC-ZS-I	Zementstein mit Isopropanol gemahlen
P_RC-ZS	Probenkörper mit alternativen Zusatzstoff RC-ZS
PK	Pyrolysekoks
PK-O	Pyrolysekoks ohne Isopropanol gemahlen
PK-I	Pyrolysekoks mit Isopropanol gemahlen
P_PK	Probenkörper mit alternativen Zusatzstoff PK
NGK	Natürliche Gesteinskörnung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

1 Einleitung

Beton ist ein künstlich hergestellter Baustoff aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser. Die Baubranche verwendet Beton für die Herstellung notwendiger Infrastruktur, Tief- und Hochbau sowie anderer konstruktiver Bauten (Grübl, Weigler, und Karl 2002).

Aufgrund des anhaltenden Baubooms und dem Bevölkerungswachstum werden jährlich 10 Milliarden Tonnen Beton hergestellt. Bis 2050 wird mit einem Anstieg auf 18 Milliarden Tonnen Beton pro Jahr gerechnet (Hamada, Abed, und Hassan 2024).

Dabei ist die Betonproduktion mit starken ökologischen Auswirkungen verbunden. Beton gilt mit als Hauptverursacher der weltweiten Treibhausgasemissionen und hat einen erheblichen Anteil an dem weltweiten Energieverbrauch (Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie und Klima- und Energiefonds 2021). Es fallen 10 % der globalen Treibhausgasemissionen sowie 5 % des globalen Energieverbrauchs direkt auf die Bau- und Bauproduktwirtschaft. Davon sind ca. 8 % der globalen CO_2-Emission direkt auf die Herstellung von Zement zurückzuführen.(Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie und Klima- und Energiefonds 2021; Europeen Environment Agency 2024).

Grund für die hohen Emissionen und die notwendige Energie ist die Herstellung von Zement. Dieser wird mit Kalk und weiterer Zuschlagstoff bei ca. 1450°C gebrannt. Ein energieintensiver Prozess, der derzeit überwiegend mit fossilen Brennstoffen in Drehrohröfen durchgeführt wird. Im Herstellungsprozess von Beton werden 90 % der notwendigen Energie für das Brenne des Zementklinkers benötigt. Zudem sind 74–81 % der gesamten Treibhausgasemission für die Herstellung des Zements verantwortlich (Pacheco und Jalali 2011).

Hier bietet sich die Möglichkeit, einen Teil des Zementes im Beton durch sogenannte aufbereitete, hydraulisch wirksame Zusatzstoffe für die Betonherstellung, kurz AHWZ, zu ersetzen. Dies führt zu einer verbesserten Energie- und Emissionsbilanz von Beton.

Ein Problem bei gängigen AHWZs ist deren unsichere zukünftige Verfügbarkeit. Laut ÖNORM B 3309 bzw. EN 450 werden etwa in Österreich Hochofenschlacken aus der Stahlproduktion, der sogenannte Hüttensand, oder Flugaschen aus Kohlekraftwerken, verwendet. Durch die Umstellung von Hochöfen auf Elektroöfen in der Eisen- und Stahlerzeugung sowie den

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Ausstieg aus Kohlekraftwerken für die Stromproduktion ist zukünftig mit einem Versorgungsengpass bei diesen AHWZs für die Betonproduktion zu rechnen. Aus diesem Grund müssen alternative Zusatzstoffe für die Herstellung von AHWZ bzw. AHWZ-ähnlichen Materialien gefunden werden. Industrielle Abfallprodukte wie Bettasche, Pyrolysekoks, oder autogen abgetragener Zementstein aus Betonabbruch können mögliche Substituenten sein (Grübl, Weigler, und Karl 2002). Ihre Verfügbarkeit als industrielle Abfallprodukte und die Möglichkeit, sie im Vergleich zu Zementklinker energiesparsamer Aufbereitung zu können, machen sie für die Industrie interessant (Jacoby 2020).

Ziel dieser Arbeit ist es, die Herstellung von alternativen Zusatzstoffen zum Ersatz von AHWZ zu untersuchen und deren Einfluss auf die Druckfestigkeit von Betonen zu bestimmen. Hier sollen alternative Zusatzstoffe aufbereitet, chemisch analysiert und mit diesen Betonprobenkörper hergestellt werden. Die Probenkörpern werden gemäß DIN EN 12390-3 durch Belastung in einer hydraulischen Presse auf deren Druckfestigkeit getestet. Als alternative Sekundärrohstoffe werden aufbereitete Bettaschen (**FB-IBA**) aus Wirbelschicht-Müllverbrennungsanlagen, Pyrolysekoks (**PK**) sowie durch Autogenmahlung hergestellte Feinfraktion aus Betonabbruch, welche überwiegend aus Zementstein (**RC-ZS**) besteht, verwendet. Die fett gedruckten Bezeichnungen werden in Folge als Abkürzungen verwendet. Die Forschungsfragen lauten: Eignen sich Bettasche, Pyrolysekoks und Zementstein als alternative Zusatzstoffe für Zement in der Betonherstellung. Dies soll anhand von Aufbereitungsversuchen im Labormaßstab, chemischen und physikalischen Analysen sowie Druckfestigkeitsversuchen bewertet werden.

2 Theorie

Im folgenden Kapitel werden zunächst die ökologischen Folgen der Ressourcenausbeutung in der Betonherstellung betrachtet. Darauf aufbauend werden aktuelle Forschungsansätze und relevante EU-Normen zum Einsatz von AHWZs vorgestellt. Abschließend werden gängige Methoden gezeigt, um AHWZs aufzuarbeiten.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2.1 Ausbeutung natürlicher Ressourcen

Beton setzt sich aus verschieden Komponenten zusammen. Hauptanteil hat als Zuschlagstoff Gesteinskörnung mit ca. 80 %, 7 % Wasser und 12 % Zement (Lederer u. a. 2024). Die Gewinnung dieser natürlichen Ressourcen ist mit stark ökologischen Auswirkungen verbunden. Diese sollen im Folgenden kritisch betrachtet werden.

- Gesteinskörnung

Ein Hauptbestandteil der Gesteinskörnung ist natürlicher Sand und Kies. Er ist laut dem Umweltprogramm der Vereinten Nationen einer der am meisten benutzten Ressourcen weltweit. Das UN Umweltprogramm UNEP schätzt, das Sand und Kies jährlich 85 % des Gewichtes des weltweiten Abbaus von Mineralien ausmacht. Hauptproduzenten sind unteranderem die USA, Niederlande, Spaniel, Türkei und Indien. Dabei sind vor allem Quellen aus Grubensand, Flusssand und Meeressand am wichtigsten. Auf eine Tonne Zement kommen bis zu 10 Tonnen Sand. Durch die wachsende Nachfrage des Bau-Sektors wächst auch das Verlangen, illegale Aktivitäten durchzuführen. Beispielsweise werden in Südafrika in der Region KwaZulu-Natal von privaten und lokalen Unternehmen Sand direkt aus den Hauptflüssen und angrenzenden Sandbänken gezogen. In Indien, Tamil Nadu wird Sand großtechnisch in einem Küstenstreifen von 50 km abgebaut. Dadurch wurde die lokale Fischerei zerstört sowie ein erhöhtes Risiko von Überschwemmungen in Kauf genommen. Die Konsequenz sind dramatische Umweltschäden. Landverlust durch Küsten-/Fluss-Erosionen, sinkende Wasserstände, Schädigung der Flora und Fauna, Schädigung der Wasserqualität, erhöhte Wassertrübungen und Änderung von Landschaften sind nur wenige Beispiele. (Leal Filho u. a. 2021)

- Wasser

Wasser leitet die Hydration des Zements ein und ist ein grundlegender Bestandteil von Beton. 2012 fielen 9 % der weltweiten industriellen Wasserentnahme auf die Betonproduktion (Miller, Horvath, und Monteiro 2018). Etwa 13 % des Wassers werden direkt im Beton gebunden, 87 % entsprechen den indirekten Verbrauch, um beispielsweise Gesteinskörnungen aufzubereiten. In den nächsten 35 Jahren werden der Umwelt ca. 2300-2800 km^3 Wasser durch die Betonindustrie entnommen. Davon gehen 590-710 km^3 durch Verdunstung oder Bindung im Beton verloren und werden nicht in die zuvor

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

ausgebeuteten Systeme rückgeführt. Es wird geschätzt, das 2050, 75 % der Regionen, aus denen Wasser für die Betonproduktion entnommen werden, unter Wasser Knappheit leiden werden (Miller, Horvath, und Monteiro 2018).

Vor allem die Aufbereitung und Gewinnung von Zuschlagstoffen sind sehr wasserintensiv. Durch optimiere Aufbereitungsprozesse wie wassersparende Waschsysteme, Recycling von Waschwässern, könnten bis zu 30 % Wasser gespart werden (Miller, Horvath, und Monteiro 2018).

- Zement

Zement besteht hauptsächlich aus Kalkstein. Etwa 10 % der Erdoberfläche sind mit dem nicht nachwachsenden Rohstoff Kalkstein bedeckt. Die größten Abbaugebiete liegen unter anderem in den USA, China, Japan und Deutschland. Laut dem 2023 erschienenen Montan-Handbuch des österreichischen Bundesministeriums für Finanzen wurde allein in Österreich in 62 Gewinnungsstätten rund 14,5 mio. t Kalkstein abgebaut (Heike 2023). Kalkstein wird aus Steinbrüchen oder anderen Bergbauaktivitäten gewonnen, welche Umweltauswirkungen wie Verlust von Lebensräumen und Biodiversität, Staubentwicklung, Lärm, Erosion, Bodensenkungen und Sedimentbildung zur Folge haben (Ganapathi und Phukan 2020).

Dabei kommen auf 1 Tonne Zement kommen ca. 1,4 Tonnen Kalkstein (Murodif u. a. 2025).

Aufgrund der hohen Brenntemperaturen, welche notwendig sind, um Kalkstein in reaktives Calziumoxid umzuwandeln, fallen allein bei der Zementherstellung ca. 8% der globalen CO_2-Emissionen an. Die Emissionen setzen sich aus folgenden Anteilen zusammen: 40 % stammen aus der fossilen Verbrennung zur Heizung des Ofens, 50 % sind auf die Reaktion Kalkstein zu Calciumoxid rückzuführen und 10 % werden durch indirekte Emission wie Transport verursacht (Imbabi, Carrigan, und McKenna 2012).

2.2 Stand der Technik

2.2.1 Untersuchte alternative Zusatzstoffe für AHWZ im Überblick

Im Folgenden werden verschiedene Studien vorgesellt, welche Bezug auf die, später in der Arbeit erforschten, alternative Zusatzstoffe nehmen. Die Materialien in den Studien haben ähnliche Zusammensetzungen wie die untersuchten Materialien FB-IBA, RC-ZS und PK.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Bett- und Rostaschen aus Müllverbrennungsanlagen

Zur Verwendung aufbereiteter Bettaschen aus Wirbelschicht-Müllverbrennungsanlagen (WS-MVAs) konnten kaum vergleichbare Studien gefunden werden. Jedoch existieren Studien zu Rostaschen aus MVAs. Rost- als auch Bettaschen sind Verbrennungsrückstände aus MVAs und unterscheiden sich hinsichtlich ihrer Entstehung abhängig der Feuerungstechnologie. Grundsätzlich existieren zwei Feuerungstechnologien, die Rostfeuerung und die Wirbelschichtfeuerung (WS). Bei der Rostfeuerung verbleiben etwa 20-25 m-% Rostasche bezogen auf die Masse des Verbrennungsrückstand. Bei der Wirbelschichtfeuerung verbleiben etwa 10 m-% Bettaschen bezogen auf die Masse des Verbrennungsrückstand. Dies ist auf höhere Feststoffanteile zurückzuführen, welche auf Flugasche übertragen werden (Mühl u. a. 2023) (Leckner und Lind 2020).

Im folgenden Abschnitt sind alle Prozentangaben in m-% bezogen auf die Zementtrockenmasse angegeben. (Vaičienė und Simanavičius 2022) beschreiben in der Studie den Einsatz von dem alternativen Zusatzstoff Rostaschen aus MVAs. Dabei werden den Betonproben mit einem Rostaschenanteilen von 0, 3, 6, 9 und 12 m-% hergestellt. Geprüft wird die Frischbeton-Konsistenz, Druckfestigkeit (7 Tage und 28 Tage) und die Frostbeständigkeit. Es stellt sich heraus, dass der optimale Rostascheanteil 6 m-% beträgt. Die Druckfestigkeit der Probenwürfel mit Seitenlängen von 100 mm nach 28 Tagen steigt auf 36,1 MPa. Zudem zeigen die Betonproben mit Rostascheanteilen von 6, 9 und 12 m-% eine gute Frostbeständigkeit und können der Klasse F100 zugeordnet werden. Höhere Rostascheanteile ≥9 m-% zeigen leichte Rückgänge der Druckfestigkeit von 9,4 % im Vergleich zu der optimalen Rostascheanteil mit 6 m-% sowie der Verarbeitbarkeit (Fließverhalten).

In einer weiteren Studie von (An, Kim, und Nam 2017) wird Rostasche aus MVA untersucht, um als Teilersatz für Zement in Zementleim zu dienen. Die Hauptoxide der Rostasche sind wie folgt in m-% bezogen auf die Trockenmasse der Rostasche angegeben: CaO (52,4 m-%), SiO2 (13,8 m-%) und SO3 (8,01 m-%). Zudem ist reaktives Aluminium enthalten, das in basischer Umgebung Wasserstoffgas erzeugt und ein Risiko der Volumenblähung darstellt. Die Rostasche wird gemahlen und auf <0,09 mm abgesiebt. Zur Druckfestigkeitsprüfung werden zylindrische Probenkörper mit den Maßen 25x50 mm gegossen. Die Studie zeigt, dass der Zementersatz von Rostasche um 20 m-% die höchste Druckfestigkeit nach 28 Tagen von

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

23,9 MPa erreicht. Bewertet werden die Probenkörper mit dem Festigkeitsaktivitätsindex (SAI), welcher ein Maß für die festigkeitssteigernde Reaktivität ist. Der Leim mit einem Rostascheanteil von 20 m-% erreicht 90 % der Druckfestigkeit eines Referenzleims mit 100 m-% Zement.

- Betonabbruch

Bau- und Abbruchabfälle, welche eine Zementmatrix enthalten bringen ein hohes Potential, um eine neue Wertschöpfungskette hin zu Kreislaufwirtschaft zu eröffnen. Ziel ist es durch Behandlung der Bau- und Abbruchabfälle Zementstein erneut nutzen zu können.

Der Bericht von (Shivaprasad, Yang, und Singh 2024) zeigt anhand verschiedener Studien wie Betonabbruch durch thermische, mechanische und chemische Verfahren reaktiviert werden kann um als nachhaltiger Zementersatz in neuem Mörtel verwendet werden zu können.
Die chemische Modifikation wird von Forschenden mit verschiedenen Chemikalien durchgeführt. Dabei wird zunächst der Betonabbruch fein gemahlen und anschließend mit Salzen und Alkali-Salz-Kombinationen (CaO, $Ca(OH)_2$, Na_2SO_4, $CaSO_4$) aktiviert und die puzzolanische Wirkung getestet. Es wird beobachtet, dass die Recyclingzemente mit 3 m-% CaO und 2 m-% Na_2SO_4, bezogen auf die Trockenmasse des Recyclingzements eine 15,7 % bzw. 12,2 % höhere Druckfestigkeit als der Mörtel mit nicht aktivierten Recyclingzement aufweisen. Es wird zudem beschrieben, dass der hergestellte Mörtel trotz höheren Wasserbedarfs und den, dadurch erhöhten Wasser-Binder-Wert (W/B-Wert) Druckfestigkeiten im Bereich von 20-30 MPa nach 28 Tagen erreicht. Zusätzliches Einbringen von mineralischen Zusätzen erweist sich als vielversprechend um die physikalischen und mechanischen Eigenschaften von recycliertem Zement zu verbessern. Im Vergleich zu Portlandzement hat recyclierter Zement geringere CO_2 Emissionen und niedrigere Energieeinträge.

(Dora 2001) bezieht sich auf das Recyceln von Zementstein aus Betonabbruch. Zunächst wird Beton mit einem Backenbrecher gebrochen und auf <0,25 mm gesiebt. Der Feinkornanteil wird als Betonbrechsand bezeichnet und ist reich an Zementstein. Um die Reaktivität des Zementsteins wieder herzustellen, wird eine thermische Behandlung bei 700°C für 30 min in einem Drehrohrofen durchgeführt. Dabei sollen die Hydrationsprodukte (C-S-H) Phasen in hydraulisch aktive Dicalciumsilikate (C_2S) umgewandelt werden. Als Probenkörper werden Mörtelprismen (40x40x160 mm) mit Normsand, als Zuschlag, hergestellt und für 28 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

unter Wasser gelagert. Der Zement (CEM I) wird in einer Versuchsreihe in 25 m-%-Schritten bezogen auf die Trockenmasse des Zements durch den Betonbrechsand ersetzt. Folgende Druckfestigkeiten (Tabelle 1) konnten erreicht werden.

Tabelle 1: Mörtelprismen Druckfestigkeit mit Betonbrechsand

Anteil Betonbrechsand [%]	*Druckfestigkeit [MPa]*
0	47
25	32
50	20
75	15
100	10

- Kohle

Im folgenden Abschnitt sind alle Prozentangaben in m-% bezogen auf die Zementtrockenmasse angegeben. (Hylton u. a. 2024) beschreibt die Nutzung von Biokohle aus 16 verschiedenen Quellen als alternativen Zusatzstoff. Biokohle stammt aus thermischen Zersetzungen von Biomasse (Pyrolyse). Das Material wird unterhalb 0,02 mm mit einer Ringmühle gemahlen. Als Zement wird Portlandzement CEM I verwendet. 10 m-% des CEM I werden mit gemahlener Biokohle ersetzt. Der W/B-Wert beträgt 0,45. Es werden 50 mm-Mörtelwürfel als Probenkörper für die Druckfestigkeitsprüfung angefertigt, welche nach 28 Tagen in einem Wasserbad gelagert und anschließend getestet werden. Das Ergebnis zeigt, dass durch Ersatz von Zement durch 10 m-% Biokohle eine vergleichbare bzw. verbesserte Druckfestigkeit in den 16 Probenkörper erzielt werden konnte. Dabei zeigt die Probe mit Biokohle aus Hartholz, hergestellt in einem schnellen Pyrolyseverfahren, die höchste Druckfestigkeit von ca. 73 MPa. Im Vergleich dazu hat der Kontrollkörper aus 100 m-% Zement eine Druckfestigkeit von ca. 49 MPa. Die Studie weist gezielt daraufhin, dass das Mahlen unter 0,02 mm entscheidend für die Festigkeitsentwicklung ist. Biokohle zeigt ein hohes Potential, um die Eigenschaften von Betonen mit alternativen Zusatzstoffen aus Biokohle zu verbessern.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2.2.2 Europäische Normregelung AHWZ

Die gängigen Normen für Anforderungen an AHWZs beziehen sich auf Zementprodukte mit definierten Stoffen, die ein festgelegtes chemisches Verhalten aufweisen, beispielsweise Flugasche Hüttensand oder Kalkstein. Die in dieser Arbeit beschriebenen alternativen Zusatzstoffe (Bettasche, Pyrolysekoks und Zementstein aus recyclierten Betonabbruch) sind nicht explizit in den Normen definiert.

Um Vergleichbarkeit herstellen zu können, werden die alternativen Zusatzstoffe nahe dem gängigen Normen für AHWZs hergestellt und getestet.

Die Regelung der Zusammensetzung sowie Anforderungen an Normalzement mit AHWZ wird in der DIN EN 197 geregelt. Dabei wird Normzement CEM I-V verwendet und genau definiert, welche alternativen Zusatzstoffe verwendet werden dürfen. Die DIN EN 450 beschreibt die Definition, Anforderungen und die Konformitätskriterien von Flugasche als Zusatzstoff Typ II für Beton.

DIN EN 206 definiert Anforderungen an die Herstellung, Eigenschaften, und Konformität von Beton. Verschiedene Expositionsklassen mit zugehörigen W/B-Werten und Druckfestigkeiten werden beschrieben. Der W/B-Wert liegt für die verschiedenen Expositionsklassen zwischen 0,45-0,65. Der W/B-Wert errechnet sich aus dem Anteil an Wasser W, den Anteil Zement Z und dem Zusatzstoff A multipliziert mit dem k-Wert (Formel (1)).

$$W/B = \frac{W}{Z + k * A} \qquad (1)$$

Der k-Wert ergibt sich aus der entsprechenden Norm je nach AHWZ. DIN EN 450 und DIN EN 206 legt den k-Wert für Flugasche auf k=0,4 fest für Betone mit CEM I und CEM II/A. In Österreich regelt die ÖNORM B 3309 die Verwendung von AHWZs Flugasche und Hüttensand und wendet die Normen EN 206 und EN 450 auf nationaler Ebene an. AHWZs die der ÖNORM B 3309 entsprechen und zu hydraulisch wirksamen Zusatzstoffen zählen erhalten einen k-Wert von 0,8.

Da Bettaschen, Zementstein und Pyrolysekoks keine genormten Zusatzstoffe sind, können keine normgerechten k-Werte zugeordnet werden. Eine Zuordnung ist erst nach Qualifizierung als AHWZ nach ÖNORM B 3309 möglich. Grundsätzlich geht die Arbeit davon aus, dass Bettasche, Zementstein und Pyrolysekoks alternative Zusatzstoffe sein können und

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

sich somit potenziell als AHWZ ähnliche Stoffe qualifizieren könnten. Dies würde nach nationaler ÖNORM B 3309 einen k-Wert von k=0,8 ergeben und somit einen W/B Wert von 0,62.

DIN EN 12390 regelt die Prüfung von Festbeton. Der Fokus liegt hierbei auf folgenden Normen:

- EN 12390-1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probenkörper und Formen
- EN 12390-2: Herstellung und Lagerung von Probenkörpern für Festigkeitsprüfung
- EN 12390-3: Druckfestigkeit von Probenkörper

2.3 Aufbereitung der Alternativen Zusatzstoffe

2.3.1 Sieben

Die Siebanalyse zur Bestimmung der Partikelgrößenverteilung von dispersen Systemen wird in DIN 66516-1 beschrieben. Im Folgenden werden mögliche Einflussgrößen auf das Siebergebnis, Siebdauer, mögliche Analysefehler, Kontrolle und Wartung von Sieben, Bezug genommen werde.

- Einfluss der Siebe
    - **Sieböffnung**: Toleranzen, unregelmäßige Maschen und Öffnungsformen führen dazu, dass die Nennöffnungsweite des Siebbodens meist nicht mit dem Medianwert übereinstimmt.
    - **Wirksame Siebfläche**: Die an der Siebung beteiligten Sieböffnungen werden mit der Zeit, aufgrund von Verstopfungen der Sieböffnungen durch Grenzkörner, weniger.
    - **Bewegung**: Die Trennschärfe und Trenngrenze werden durch Amplitude und Art der Rüttelbewegung beeinflusst.
    - **Siebhilfen**: Gummiwürfel oder -kugeln beeinflussen die Trennschärfe positiv, können aber auch zu unerwünschten Zerkleinerungsprozessen führen.

- Siebgut-Einflüsse
    - **Masse/Volumen**: Jedes Rüttelsieb hat ein maximal erlaubtes Schüttvolumen. Die gesamte Aufgabemenge soll höchstens das doppelte Volumen betragen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die zulässigen Schüttvolumen sind aus Tabelle 2 der DIN EN 66165-1:2022 zu entnehmen.

- **Korngrößenverteilung**: Die Häufung von Partikeln an Trenngrenze verlängert die Siebdauer.
- **Partikelform**: Bei extremen Formen wie Nadeln sollten bildgebende Verfahren verwendet werden.
- **Agglomeration/Feuchtigkeit**: Erschweren die Siebung.
- **Abrieb/Bruch**: Verzerren das eigentliche Siebbild.

- Siebdauer
  - Nach (Stieß 2009) werden folgende Siebdauer empfohlen:

Tabelle 2: Siebdauern in Abhängigkeit der Maschenweite

Maschenweite [mm]	*Siebdauer [min]*
>0,16	>10
0,16-0,071	>20
0,071-0,04	>30

- Analysefehler
  - **Wiege Fehler:** Ungenau Messungen/Kalibrierung beeinflussen das Ergebnis.
  - **Masseverluste**: Durch Anhaften von Partikeln an den Siebböden oder beim Umfüllen der Proben.
  - **Abrieb/Agglomeration**: Verändern die Korngrößenverteilung während der Analyse.
  - **Fehler bei Trenngrenzenermittlung**: Ungenaue Bewertung der Siebkurve.
  - **Toleranzgrenze**: Differenz zwischen der Masse des Aufgabengutes und der Summe der Masse aller Fraktionen sollte max. 1 % betragen.

- Kontrolle und Wartung der Siebe
  - **Öffnungsweite**: Vor Benützung ist zu prüfen, ob die Öffnungsweiten der Siebe mit den Angaben auf den Sieben übereinstimmen.
  - **Reinigung**: Vor und nach jedem Gebrauch sind Siebboden und Rahmen zu reinigen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- **Kontrolle**: Siebboden Augenscheinlich auf Beschädigungen und Sauberkeit prüfen.

2.3.2 Mahlen

Mahlen dient der Zerkleinerung von mineralischen Reststoffen mittels Mahlhilfen (Stahlkugeln). Als Mahl-Prinzip wird eine Trommelmühle verwendet, bestehend aus einem horizontal rotierenden Zylinder mit einem Durchmesser von 26 cm. Die Zerkleinerung beruht auf Prall- und Reibbeanspruchungen von Stahlkugeln unterschiedlicher Größen bzw. dem Eigengewicht der Proben (autogen Mahlen). Dabei soll eine Zielgröße von unter 0,063 mm erreicht werden.

- Mahlfeinheit

Da es keine Normen für die zu verwendeten alternativen Zusatzstoffen gibt, können alternative stoffähnlich genormte Produkte als Vergleichsstoffe zugezogen werden. Der Mahlgrad bestimmt entscheidend über die chemische Reaktivität. Es kann davon ausgegangen werden, dass Bettasche und Pyrolysekoks ähnlichen Anforderungen entsprechen müssen wie Flugasche. Nach DIN EN 450-1 dürfen 40 % der Partikelgrößenverteilung nicht über 0,045 mm gemahlen sein. Der Zementstein kann Portlandzementklinker zugeordnet werden, welcher nicht direkt in seinem Mahlgrad genormt wird, sondern über die Frühfestigkeit in DIN EN 197 geprüft wird.

- Mahlkörper

Die Trommelmühle wird mit verschieden großen Stahlkugeln gefüllt. 30 mm Kugeln sorgen durch ihre hohe Aufprallenergie für Mikrorisse in den Grobgutanteilen und sind für die Grobzerkleinerung wichtig. Kleine Kugeln besitzen eine höhere spezifische Oberfläche und es kommt zu häufiger auftretenden Kollisionen mit den Partikeln und somit zu einer Feinzerkleinerung durch Abrieb (Hirosawa, Iwasaki, und Iwata 2021).
Kugelmischungen können einen positiven Effekt auf das Mahlergebnis haben. Hier ist darauf zu achten, dass die Kugelmischungen optimal auf die Anwendung abgestimmt sind. Soll ein höherer Feingutanteil erzielt werden, sollte das Verhältnis hin zu kleineren Kugeln erhöht werden (Matsanga, Nheta, und Chimwani 2023).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Neben den Stahlkugeln ist der Effekt der Partikelgrößenverteilung auf das Mahlergebnis wichtig. Die spezifische Bruchrate (Zerkleinerung bezogen auf die eingesetzte Energie) sinkt mit Abnehmen der Partikelgröße. Kleine Partikel (<0,05 mm) rutschen durch die Lücken der Mahlkörper hindurch, ohne mechanisch beansprucht zu werden. Dieser Effekt wird als Screening-Effekt bezeichnet: Der Feingutanteil entzieht sich den Stoß- und Scherbeanspruchungen (Gupta 2017).

Grobe Partikel können effektiv zerkleinert werden. Durch höhere Kontaktoberflächen kollidieren sie energetischer mit den Mahlkörpern. Der Mahlprozess von Grobgut wird durch die Mischung mit Feingutanteilen in einer heterogenen Partikelmatrix unterstütz. Das Gemisch bewirkt, dass die Feingutanteile die Grobgutanteile stabilisieren und die Wahrscheinlichkeit für eine kraftschlüssige Kollision erhöht wird (Gupta 2017).

- Füllgrad

Berechnet wird der effektive Füllgrad mit Formel (2). Parameter sind das Stahlkugelvolumen V_k, das Volumen der Probe (V_P), das Porenvolumen der Stahlkugeln ($\phi * V_K$) sowie das Trommelvolumen (V_T):

$$F = \frac{V_K + (V_P - \phi * V_K)}{V_T} * 100\ \% \qquad (2)$$

Der Füllgrad an reinen Mahlkörper wird in der Literatur mit $\phi_K = 0{,}2 - 0{,}45$ angegeben (Schubert 2002). Der in den Versuchen verwendetet Füllgrad liegt bei 0,27 für alle alternativen Zusatzstoffe.

- Umdrehungsgeschwindigkeit Trommel

Die Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommel ist ein zentraler Parameter für den Mahlerfolg. Auf die Mahlkörper wirken dabei zwei physikalische Kräfte. Zum einen die Zentrifugalkraft und zum anderen die Gravitation. Durch die Rotationsgeschwindigkeit der Trommel haftet der Mahlkörper an der Innenwand der Trommel. Übersteigt die radiale Komponente der Schwerkraft die Zentrifugalkraft, verliert der Mahlkörper die Haftung an der Innenwand und fliegt frei durch die Trommel (Zoz, Reichardt, und Kim 2001).

Grundsätzlich werden je nach Umdrehungsgeschwindigkeit vier verschiedene Kugelbewegungen innerhalb der Trommel unterschieden (Abbildung 1).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Kaskadenbewegung (1.) und die Kataraktbewegung (2.) zerkleinern die Partikel durch die kinetische Energie der Stahlkugeln. Bei zu hohen Umdrehungsgeschwindigkeiten wirkt die Zentrifugalkraft dominierend und die Partikel haften an der Innenwand der Trommel, es kommt zu keiner Zerkleinerung. Bei dem Schwingen (4.) ist die Umdrehungsgeschwindigkeit zu gering (Schubert 2002).

Ziel der folgenden Versuche ist es, eine Kataraktbewegung einzustellen. Diese bewirkt durch die kinetische Flugenergie der Stahlkugeln eine hohe Aufprallenergie und somit eine hohe Zerkleinerungsrate. Zudem muss die Umdrehungsgeschwindigkeit so gewählt werden, dass die Mahlkörper nicht in dem Trommelfutter, sondern in dem Stahlkugelpaket landen. Dies soll eine Beschädigung der Trommel bzw. einen zu hohen Fremdmaterialeintrag durch die Stahlkugeln in die Probe vermindern (Zoz, Reichardt, und Kim 2001).

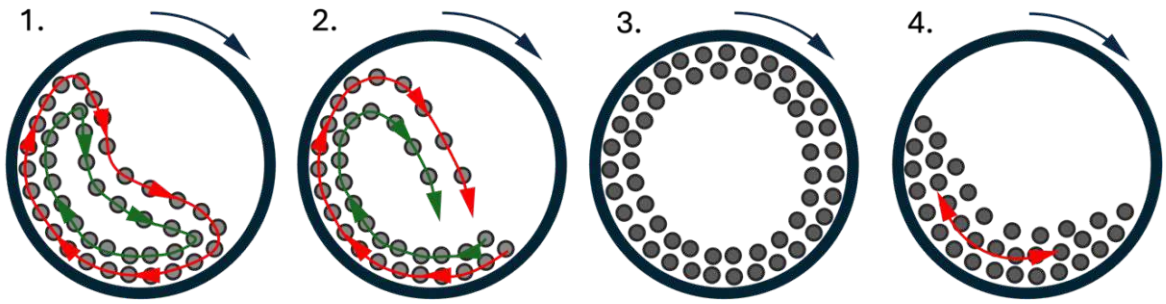

Abbildung 1: 1. Kaskadenbewegung; 2. Kataraktbewegung; 3. Zentrifuge; 4. Schwingen. Quelle: Daniel Lemmen

Die Literatur gibt eine Umdrehungsgeschwindigkeit von 60-80 % der kritischen Drehzahl n_k vor (Zoz, Reichardt, und Kim 2001). Die kritische Drehzahl n_k beschreibt den Übergang, ab welchem die Zentrifugalkraft die Gewichtskraft der Stahlkugel überschreitet und wie in Abbildung 1 zu sehen, Punkt 3 (Zentrifuge) der Kugelbewegung eintritt.

Die kritische Drehzahl n_K berechnet sich mit einer Konstante von 42,3 in Abhängig des Trommeldurchmessers D_T wie folgt mit Formel (3) (Schubert 2002):

$$n_k = \frac{42{,}3}{\sqrt{D_T}} \qquad (3)$$

Im Idealfall soll der Übergang zwischen Kaskaden und Kataraktbewegung realisiert werden. Zu hohe Drehzahlen >80 % n_k führen bei niedrigen Füllgraden <30 % zu einem Auftreffen der

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Stahlkugeln auf der Trommelwand. Das bewirkt eine starke Beanspruchung der Materialien und keine Zerkleinerung der Proben (Schubert 2002).

3 Material und Methoden

3.1 Probenmaterialien

3.1.1 Bettaschen (FB-IBA)

3.1.1.1 Herkunft

Die in dieser Arbeit verwendetet FB-IBAs (engl. fluidized bed incineration bottom ash) stammen aus zwei WS-MVAs (Wirbelschicht-Müllverbrennungsanlagen) in Österreich. Im Folgenden werden diese als FB-IBA A und FB-IBA B bezeichnet. Näheres über die Verbrennungsanlagen und den verwendeten Bettaschen kann der Veröffentlichung von (Mühl u. a. 2023) entnommen werden.

Zur weiteren Aufbereitung der FB-IBAs und Abtrennung der nicht mineralischen Bestandteile werden die Bettaschen der FB-IBA-Behandlungsanlage Firma Brantner Österreich GmbH in Hohenruppersdorf in Österreich zugeführt

Im Folgenden wird das Prozessschema der FB-IBA-Behandlungsanlage beschrieben und in Abbildung 2 dargestellt (Mika u. a. 2025).

1. Vorsortierung (trocken)

Das Input Material wird in einem Sieb mit 50 mm Maschenweite separiert. Das Material >50 mm durchläuft einen Magnetabscheider (Abtrennung Eisen) sowie eine manuelle Sortier-Kammer zur Entfernung grober Metalle und Nichtmetallstoffe. Anschließend wird das mineralische Material gebrochen, erneut einem Magnetabscheider zugeführt, um verbliebene, zuvor eingeschlossene Eisenteile zu entfernen und gemeinsam mit dem <50 mm Material dem Nassprozess zugeführt (Mika u. a. 2025).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

2. Nassprozess

Eine Setzmaschine (engl. Jigger), die mit Wasser betrieben wird, trennt das Material mittels Dichtetrennung in:

- Schwimmende Fraktion
- Feinkorn (0-4 mm) → Hydrozyklon
- Leichtfraktion (4-50 mm) → Wirbelstromabscheider
- Schwerfraktion (4-50 mm)

Der Hydrozyklon trennt in <0,1 mm sowie 0,1-4 mm Material. Die Fraktion <0,1 mm wird in einem Sedimentationsbecken als Schlamm ausgetragen. Die 0,1-4 mm Leichtfraktion wird in einem Fine Slag Treatment Plant (FSTP) behandelt. Die FSTP trennt in eine Schwermetall-Nicht-Eisen-Metallfraktion und eine Magnetische Fraktion. Die restliche Leichtfraktion (0,1-4 mm) wird zusammen mit der Leichtfraktion (4-50 mm) aus dem Jigger einem Wirbelstromabscheider (ESC) zugeführt (Mika u. a. 2025).

3. Trockenprozess

Die Leichtfraktion wird von Aluminium und gemischten Nichteisenmetallen in einem Wirbelstromabscheider abgetrennt. Anschließend wird das Material auf 9 mm gesiebt. Aus dem Material >9 mm wird sensorbasiert Glas rückgewonnen. Dabei werden detektierte Glasscherben mittels Druckluft aus dem Mineralstrom sortiert. Die Mineralik >9 mm wird dem Input Strom >50 mm wieder zugeführt. Aus dem Material <9 mm werden erneut mittels Magneten sowie Wirbelstromabscheider verbliebene Metalle gewonnen. Zurück bleibt eine Mineralfraktion (Bettasche), aus welcher Metalle und Glas>9 mm entfernt werden (Mika u. a. 2025).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

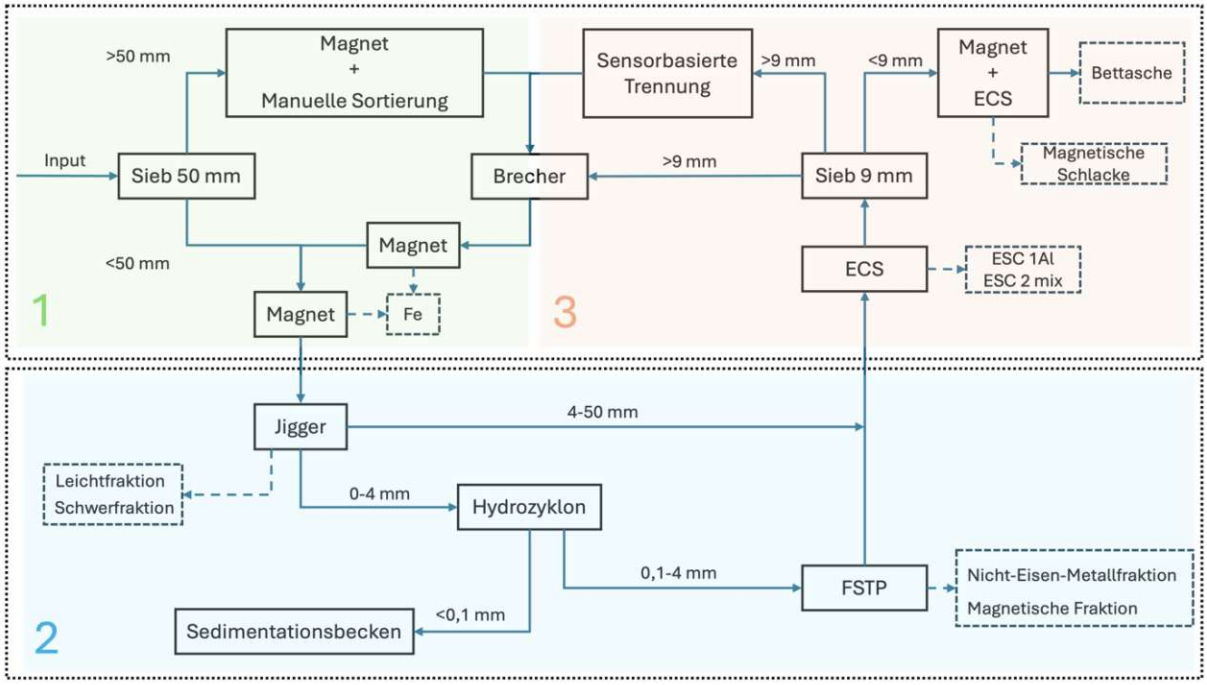

Abbildung 2: Schema FB-IBA Behandlungsanlage. Adaptiert: (Mika u.a. 2025)

3.1.1.2 Probennahme und Lagerung

Die FB-IBA-Proben werden gemäß (Lederer u. a. 2024) beprobt (Abbildung 3). Das Material mit der Korngröße 0-8 mm wurde alle 5-6 min für ca. 5-10 sec mit einem Radlader aus dem Materialstrom am Förderband beprobt. Die Beprobung läuft ca. 3 h lang, anschließend wurden die Inkremente zu einer Mischprobe von ca. 500 kg zusammengeführt. Die Mischprobe wurde durch inkrementierendes Schaufeln geteilt. Die Hälfte wurde in Alterungsboxen unter freier Witterung 3 Monate lang gealtert. Der Alterungsprozess bewirkt die Bindung von freiem Kalk mit CO_2 aus der Luft, einen veränderlichen pH-Wert und eine Stabilisierung von potenziell umweltschädlichen Schwermetallen. Zudem wird durch Regen Salze wie Chlor und Sulfat herausgewaschen (Huber, Jaros, und Lechner 1996)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 3: Beprobung FB-IBA mit Radlader; Mischprobe. Quelle: Simon Mika und Julia Mühl

Diese Arbeit beschäftigt sich unter anderem mit zwei verschiedenen Bettaschen aus zwei österreichischen Aufbereitungsanlagen. Zum Zweck der Arbeit wurden die Proben auf Laborprobengröße geteilt. Zusätzlich wurden verschiedene Kornbänder je Asche untersucht, mit jeweils 0-8 mm und 0-2 mm. Letztere wurde durch Sieben im Labor hergestellt. In Tabelle 3 werden die FB-IBAs in Probennamen definiert und deren Körnung angegeben.

Tabelle 3: Probenbezeichnung Bettaschen (FB-IBA)

Herkunft	*Kürzel*	*Körnung [mm]*
WS-MV A	FB-IBA A-08	0-8
	FB-IBA A-02	0-2
WS-MVA B	FB-IBA B-08	0-8
	FB-IBA B-02	0-2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.1.2 Zementstein aus Betonabbruch (RC-ZS)

Der Betonabbruch hat einer Körnung von 0-16 mm und erfüllt die ÖNORM B3140 zur Verwendung in Dränsystemen. Die Beprobung erfolgte vom Haufwerk der Lagerstätte (Abbildung 4).

Abbildung 4: Lagerstätte Recyclinggesteinskörnung für RC-ZS der Firma Wopfinger Transportbeton GmbH. Quelle: Jakob Lederer

Gelagert wird die Recyclinggesteinskörnung von der Firma Wopfinger Transportbeton GmbH in Wien, Österreich. Die Probe Betonabbruch (Recyclierter Zementstein) wird in der Arbeit wie folgt bezeichnet (Tabelle 4):

Tabelle 4: Probenbezeichnung durch Autogenmahlung hergestellte Feinfraktion aus Betonabbruch, welche überwiegend aus Zementstein besteht (RC-ZS)

Herkunft	*Kürzel*	*Körnung [mm]*
Wopfinger GmbH	RC-ZS	0-16

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

3.1.3 Pyrolysekoks (PK)

Pyrolysekoks wird aus einer Pilotanlage (Abbildung 5) der TU Wien (Institut für Verfahrenstechnik) gewonnen. Als Rohstoffquelle dienen Holz-Hackschnitzel (entsprechen ISO 17225-4), welche mit einer luftgeblasenen Vergasung in einem 50 kWth Down-Draft-Festbettvergaser thermochemisch umgesetzt werden. Der Downdraft-Festbettvergaser mit zweistufiger Luftversorgung erzeugt durch den sekundären Luftstrom eine oxidative Pyrolysezone, welche die Entgasung und Koksbildung fördern. Das Pyrolysekoks verbleibt als Rückstand im Reaktor und besteht aus nicht umgesetztem Kohlenstoff. Das Produktgas aus der Luftvergasung wird anschließend in verschiedenen Aufbereitungsprozessen gereinigt (Gubin u. a. 2025).

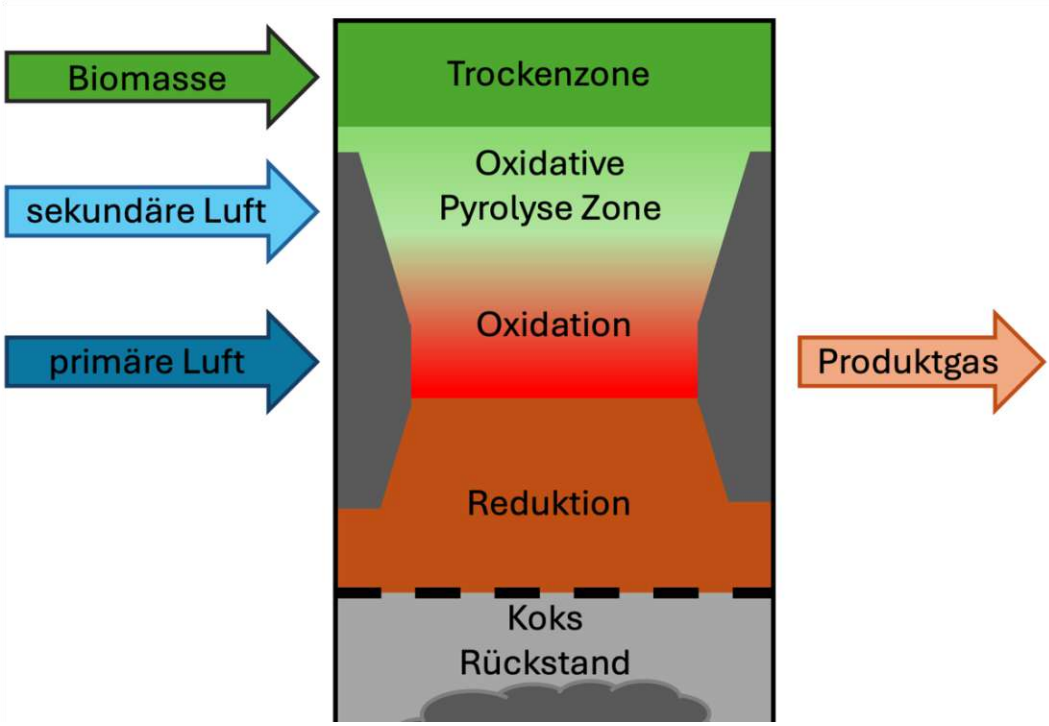

Abbildung 5: Darstellung Down-Draft-Festbettvergaser. Adaptiert: (Gubin u. a. 2025)

Das Pyrolysekoks wir in der Arbeit wie folgt bezeichnet:

Tabelle 5: Probenbezeichnung Pyrolysekoks (PK)

Herkunft	*Kürzel*	*Körnung [mm]*
TU Wien; Institut für Verfahrenstechnik	PK	0-8

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

3.2 Mechanische Aufbereitung

3.2.1 Backenbrecher

Das Probenmaterial wird zunächst mit einem Backenbrecher ähnlich des Typen BB 200 der Firma Retsch GmbH vorzerkleinert (Abbildung 6).

Abbildung 6: Backenbrecher Firma Retsch GmbH Typ BB 200. Quelle: Daniel Lemmen

3.2.2 Trommelmühle

- Anlagenbeschreibung

Zur weiteren Zerkleinerung der Probenmaterialien wird ein Standard Topfroller Typ TR 12 der Firma ANTHRATEC GmbH verwendet. Als Behälter dient ein Zylindrischer 5 Liter Mahltopf. Der Mahltopf wird mit Antriebsringen aus Gummi versehen, um die Kraftübertragung der Antriebswelle auf den Mahltopf zu gewährleisten (Abbildung 7).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 7: Standard Topfroller Typ TR 12. Quelle: Daniel Lemmen

Die Parameter werden unter anderem mittels eines Datenblatts der Firma Retsch GmbH festgelegt. In dem Datenblatt wird eine Trommelmühle mit einem Gesamtvolumen von 150 Litern betrieben. Das verwendete Material ist IBA und mit den Eigenschaften der in dieser Arbeit verwendeten FB-IBAs vergleichbar. Die Parameter der Firma Retsch GmbH sind wie folgt (Retsch GmbH 2024):

- Mahlkugeln (20 mm ø): 80 kg
- Feed: 25 kg
- Isopropanol: 10 ml
- Ziel: 85 % des Feeds unter 0,075 mm
- Umdrehungsgeschwindigkeit der Trommelmühle: 50 rpm

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Mahlkörper

Im Rahmen der Versuche werden verschiedene Mahlkörper für Zerkleinerungsprozesse verwendet. Zur Verfügung stehen 30 mm, 20 mm und 10 mm ø Stahlkugeln. Für alle Versuchsreihen werden dieselben zeitlichen, sowie Kugel/Proben-Verhältnisse gewählt. Folgende Kugel-Konfigurationen werden geprüft (Tabelle 6):

Tabelle 6: Trommel-Konfigurationen Kugeln

Durchgänge	*1*	*2*	*3*	*4*	
Zeit [h]	12	12	12	4	8
Kugel [mm]	20	30	30+10	30	10

Die Kugelmasse wird auf 6,6 kg abgewogen. Durchgang 3 wird mit einer Kugelmischung aus 30 mm und 10 mm Stahlkugeln betrieben. Das Mischverhältnis beträgt 7:3 gemäß eines Artikels über Mahlparameter in einer Trommelmühle um Kohlenbodenasche zu zerkleinern (Cheah u. a. 2023).

In Durchgang 4 wird vorerst mit 30 mm Stahlkugeln für 4 h vorzerkleinert und anschließend mit 10 mm nachzerkleinert.

- Füllgrad

(Zoz, Reichardt, und Kim 2001) empfehlen einen Füllgrad der Trommel zwischen 40-70 %. Dabei wird von einer Probendichte von 2500 g/l, einer Kugeldichte von 7900 g/l und einem Porenvolumen der Kugeln von 25,7 % ausgegangen.

In dieser Arbeit wird gemäß des Datenblatts der Firma Retsch GmbH ein Füllgrad von 27 % realisiert (Retsch GmbH 2024). Im Zuge dieser Arbeit wird der Füllgrad von 27 % nicht verändert. Grund dafür sind anfänglich der Arbeit fehlende Mahlhilfen (Menge an 10 mm ø Stahlkugeln) und gute Mahl-Ergebnisse.

- Umdrehungsgeschwindigkeit Trommel

Die Realisierung der optimalen Umdrehungsgeschwindigkeit wird in den folgenden Versuchen optisch sowie rechnerisch mittels Formel (3) bestimmt. Dazu wird eine Trommelmühle mit den Stahlkugeln und der Probe befüllt. Anschließend wird die Trommelmühle mit offenem Deckel auf der Gerätschaft in Bewegung gesetzt. Die Umdrehungsgeschwindigkeit wird so weit erhöht, bis eine Kaskaden- bzw. Katarakt- ähnliche

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Bewegung zu erkennen ist. Die optimale Drehzahl wird hier bei ca.60 rpm beobachtet. Rechnerisch ergibt das ein einen Wert von ca. 70 % der kritischen Drehzahl für die Trommelmühle, bei einem Füllvolumen von ca. 27 %.

3.2.3 Siebturm

Zur Analyse der Trennkorngrenzen der Proben kommt die Analysesiebmaschine-HAVER EML 450 digital plus- der Firma Haver und Boecker zum Einsatz (Abbildung 8). Als Analysesiebe werden die Nennmaschenweiten von 0,063-8 mm der gleichnamigen Firma verwendet. Die Analysesiebe sind nach DIN ISO 3310-1 ausgelegt, bestehen aus Edelstahl und haben einen Durchmesser von 400 mm.

Die Siebböden stehen auf einer schwingend gelagerten Grundplatte. Die Platte wird mittels eines Bedienelements angesteuert und kann in der Dauer bzw. Intensität variiert werden. Unter dem 0,063 mm Siebboden steht ein Auffangboden, welche den gezielten Feingutanteil <0,063 mm auffängt.

Abbildung 8: Analysesiebmaschine -HAVER EML 450 digital plus- der Firma Haver und und Boecker. Quelle: Daniel Lemmen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zur Unterstützung des Siebens werden Siebhilfen eingesetzt. Diese sollen verklemmte Partikel in den Sieböffnungen befreien. Hierfür werden jeweils sieben Gummibälle, mit einem Durchmesser von 3 cm, in den Auffangboden, das 0,063 mm und 0,125 mm Sieb gegeben.

Nach DIN 66165-1 sollte davon jedoch abgeraten werden. Mechanische Siebhilfen sorgen für eine potenzielle Schädigung der Siebböden bzw. nicht erwünschte Zerkleinerung des Siebgutes. Alternativ wird empfohlen oberflächenaktive Stoffe zu verwenden, bspw. Tenside, hochdisperse Kieselsäuren oder Aktivkohlestoffe. In dieser Arbeit wird auf Siebhilfen nicht verzichtet, aufgrund von auftretenden Agglomeraten, welche durch diese vermindert werden.

3.3 Analytische Methoden

3.3.1 RFA

Die RFA-Analyse gilt der Bestimmung von Massenanteilen an Grundelementen. Im Fokus stehen dabei Oxidische Formen von Silizium, Calcium, Magnesium und Eisen. Methodisch werden die Proben, mit der Partikelgrößenverteilung von <0,063 mm, mit einem Röntgen-Fluoreszenz-Analyse-Gerät (RFA) analysiert. Anhand eines Dreiphasendiagramms sollen die potenziellen alternativen Zusatzstoffe eingeordnet werden und mit Grenzwerten üblicher Zumahlstoffe verglichen werden, da es keine DIN-Normen für die untersuchten Materialien (Bettasche, Zementstein, Pyrolysekoks) gibt.
Als Röntgen-Fluoreszenz-Analysator wird das tragbare Modell NITON XL3t der Firma Fischer SCIENTIFIC verwendet (Abbildung 9).

Das RFA-Gerät wird auf einem Thermo Fisher SCIENTIFIC Testständer installiert. Mittels Röntgenstrahls aus einer Au-Anoden-Röhre (max. 50 kV, 200 µA) werden die zu analysierenden Materialien angeregt. Die Fluoreszenz-Röntgenstrahlen werden mit einem Halbleiter Detektor gemessen. Eine Software identifiziert die Elemente. Von Werksseite wird ein definierter Kalibriermodus „TestALL-Geo“ verwendet (Stand: 16.02.2022). Dieser ermöglicht die Detektion von 43 Elementen (Aluminium bis Uran).
Die Probe wird in kleine, mit Folie verschlossene zylindrische Behälter gefüllt (Abbildung 9). Der Testständer besitzt zusätzlich eine verdunkelnde Klappe, die verschlossen wird. Anschließend kann die Probe gemessen werden. Jede Probe wird 3-mal in Folge gemessen und die daraus resultierenden Messergebnisse werden gemittelt und ausgewertet.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 9: RFA-Gerät und Probenbehälter. Quelle: Daniel Lemmen

In dieser Arbeit werden ausschließlich die Elemente Ca, Fe, Al, Si und Mg diskutiert. Die übrigen Elemente sind in einer Tabelle im Anhang gelistet (Tabelle 31). Zusätzlich werden im Anhang Schwermetallanalysen aus (Mühl u. a. 2023) von FB-IBA A und FB-IBA B angegeben, jedoch in dieser Arbeit nicht diskutiert (Tabelle 32).

3.3.2 Mastersizer

Für die Bestimmung der Partikelgrößenverteilung <0,063 mm wir ein Laserdiffraktometer vom Typ Mastersizer 2000 der Firma Malvern Panalytical Ltd. verwendet (Abbildung 10). Das Laserdiffraktometer besitzt eine Trockendispergiereinheit (Scirocco 2000) (links im Bild), welche in den folgenden Versuchen verwendet wird, sowie eine Nassdispergiereinheit (rechts im Bild). Die Messung beruht auf dem Prinzip der Laserbeugung (Mie-Theorie).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 10: Laserdiffraktometer Typ Mastersizer 2000 der Firma Malvern Panalytical Ltd.. Quelle: Daniel Lemmen

Die Partikel werden in einer Zuführrinne mit Vibrationseinheit fein verteilt und über diese dem Messgerät kontinuierlich zugeführt (Abbildung 11). Der Trockenzerstäuber Sciocco 2000 dispergiert die Partikel mit einem Luftdruck von ca. 2 bar unter kontrollierten Bedingungen bei Raumtemperatur.

Abbildung 11: Zuführrinne mit Vibrationseinheit Mastersizer. Quelle: Daniel Lemmen

Zur korrekten Berechnung der Partikelgrößenverteilung nach der Mie-Theorie werden die Materialeinstellungen für die Software gewählt. Für die Proben wird das Materialprofil „Zement“ ausgewählt. Der dabei eingestellte Brechungsindex, welcher die Lichtbrechung des Probenmaterials angibt, liegt bei 1,68. Die eingestellte Absorption des Lichts durch die Probe bei 0,1.

Die mathematische Beschreibung der Streulichtdaten wird mit dem Modell: „Universal-erhöhte Empfindlichkeit“ durchgeführt. Das Modell ist für gemahlene und natürlich vorkommende Proben geeignet, somit auch für Bettaschen, Pyrolysekoks und Zementstein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Die Probezeit wird auf 12 sec festgelegt und das System erfasst insgesamt 12.000 Einzelmessungen. Um die gerätebedingte Streuung des Gerätes zu erfassen und später aus den Ergebnissen herauszurechnen, wird der Hintergrundmessung ohne Probe auf 12 sec und 12.000 Einzelmessungen festgelegt.

Die zu prüfenden Proben sind auf <0,063 mm gesiebt. Die Partikelgrößenverteilung wird als Volumenanteil im Bereich zwischen 0,02 µm bis 2000 µm aufgezeichnet. Das System gibt die d10, d50, d90 sowie die spezifischen Oberflächen der Proben wieder.

3.3.3 Festigkeitsmessung

- Betonrezepturen

Die Probenkörper für die Druckfestigkeitsmessungen werden anhand folgender Rezepturen hergestellt (Tabelle 7, Tabelle 8, Tabelle 9). Der Portlandzement (CEM II/A-L mit normaler Festigkeitsentwicklung (42,5 N/mm^2)) wird mit dem alternativen Zusatzstoff substituiert.

Die Rezeptur besteht aus Portlandzement (CEM II/A-L 42 N), alternativer Zusatzstoff, verschiedene Körnungen der natürliche Gesteinskörnungen (NGK [mm]) sowie Wasser. In allen Mischungen werden 20 m-% des Trockengewichts des Portlandzements durch die jeweiligen alternativen Zusatzstoffe ersetzt.

- Rezeptur 1/2 umfasst die Probenmischung aus FB-IBA A-02 und FB-IBA B-02 zu dem Probenkörper **P_FB-IBA-02** sowie FB-IBA A-09 und FB-IBA B-08 zu dem Probenkörper **P_FB-IBA-08**. Die Bettaschen werden in einem 50:50 Mischverhältnis zugemischt.

Tabelle 7: Rezeptur P_IBA-02 und P_IBA--08

Rezeptur Nr.		*1*		*2*	
Bezeichnung		P_IBA-02		P_IBA-08	
Beton gesamt		51		51	
CEM II/A- 42,5 N		4,93		4,93	
AHWZ		FB-IBA A-02	FB-IBA B-02	FB-IBA A-08	FB-IBA B-08
	kg	0,65	0,65	0,65	0,65
NGK 0-4		22,16		22,16	
NGK 4-16		10,68		10,68	
NGK 16-32		8,21		8,21	
Wasser		3,71		3,71	

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Rezeptur 3 umfasst den Probenkörper **P_RC-ZS** mit RC-ZS

Tabelle 8: Rezeptur P_RC-ZS

Rezeptur Nr.		*3*
Bezeichnung		P_RC-ZS
Beton gesamt		51,00
CEM II/A-L 42,5 N		4,93
AHWZ	kg	1,31
NGK 0-4		22,16
NGK 4-16		10,68
NGK 16-32		8,21
Wasser		3,71

- Rezeptur 4 umfasst den Probenkörper **P_IBA-PK** aus FB-IBA A-08/FB-IBA B-08/PK, welche in einem 25:25:50 Mischverhältnis zugemischt werden.

Tabelle 9: Rezeptur P_IBA-PK

Rezeptur Nr.		*4*		
Bezeichnung		P_IBA-PK		
Beton gesamt		51		
CEM II/A-L 42,5 N		4,93		
AHWZ		FB-IBA A-08	FB-IBA B-08	PK
	kg	0,33	0,33	0,65
NGK 0-4		22,16		
NGK 4-16		10,68		
NGK 16-32		8,21		
Wasser		3,71		

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die Schritte zum Betonieren der Probenkörper werden nach DIN EN 12390-2 „Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen“ durchgeführt. Im Folgenden werden diese beschrieben.

- Anmischen

Zum Mischen der Bestandteile wurde ein Zementmischer Typ CEM 60 S der Firma Ammann Elba Beton GmbH mit einem Fassungsvermögen von 60 Litern, 7,3 kW Nennleistung aus dem Jahr 2019 verwendet (Abbildung 12 a.).

Die trockenen Bestandteile des Betons wurden in dem Zementmischer bei 5 rpm für kurze Zeit vermengt (Abbildung 12 b.). Anschließend wurde das Wasser langsam und kontinuierlich hinzugegeben (Abbildung 12 c.). Nachdem alle Bestandteile des Betons zugegeben wurden, wurde die Drehzahl für 1 min auf 16 rpm erhöht.

Abbildung 12: a. Zementmischer b. trockene Bestandteile c. Wasser einfüllen. Quelle: Daniel Lemmen

Der fertig angerührte Beton wurden nach DIN EN 12390-1 in genormte, eingeölte Prüfformen der Maße 150x150x150 mm gefüllt (Abbildung 13 a.). Zum Verdichten wurde die befüllte Prüfform auf einem Rütteltisch platziert und unter Anpressdruck verdichtet (Abbildung 13 b.). Zu beachten ist, dass die Prüfform randvoll zu füllen ist, um später die genormten Maße für die Druckfestigkeitsprüfung zu erreichen. Die Prüfform verweilte anschließend auf dem Rütteltisch bis keine Luftblasen mehr aus der Betonmasse austreten. Zuletzt wurden die Formen mit einem Zettel beschriftet und mit einer PE-Folie abgedeckt, um nicht auszutrocknen (Abbildung 13 c.).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

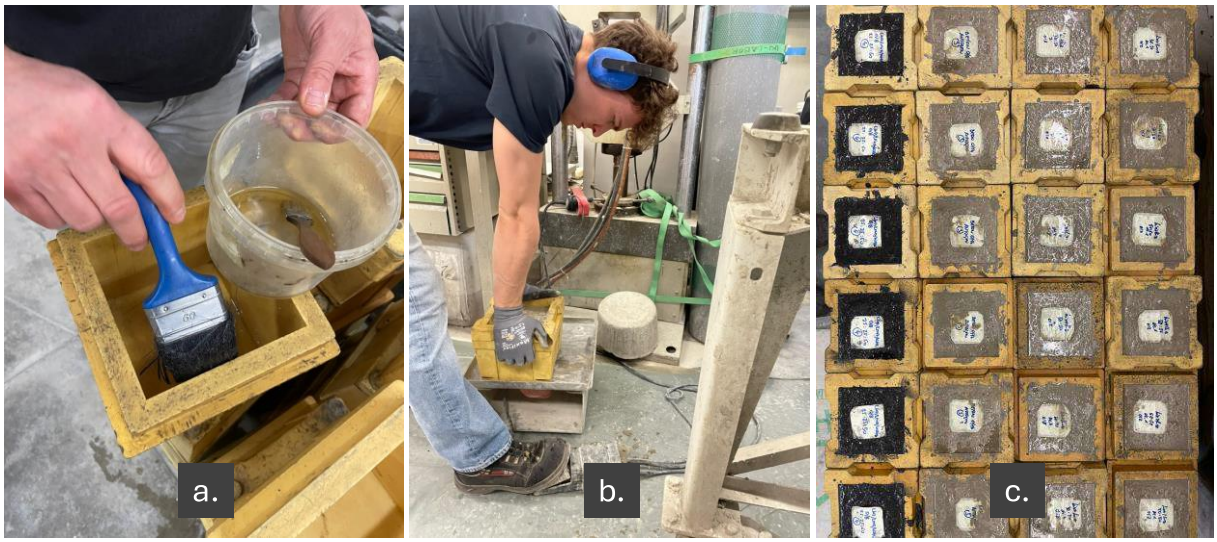

Abbildung 13:a. Einölen der Prüfform b. Rütteltisch c. beschriftete Proben. Quelle: Daniel Lemmen

- Ausschalen

Nach (24 ± 2) h (Lagerung bei 15-22°C) wurden die angetrockneten Probenkörper aus der Prüfform ausgeschalt (Abbildung 14 a.). Dazu wird der Gummi-Pfropfen an der Unterseite der Prüfform entfernt und mit einer Druckluftpistole möglichst vertikal Druckluft eingebracht. Die Druckluft löst den Probenkörper von der Innenwand der Prüfform und kann so möglichst spannungsfrei ausgehoben werden. Zuletzt werden die Probenkörper mit einem Bleistift zerstörungsfrei beschriftet (Abbildung 14 b.). Gelagert werden die Probenkörper in einem Wasserbad aus Leitungswasser (20 ± 2) °C. Die Probenkörper müssen min. 5 cm unter der Wasserlinie sein, um durch Verdunstungsprozesse des Wasserbeckens nicht in Kontakt mit der Umgebungsluft zu geraten (Abbildung 14 c.). Alternativ kann auch auf einem Lattenrost in einer Feuchtkammer bei (20 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchte von ≥ 95 % gelagert werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 14: a. Ausschalen Probenkörper b. Probenkörper c. Wasserbad. Quelle: Daniel Lemmen

- Prüfzeit

Die Probenkörper werden einer Druckfestigkeitsprüfung unterzogen. Dazu werden pro Versuchsreihe 3 Probenkörper nach 28 Tagen und 56 Tagen aus dem Wasserbad entnommen und mit einem hydraulischen Pressen geprüft.

- Druckfestigkeitsprüfung

Die Druckfestigkeitsprüfung erfolgt nach DIN EN 12390-3 „Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern“. Die Probekörper müssen innerhalb von 10 h nach Entnahme aus der Lagerung geprüft werden.

Vor der Prüfung wird die notwendige Waage mittels normgerechter Gewichte geeicht. Anschließend können die Probekörper auf Normmaß kontrolliert und gewogen werden (Abbildung 15 a. & b.). Alle Probenkörper, die außerhalb der definierten Fläche in Abbildung 15 c liegen, werden in der Druckfestigkeitsberechnung mit den tatsächlichen Lasteintragungsflächen berechnet. Die Norm DIN EN 12390-1 regelt die Abweichungen der 150 mm Probenkörper:

- Zwischen den Formflächen ist eine Abweichung von 1 % zulässig
  - 150 mm: ± 1,5 mm
- Die Druckflächen dürfen eine maximale Welligkeit von 0,0006*Durchmesser haben
  - 150 mm: 0,09 mm
- Die Rechtwinkligkeit darf eine maximale Abweichung von 0,5 mm haben

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Entsprechen die Würfel den 150 mm und weichen innerhalb der Norm ab (148,5 mm bzw. 151,5 mm) kann die Druckfestigkeit [MPa] ohne weiteres berechnet werden. Sind die Kantenlängen außerhalb der Toleranz, muss dies nach DIN EN 13791 dokumentiert werden und die tatsächliche Lasteintragungsfläche berechnet werden. Anschließend wird die Druckfestigkeit f_c mit der Bruchkraft F und der Lasteintragungsfläche A berechnet Formel (4):

$$f_c = \frac{F}{A} \tag{4}$$

Die Prüfeinrichtung muss eine Temperatur von (20 ± 5) °C ((25± 5) °C bei warmem Klima) haben. Die Druckplatten der Prüfeinrichtung sind vollständig vor jeder Prüfung gründlich zu reinigen. Die Probenkörper werden mit einem Tuch von überschüssiger Flüssigkeit befreit und anschließend mit den Flachen Kanten zwischen den Druckplatten mittig platziert (Abbildung 15 c.). Nach Norm darf die Abweichung von der Mitte der Druckplatten nicht größer als 1 % der angegebenen Kantenlänge der Probenwürfel sein.

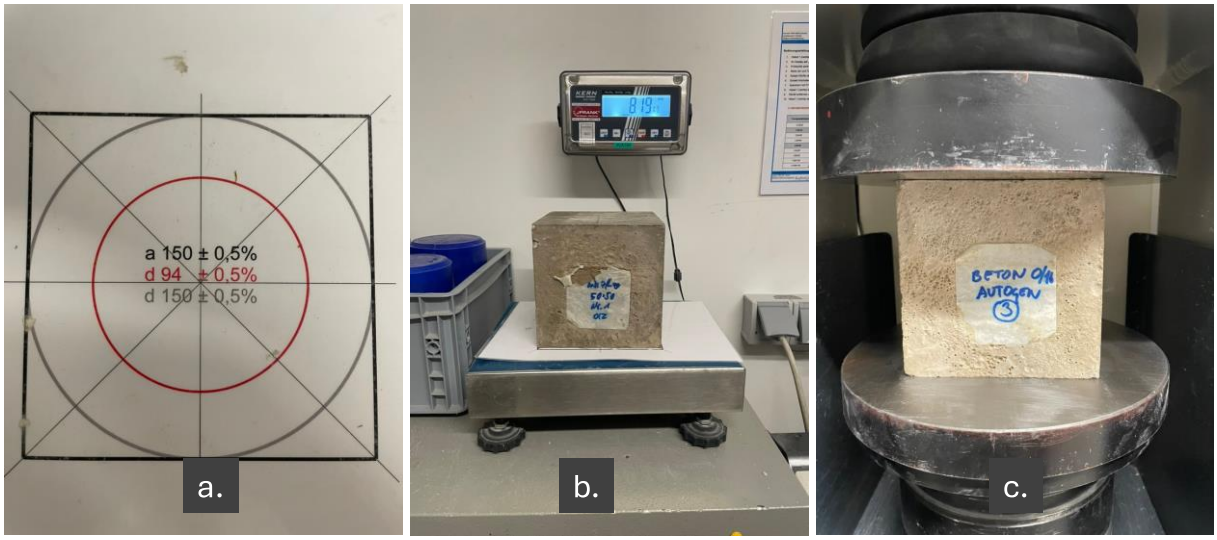

Abbildung 15: a. Normmaß quadratische Probenkörper b. Waage c. Prüfeinrichtung. Quelle: Daniel Lemmen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Die Probenkörper werden mit einer Belastungsgeschwindigkeit von (0,6 ± 0,2) MPa/s belastet. Vor der eigentlichen Belastung wird der Probenkörper mit einer Ausgangsbelastung von ≤30 % der Bruchlast belastet. Dies zielt darauf ab, die zentrierte Lagerung des Probenkörpers sowie den vollständigen Kontakt der glatten Würfelflächen sicher zu stellen. Während der stoßfreien Belastung darf die eingestellte Geschwindigkeit ± 10 % bis zur Höchstlast schwanken.
Nach Erreichen der maximalen Last werden einzelne Probenkörper überlastet, um ein typisches Bruchmuster erkennen zu können (Abbildung 16 a,b.).

Abbildung 16: Überlast Probenkörper a. Zementstein b. Pyrolysekoks. Quelle: Daniel Lemmen

Die Ergebnisse werden in einem für die Druckfestigkeitsprüfung entworfenen Auswertungsbogen notiert. Die ausgefüllten Prüfberichte sowie die dargestellten Ergebnisse sind in Anhang ab Abbildung 45 zu finden.

- Prüfbericht

Der folgende Abschnitt gibt den Umfang eines Prüfberichts nach DIN EN 12390-3 Abschnitt 9 wörtlich wieder und wird so in der Auswertung und Diskussion 4.4 „Prüfung Festbeton-Druckfestigkeit“ angewendet.

a) Verweisung auf die vorliegende Norm
b) Bezeichnung des Probekörpers
c) Beschaffenheit der (des) Probekörper(s) bei Erhalt (falls zutreffend)
d) Nennmaße des Probekörpers oder, falls nach Anhang B geprüft wurde, die tatsächlichen Maße

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

e) Einzelheiten des Abschleifens oder Abgleichens (wenn zutreffend)

f) Datum der Prüfung

g) Höchstlast beim Bruch, in kN

h) Druckfestigkeit des Probekörpers auf 0,1 MPa (N/mm2) gerundet

i) nicht zufriedenstellendes Bruchbild (wenn vorhanden), unter Angabe des ähnlichsten Bruchbildes

j) jegliche Abweichungen vom genormten Prüfverfahren

k) Erklärung der für die Prüfung in technischer Hinsicht verantwortlichen Person, dass die Prüfung mit Ausnahme der in j) enthaltenen Angaben nach diesem Dokument durchgeführt wurde

l) Alter des Probekörpers zum Zeitpunkt der Prüfung (sofern bekannt). Der Bericht darf enthalten

m) die Masse des Probekörpers, in kg

n) Rohdichte des Probekörpers nach EN 12390-7, auf 10 kg/m3 gerundet

o) Lagerbedingungen seit Erhalt

p) Temperatur der Prüfeinrichtung zum Zeitpunkt der Prüfung

q) Zeitpunkt der Prüfung (wenn erforderlich)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4 Auswertung und Diskussion

4.1 Mechanische Aufbereitung

4.1.1 Mahlprozess

4.1.1.1 Mahlparameter

Die Mahlparameter orientieren sich nach dem Report der Firma (Retsch GmbH 2024). Der Füllgrad in dem Report liegt bei ca. 25,7 %. In den ersten Versuchen dieser Arbeit wird mit einem Füllgrad von ca. 35 % gearbeitet. Die Ausbeute an Feingutanteil ist sehr gering. Um dem entgegenzuwirken, wird der Füllgrad auf ca. 27% angepasst, ohne das Verhältnis von Kugel/Probe zu verändern. Dadurch kann die Ausbeute gesteigert werden.

Um die Effizienz des Mahlens genauer zu testen, wird empfohlen Versuchsreihen durchzuführen, welche sich an der allgemeinen Literatur orientieren und bereits in Kapitel 3.2.2 erwähnt werden. Im Zuge dieser Arbeit wird der Füllgrad von 27 % nicht mehr verändert. Grund dafür sind fehlende Mahlhilfen (Menge an 10 mm ø Stahlkugeln) und gute Ergebnisse in den Vorversuchen.

Zur effektiven Zerkleinerung werden Stahlkugeln mit den Durchmessern (ø) 30 mm, 20 mm und 10 mm verwendet. Es stellt sich in den Versuchen heraus, dass die Konfiguration: 4 h 30 mm ø und 8 h 10 mm ø am effektivsten ist (Tabelle 4). Dies beruht auf physikalischen Zusammenhängen zwischen Kugelmasse, Kontaktfläche und übertragener Energie. Große Kugeln (30 mm ø) erzeugen aufgrund Ihrer Masse, verglichen mit 10 mm ø Stahlkugeln, eine höhere Aufprallenergie. Dies ist vor allem in Bezug auf die Zerkleinerung von Grobgut wichtig. Die Sieblinien, ausgewertet in Kapitel 4.2 zeigen, dass bereits nach 4 h mahlen, nahezu vollständig das Grobgut zerkleinert ist. Kleiner Stahlkugeln (10 mm ø) besitzen dagegen eine höhere spezifische Oberfläche und führen zu einer größeren Zahl effektiver Kontakte (Hirosawa, Iwasaki, und Iwata 2021). Hirosawa, Iwansaki und Iwata beschreiben diese physikalischen Zusammenhänge in Simulationen mit einer Planetenmühle. Trotz abweichender Mühlentechnik lassen sich die grundlegenden Mechanismen vergleichen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.2 Sieben

4.2.1 Vorversuche Sieblinie

Um die Siebparameter der alternativen Zusatzstoffe zu definieren, wurden mit der Probe FB-IBA B-08 Vorversuche durchgeführt. Im Laufe der Siebversuche konnte festgestellt werden, dass es immer wieder zu Agglomerationen, vor allem ab Partikelgrößen unter 0,25 mm, gekommen ist. Abbildung 17 zeigt kleine bis zu ca. 5 mm große Agglomerate. Zudem konnte auf den Siebhilfen eine stark anhaftende Schicht beobachtet werden. Es wird angenommen, dass die Agglomerate aus feinen Partikeln, kleiner der Maschenweiten 0,25 bzw. 0,125 mm zusammengesetzt sind und so für ein verzerrtes Ergebnis der Siebanalyse sorgen. Die Vorversuche dienen der Zerstörung der Agglomerate.

Abbildung 17: Agglomerate auf den Sieben mit Maschenweite 0,25 mm-0,063 mm. Quelle: Daniel Lemmen

Ursachen für Agglomerationen können vielfältig sein. Hier sind Adhäsionskräfte von trockenen feinen Schüttgütern von zentraler Bedeutung.

- Adhäsionskräfte

Vor allem bei Partikelgrößen nahe 0,1 mm übersteigen interpartikuläre Haftkräfte die Gewichtskräfte und es kommt zu Adhäsionen (Kleinschmidt und Tomas 2009).

Um die Adhäsionskräfte zu verringern, wird in der ersten Versuchsreihe mit Isopropanol als Dispersionsmittel gearbeitet. Geringe Mengen an Dispersionsmittel sorgen in feinen, trockenen und kohäsiven Schüttgütern für eine veränderliche Oberflächenbeschaffenheit.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Isopropanol hat eine geringe Dielektrizitätskonstante von $\varepsilon = 18$. Dies sorgt für höhere elektrostatische Anziehungen, aber verändert die Oberflächenphysik so, dass auch abstoßende Wechselwirkungen entstehen können, welche wiederum zu Desagglomeration führen (Stojimirovic, Galli, und Trefalt 2020).

Die Firma Retsch GmbH verwendet in Zerkleinerungsprozessen von Bettasche 0,04 m-% Isopropanol bezogen auf das Trockengewicht der Probenmenge (Retsch GmbH 2024). Bei dieser geringen Menge an Isopropanol, kann, für die Probe FB-IBA B-08, kein merklicher Unterschied in den Agglomerationen festgestellt werden.

In der Literatur wird eine Menge von Dispersionsmittel zwischen 0,001-0,1 -%, bezogen auf die Trockenmasse der Probe, empfohlen (DETELLIS u. a. 2018).

Für die folgenden Versuchsreihen, welche im Abstand von 2-4 h gesiebt werden, wird nach jedem Siebdurchgang 1 ml Isopropanol hinzugegeben. Es kann beobachtet werden, dass ab der Menge von 2 ml (ca. 0,076 m-% bezogen auf die Zementtrockenmasse) ein leichter Unterschied zu erkennen ist. Wie in Abbildung 18 zu sehen, bilden sich durch die Zugabe von Isopropanol weniger stark anhaftende Schichten auf den Siebhilfen. Zudem ist der Feingutanteil optisch feiner und nicht zusammengeklumpt wie auf dem rechten Bild.

Abbildung 18: Partikel kleiner 0,063 mm (FB-IBA B-08). Quelle: Daniel Lemmen

Die Endausbeute des Feingutanteils kann nach 12 h mit Isopropanol nur geringe Unterschiede im unteren Prozentbereich erreichen. Es kann nicht eindeutig geklärt werden, ob dies direkt im Zusammenhang mit Isopropanol oder anderen Faktoren, wie Verluste während der Mahl-

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

/Siebdurchgänge stehen. Trotz Isopropanol treten bei allen Versuchen weiter Agglomerationen auf.

- Feuchtigkeit

Rest- bzw. Umgebungsfeuchte kann zu Agglomerationen führen. Dabei bilden sich konische Flüssigkeitsbrücken zwischen den einzelnen Partikeln (Abbildung 19). Es kommt zu Agglomeraten (Müller 2014).

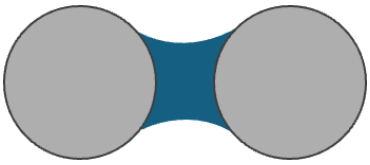

Abbildung 19: Wasserstoffbrücke zwischen Partikeln. Quelle: Daniel Lemmen

Um die Restfeuchte zu entfernen, wird die Probe FB-IBA B-08 nach 8 h zunächst ohne trocknen gesiebt und anschließend für 2 h bei 80°C in einem Trockenschrank getrocknet.

Abbildung 20 zeigt den Einfluss des Trocknungsprozesses auf die Sieblinie. Die Fraktionen verschieben sich hin zu kleineren Partikelgrößen. Vor allem die 0,25 mm Fraktion nimmt durch das Trocknen deutlich ab. Hier können zuvor die größten Agglomerate beobachtet werden. Die Fraktion 0,125 mm nimmt stark zu. Der Feingutanteil ab 0,063 mm steigt leicht.

Die Gesamtmenge an Probe verliert durch das Trocknen 39,8 g an Masse. Es kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Menge ausschließlich auf verdampftes Wasser rückzuführen ist. Durch den hohen Feingutanteil kann der Gewichtsverlust auch durch Wiegen, Transport und umfüllen der Probe entstanden sein.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

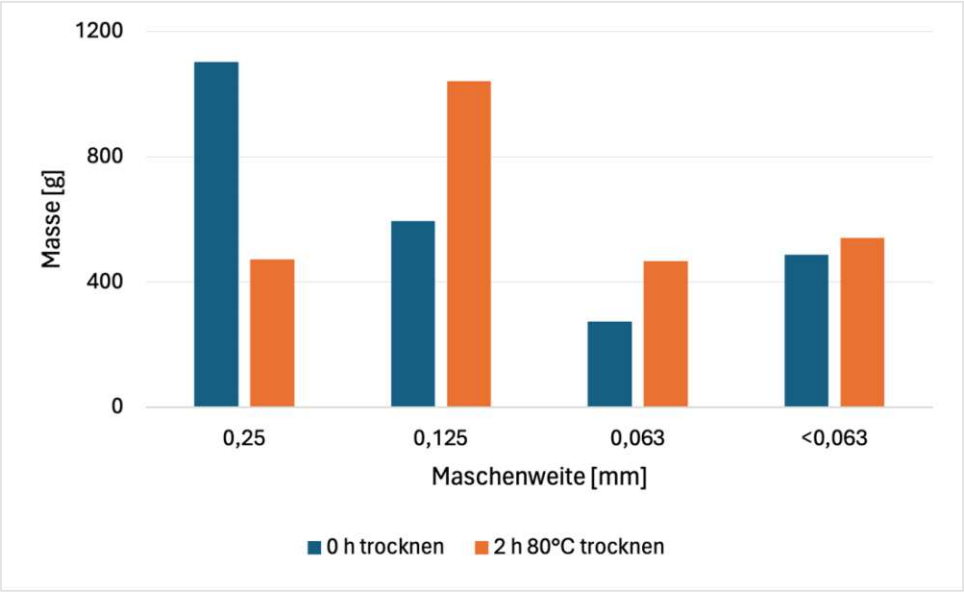

Abbildung 20: FB-IBA B-08; 8h gemahlen mit 30 mm Stahlkugeln; Vergleich: 0 h bzw. 2 h bei 80°C trocknen

- Sieben

Um Agglomerate zu verhindern bzw. aufzubrechen und lange Trocknungszeiten zu vermeiden, kann die Intensität und die Zeit des Siebens erhöht werden.

Die intensivieren Stoßvorgänge innerhalb der Partikelsysteme lockern Agglomerate auf und brechen schließlich, durch immer stärker werdende Stoßvorgänge (Abbildung 21). Dabei sind die Zeit und die Amplitude der entscheidende Parameter (Niedballa 1999)

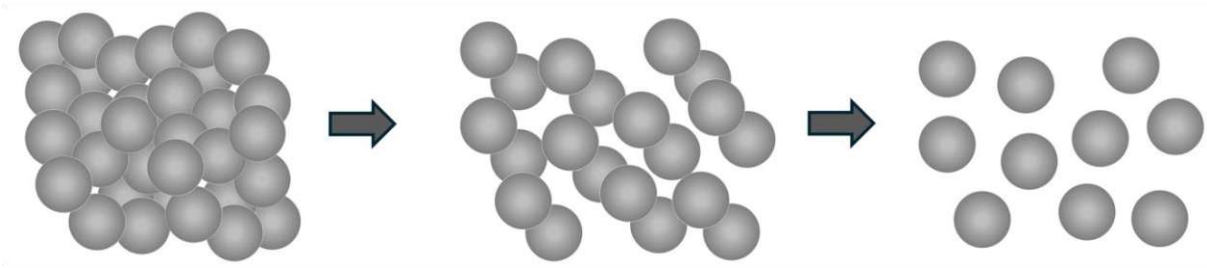

Abbildung 21: Energieeintrag auf ein Agglomerat. Quelle: Daniel Lemmen

Tabelle 10 zeigt die Testreihen der Siebversuche. Der Siebturm erreicht eine potenziell maximale Amplitude von 2.

Siebung 1 und 2 laufen Zeit x mit unterschiedlich eingestellten Amplituden A. Das Maximum von A=2 kann in Siebung 2 nicht erreicht werden. Es wird beobachtet, dass ab einer gewissen Höhe des Siebturms (9 Siebböden) die Amplitude von A=1 nicht überschritten werden kann.

Siebung 3 wird nach 10 min gestoppt und alle Siebe größer 0,25 mm (5 Siebböden) werden entfernt. Der geteilte Siebturm (4 Siebböden) wurde erneut 10 min gesiebt. Es wird

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

beobachtet, dass der Rütteltisch aufgrund der geringeren Höhe des Siebturms Amplituden von 1,5-2 erreicht.

Tabelle 10: Siebturm Versuchs-Parameter

	Zeit [min]	*Amplitude [soll]*	*Amplitude [ist]*	*Siebböden [mm]*
Siebung 1	5	1	1	0,63-8
Siebung 2	10	2	1	0,63-8
Siebung 3	10	2	1	0,63-8
	10	2	1,5-2	0,63-0,5

Abbildung 22 vergleicht die Ausbeuten der einzelne Sieb-Fraktionen mit unterschiedlichen Siebparametern. Die Proben wurden in allen drei Fällen 12 h gemahlen. Die dargestellten Ergebnisse in Abbildung 22 zeigen jeweils drei Sieblinien (12 h mahlen) der Probe FB-IBA B-08, welche nach Tabelle *10* gesiebt wurden.

Siebung 1 hat höhere Anteile an Partikelgrößen im Bereich >0,125 mm. Zudem sind die Fraktionen 0,5 mm und 0,25 mm stark ausgeprägt. Agglomerate verzerren hier die Sieblinie.

Durch die veränderten Siebparameter steigt der Feingutanteil beträchtlich. Die erhöhte Siebzeit (**Siebung 2**) konnte bereits den Großteil der Agglomerate in den Fraktionen 0,125-0,5 mm aufbrechen und der Feingutanteil steigt sprunghaft an.

Das Teilen des Siebturms (**Siebung 3**) sowie weitere 10 min auf maximaler Amplitude führten zu einem weiteren Anstieg des Feingutanteils (<0,063 mm).

Es zeigt sich, dass die Siebparameter den größten Einfluss auf die Ausbeute an Feingutanteil haben und auf zusätzliches Trocknen verzichtet werden kann.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

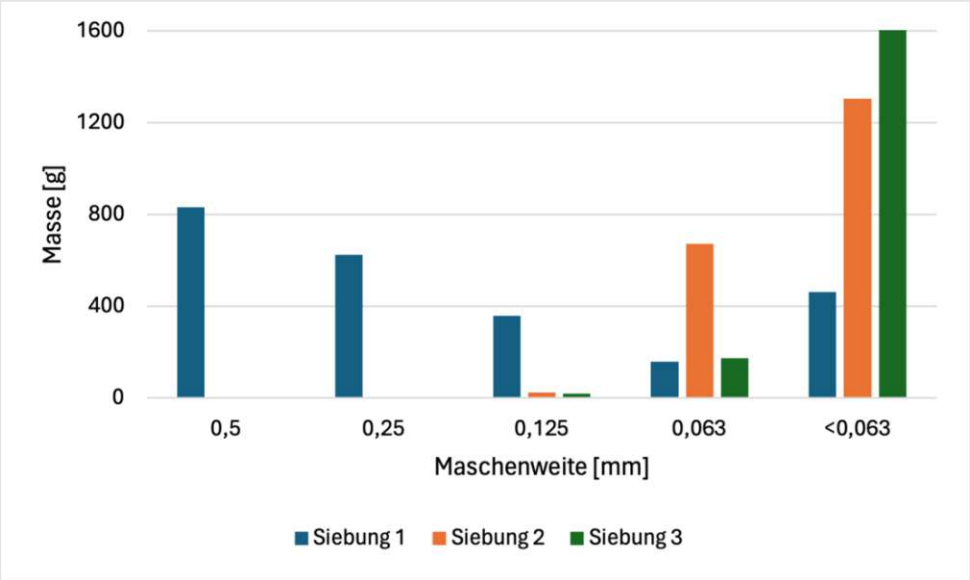

Abbildung 22: Vergleich Sieblinie verschiedener Siebzeiten und Amplituden an FB-IBA B-08

Abbildung 23 verdeutlicht den Einfluss der verlängerten Siebzeit und steigenden Amplitude während des Siebens. Im Vergleich zu Abbildung 18 sind deutliche Unterschiede im Siebergebnis zu erkennen. Es sind keinerlei Agglomerate sowie Verkrustungen auf den Mahlhilfen zu beobachten.

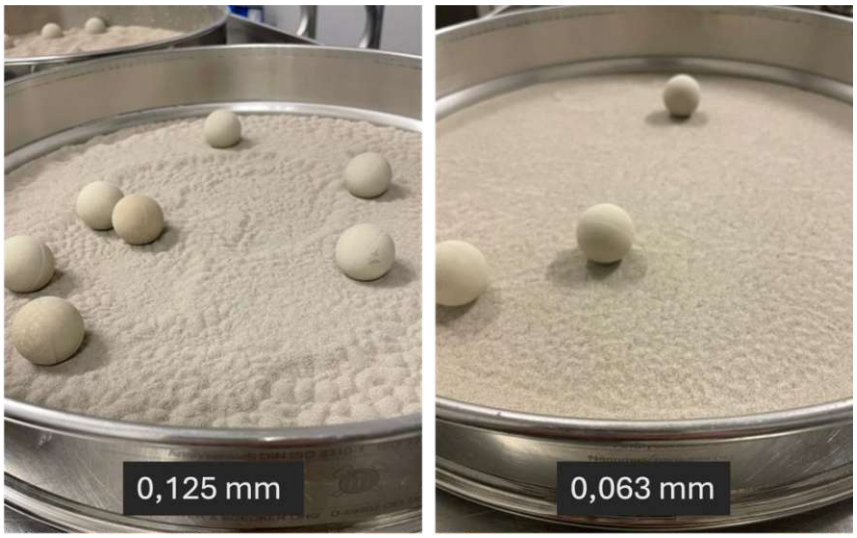

Abbildung 23: FB-IBA B-08 gemahlen und 20 min gesiebt bei max. Amplitude und Teilen des Siebturms nach 10 min. Quelle: Daniel Lemmen

Alternative Siebverfahren, welche für die in dieser Diplomarbeit besprochenen Mahlprodukte in Frage kommen könnten und auftretende Agglomerationen während des Siebprozesses möglicherweise verhindern, sind vor allem bei Partikelgrößen ab ca. 0,050 mm zu empfehlen. Partikel dieser Größe führen keine Wurfbewegung mehr aus. Abhängig der Probe, haften

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Partikel aneinander bzw. am Sieb. Die notwendigen Schwingungen des Siebs sind nicht mehr ausreichend. Um dieses Problem zu umgehen ist die Nasssiebung oder das Luftstrahlsieb eine mögliche Alternative. Diese Verfahren wurden in der Arbeit nicht untersucht.

4.2.2 Bettaschen (FB-IBA)

Im diesem Kapitel beziehen sich alle massespezifischen Prozentangaben auf die Trockenmasse der FB-IBA-Proben.

Die Ergebnisse der Mahldurchgänge werden mittels Siebanalysen dargestellt. Die Bettaschen werden zunächst in einem Backenbrecher mit minimalem Spalt vorzerkleinert und wie bereits beschrieben gemahlen. Im Abstand von 4 h wurde die Mahlung gestoppt, die Probe entnommen und gesiebt, um den Mahlfortschritt zu überprüfen. Den Bettaschen werden nach 4 h und nach 8 h 1 ml Isopropanol als Dispergiermittel zugefügt.

4.2.2.1 FB-IBA A-08

- FB-IBA A-08

Abbildung 24 vergleicht die Sieblinien der Bettaschen Probe FB-IBA A-08 nach 0 h, 4 h und 12 h mahlen. Die Sieblinie vor dem Mahlen (0 h) zeigt hohe Anteile an Partikeln in den Fraktionen >0,5 mm. Der Feingutanteil ist gering. Sieblinie 4 h hat wesentlich höhere Feingutanteile (<0,063 mm). Die Eisenkugeln 30 mm sorgen für eine effektive Zerkleinerung des Mittelkorns (0,063-2 mm) und des Grobkorns (<2 mm) aufgrund der hohen Aufprallkinetik der Eisenkugeln. Der Feingutanteil (<0,063 mm) kann prozentual von anfänglich 2,5 m-% (Sieblinie 0 h) auf 55,4 m-% (Sieblinie 4 h) gesteigert werden. Durch weitere 8 h Sieben und den Einsatz von 10 mm Eisenkugeln zeigt Sieblinie 12 h einen weiteren Anstieg des Feingutanteils auf 81,9 m-%.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

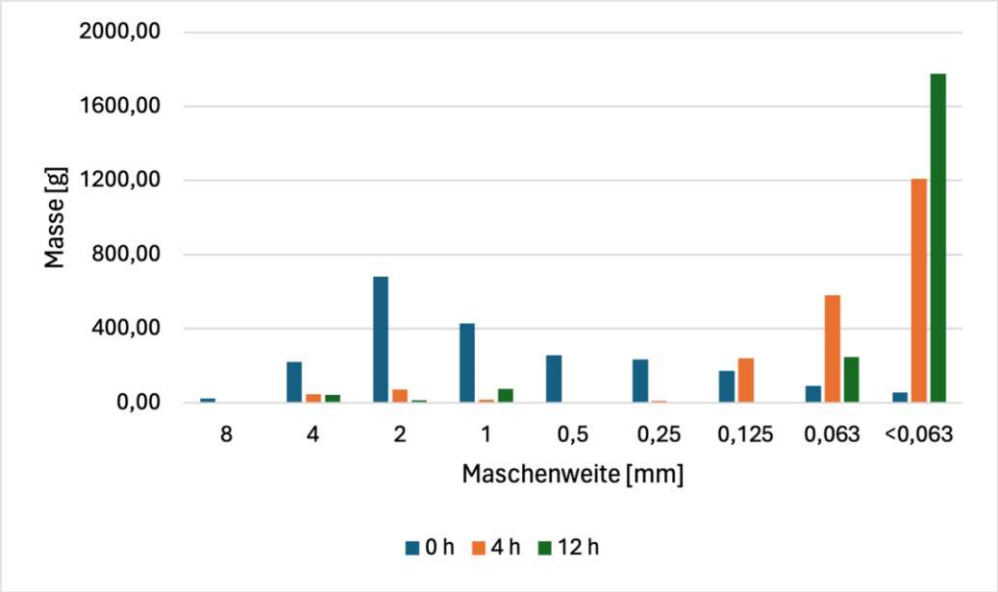

Abbildung 24: FB-IBA A-08; Siblinie 0 h, 4 h, 12 h

- FB-IBA A-02

FB-IBA A-02 folgt dem Trend von FB-IBA A-08. Der Feingutanteil steigt, während der Anteil Grob- und Mittelkornfraktionen abnimmt (Abbildung 25).

Im Vergleich ist zu FB-IBA A-08 ist die Ausbeute an Feingutanteil wesentlich geringer. Circa 33 m-% weniger Feingutanteil kann nach 12 h Mahlen gewonnen werden.

Erklären lässt sich das über die Partikelgrößenverteilung während des Mahlprozesses. Die spezifische Bruchrate von Partikeln hängt von der Aufprallenergie pro Masseneinheit ab. Nimmt die Partikelgrößenverteilung ab, sinkt die spezifische Bruchrate, da sich die Aufprallenergie der Stahlkugeln entweder auf mehrere Partikel verteilt oder die Partikel zwischen den Mahlkörpern durchrutschen. Bei größeren Partikelgrößenverteilungen bieten Partikel mehr Angriffsfläche. Dadurch kommt es zu effektiveren Kollisionen zwischen Partikeln und Mahlkörpern. Es bilden sich mehr Mikrorisse, die die Ausbeute an Feingutanteil (<0,063 mm) erhöhen (Gupta 2017).

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

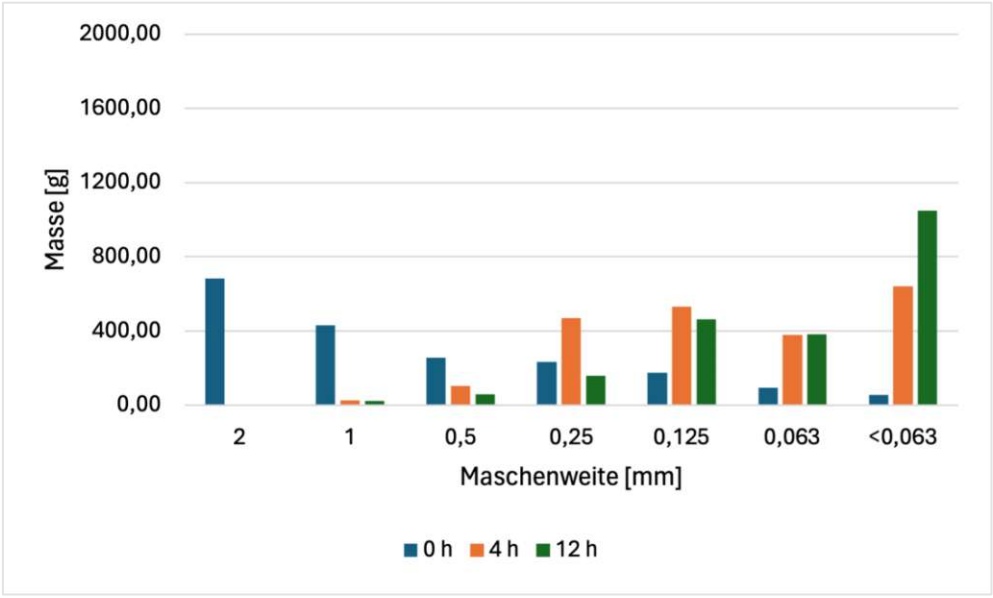

Abbildung 25: FB-IBA A-02; Siblinie 0 h, 4 h, 12 h

Abbildung 26 zeigt optisch den Prozess des Mahlens. Bild A zeigt die Sieblinie 0,125-<0,063 mm nach 4 h mahlen mit 30 mm Eisenkugeln. Bild B zeigt die Sieblinie nach weiteren 8 h mit 10 mm Eisenkugeln. Es können keine Agglomerationen beobachtet werden. Der Feingutanteil kann nahezu vollständig abgesiebt werden.

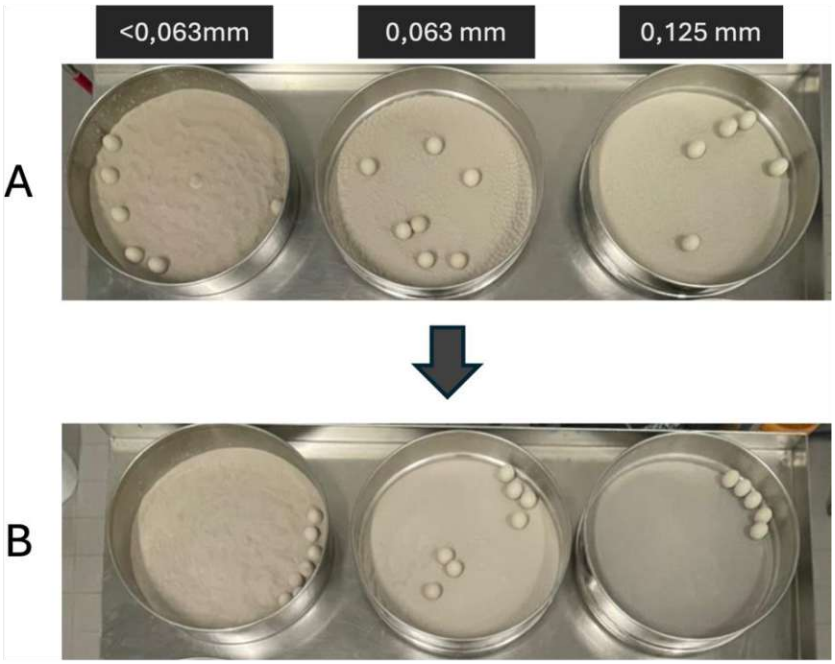

Abbildung 26: FB-IBA A-08: Bild A: 4 h mahlen mit 30 mm Kugeln; Bild B: weitere 8 h mahlen mit 10 mm Kugeln. Quelle: Daniel Lemmen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.2.2.2 FB-IBA B

- FB-IBA B-08

Die Bettaschen FB-IBA B-08 (Abbildung 27) zeigen vergleichbare Ergebnisse wie FB-IBA A-08. Die Ausbeute an Feingutanteil (<0,063 mm) für FB-IBA B-08 ist 7,5 m-% niedriger als FB-IBA A-08. Der allgemeine Trend, hin zu höherem Feingutanteilen nach den Mahldurchgängen, ist jedoch nahezu identisch.

Der Feingutanteil (<0,063 mm) kann prozentual von anfänglich 3,3 m-% (Sieblinie 0 h) auf 56,9 m-% (Sieblinie 4 h) gesteigert werden. Durch weitere 8 h Sieben und den Einsatz von 10 mm Eisenkugeln zeigt Sieblinie 12 h einen weiteren Anstieg des Feingutanteils auf 74,5 m-%.

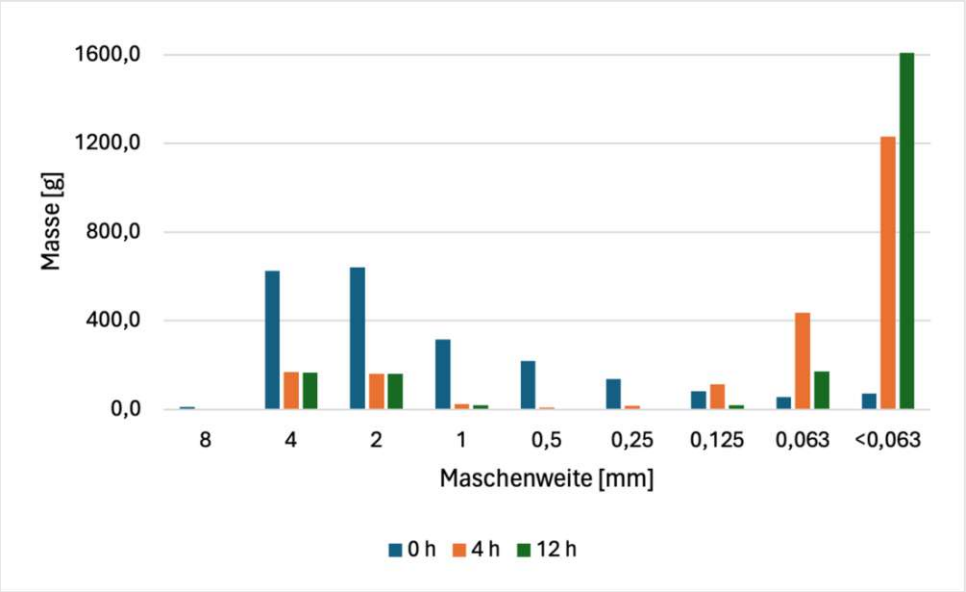

Abbildung 27: FB-IBA B-08; Sieblinie 0 h, 4 h, 12 h

Partikelgrößen >0,5 mm lassen sich nach 12 h nicht weiter zerkleinern. Die Groß- und Mittelkorn-Fraktionen können aus harten Silikat Bestandteile, wie Glas, Keramiken oder Metalle bestehen.

Abbildung 28 zeigt nicht magnetische Restmetalle (Drähte, Nieten und Federn) sowie nicht zu zerkleinernde weiße Keramiken. Sie bilden den Hauptbestandteil in den Grobfraktionen mit 2 mm und 4 mm.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 28: FB-IBA B-08; Reststoffe nach 12 h mahlen. Quelle: Daniel Lemmen

- FB-IBA B-02

Wie für die Bettasche FB-IBA A (Abbildung 29) bereits diskutiert, ist die Ausbeute an Feingutanteil von FB-IBA B-08 im Vergleich zu FB-IBA B-02 um ca. 20 m-% ergiebiger.

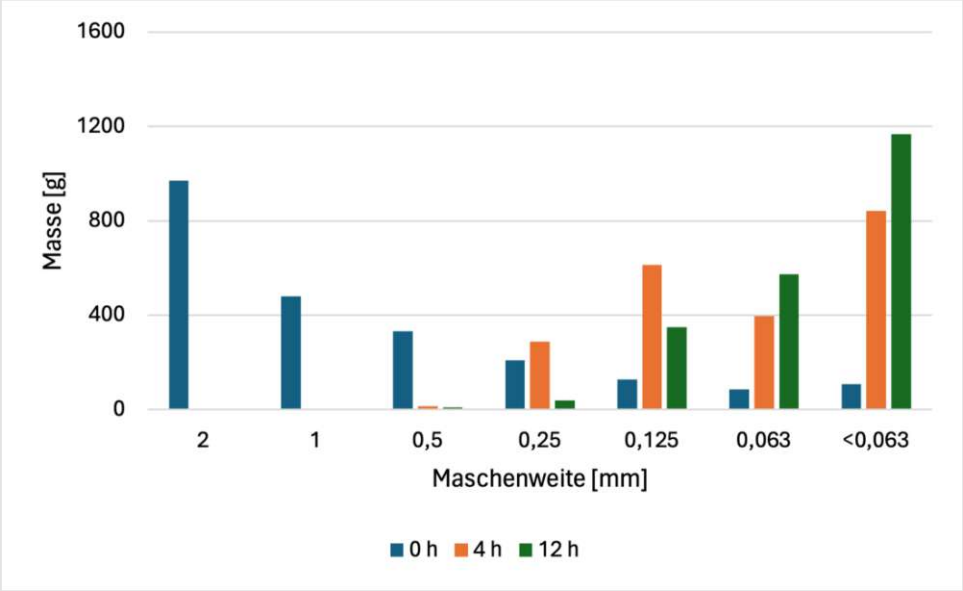

Abbildung 29: FB-IBA B-02; Sieblinie 0 h, 4 h, 12 h

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.2.3 Zementstein aus Betonabbruch (RC-ZS)

Im diesem Kapitel beziehen sich alle massespezifischen Prozentangaben auf die Trockenmasse der RC-ZS-Proben.

Der Betonabbruch wird in zwei separaten Trommeln autogen, ohne Mahlkörper, gemahlen. Probe 1 (RC-ZS-O) ohne Isopropanol und Probe 2 (RC-ZS-I) mit Isopropanol. Im Abstand von 3 Stunden werden die Proben siebanalytisch untersucht. Zudem wird RC-ZS-I alle 3 Stunden 1 ml Isopropanol hinzugegeben bis zu einer Gesamtmenge von 3 ml, um das Mahlergebnis positiv zu beeinflussen.

Ziel ist es Zementstein an der Oberfläche der Gesteinskörnung durch autogenes Mahlen abzutragen. In Abbildung 30 ist zu erkennen, wie die Oberfläche der Gesteinskörnung durch das autogene Mahlen beeinflusst wird. Die raue mit Zementstein bedeckte Gesteinskörnung wird fein abgeschmirgelt. Der abgetragene Zementstein wird abgesiebt und dadurch recycelt, während die Gesteinskörnung als recyclierte Gesteinskörnung wieder eingesetzt werden kann.

Abbildung 30: Autogen gemahlener Betonabbruch nach 12 h. Quelle: Daniel Lemmen

- RC-ZS-0

In Abbildung 31 ist die Sieblinie von RC-ZS-0 sehen. Die Masse bleibt in der Mittelkornfraktion 16-2 mm beinahe konstant. Die leichte Gewichtszunahme in den Mittelkornfraktionen entsteht durch auseinandergebrochene Gesteinskörnungen, die durch den Zementstein verbunden sind und im Laufe des Mahlprozesses auseinanderbrechen.

Ohne Mahlhilfen (Stahlkugeln) findet kaum Zerkleinerung der Gesteinskörnung statt. Die kinetische Energie, die notwendig ist, um die Gesteinskörnung selbst zu zerkleinern, ist zu

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

gering. Um dies abschließend klären zu können, muss die Zusammensetzung des Zementsteins mittels RFA-Analyse getestet werden (Abschnitt 4.3.1).

Ab der Fraktion 0,25 mm kann davon ausgegangen werden, dass die Gesteinskörnung selbst als Mahlhilfe für die feineren Partikel (Zementstein) dient. In diesem Zusammenhang ist vor allem die Fraktion 0,063 mm auffällig. Nach 6 h nimmt die Masse der Fraktion sprunghaft ab. Der Feingutanteil (<0,063 mm) steigt für RC-ZS-O von anfänglich 2,4 m-% auf 5,6 m-% und schließlich auf 8,9 m-%.

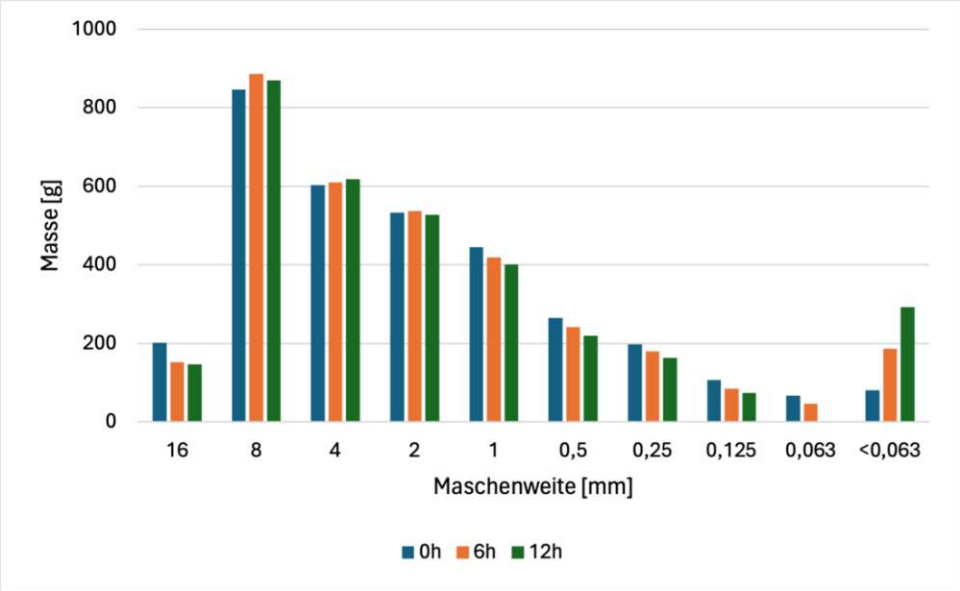

Abbildung 31: RC-ZS-0; Sieblinie nach 0 h, 6 h, 12 h

- RC-ZS-I

Das Siebbild der Probe RC-ZS-I (Abbildung 32) ist ähnlich der von RC-ZS-O. Der Feingutanteil von RC-ZS-I steigt von anfänglich 2,4 m-% auf 4,9 m-% und anschließend auf 8,7 m-%.
Im Falle des autogenen Mahlens kann unter Anwendung von Isopropanol keine Verbesserung der Mahl- und Sieb-Leistung nachgewiesen werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

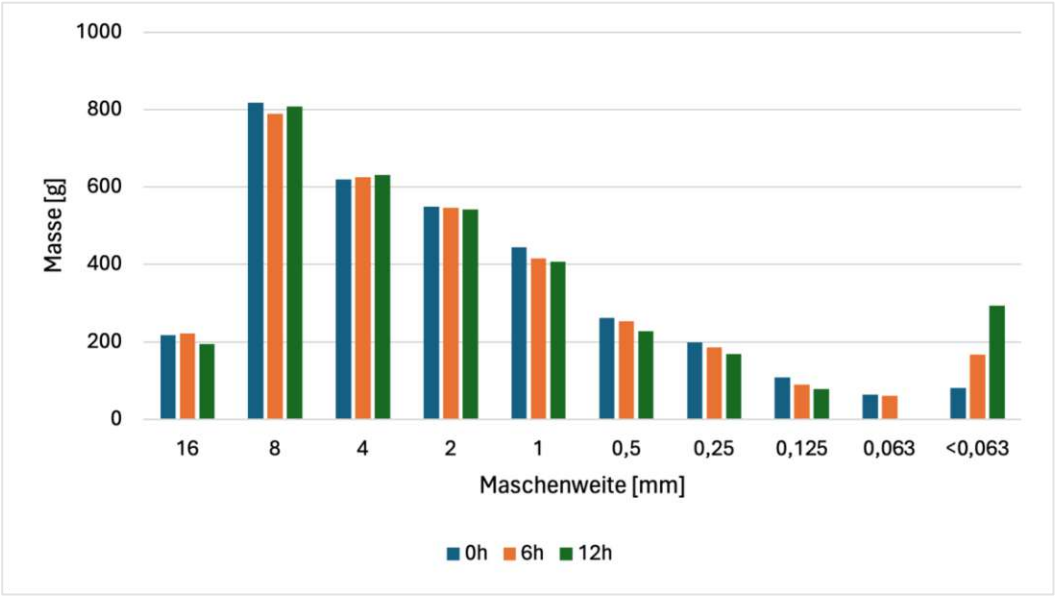

Abbildung 32: RC-ZS-I; Sieblinie nach 0 h, 6 h, 12 h

In der Abbildung 33 sind die Fraktionen 1-<0,063 mm der RC-ZS-O Probe zu sehen. Die <0,063 mm Fraktion agglomeriert leicht und lässt sich durch die Zugabe von Isopropanol nicht verhindern. Nach 12 h kann eine vollständige Abtrennung des Zementsteins an allen Körnern beobachtet werden.

Auch in dem Betonabbruch können nicht magnetische Metallreste gefunden werden (rote Markierung bei 1 mm Fraktion). Hier handelt es sich vor allem um Drähte. Der Anteil ist jedoch wesentlich geringer im Vergleich zu den Bettaschen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

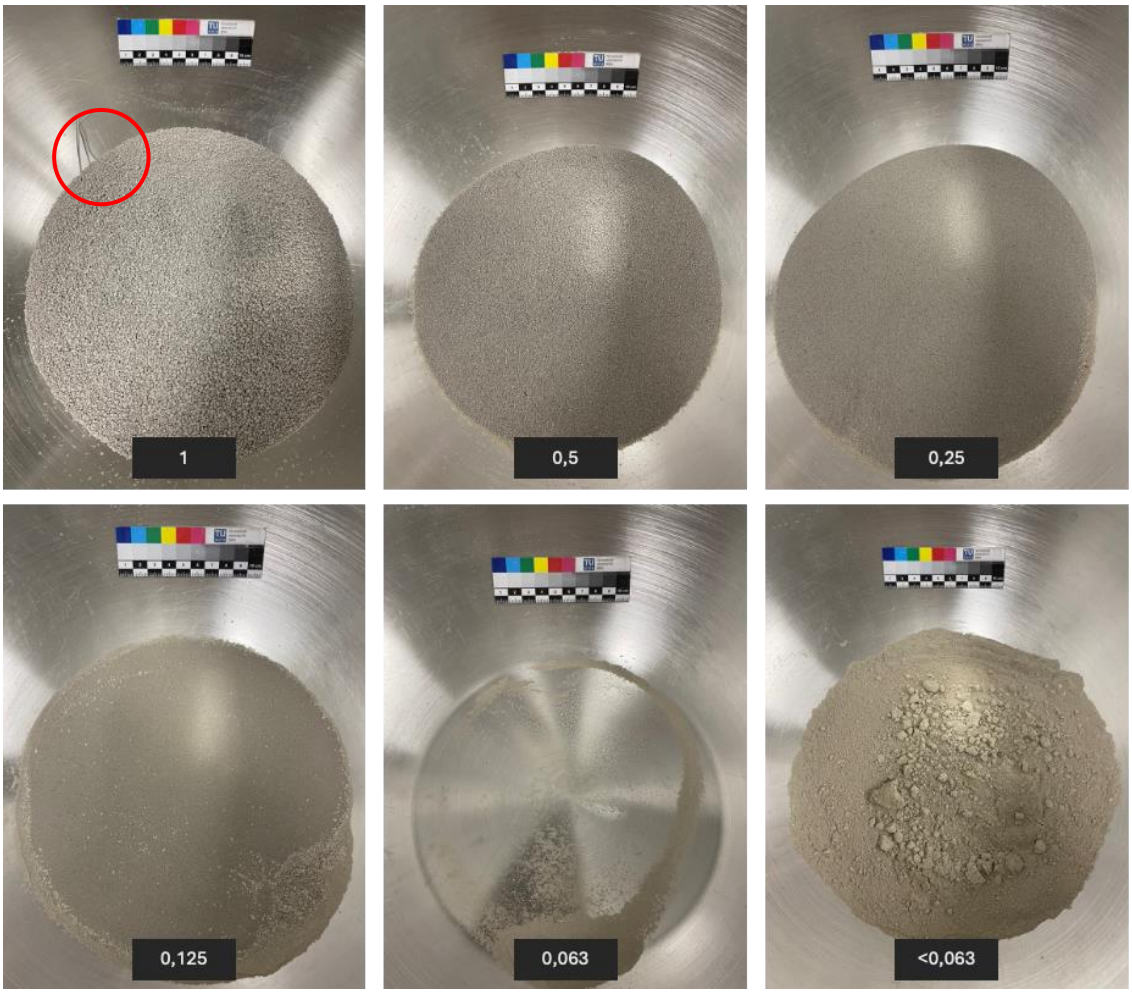

Abbildung 33: RC-ZS-O; Material Sieblinie 1-<0,063 mm. Quelle: Daniel Lemmen

4.2.4 Pyrolysekoks (PK)

Im diesem Kapitel beziehen sich alle massespezifischen Prozentangaben auf die Trockenmasse der PK-Proben.

Pyrolysekoks wird in zwei separaten Trommeln mit denselben Mahlkonfigurationen wie für FB-IBA A/B gemahlen. Probe 1 (PK-O) ohne Isopropanol und Probe 2 (PK-I) mit Isopropanol. Stündlich werden die Proben siebanalytisch untersucht. Zudem wird PK-I stündlich 1 ml Isopropanol hinzugegeben bis zu einer Gesamtmenge von 4 ml, um das Mahlergebnis positiv zu beeinflussen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- PK-O

Abbildung 34 zeigt, dass zu Beginn des Mahlprozesses (0 h) in beide Proben signifikante Massenanteile in gröberen Fraktionen vorhanden sind, die mit zunehmender Zeit (4 h, 12 h) stark abnehmen. Der Feingutanteil (0,063 mm und <0,063 mm) nimmt zu.

PK-O zeigt einen sprunghaften Anstieg des Feingutanteils (<0,063 mm) von anfänglich 13,9 m-% auf 53,0 m-% nach 4 h mahlen. Es wird jedoch deutlich, dass im Laufe des Versuchsprozesses der Feingutanteil stark abnimmt. Nach 12 h mahlen sinkt der Feingutanteil auf 11,7 m-%. Es kommt durch Feuchtigkeitsaufnahme oder durch chemisch-physikalische Veränderungen zu Agglomeraten und einem starken Anstieg der Fraktion in der 0,063 mm Fraktion.

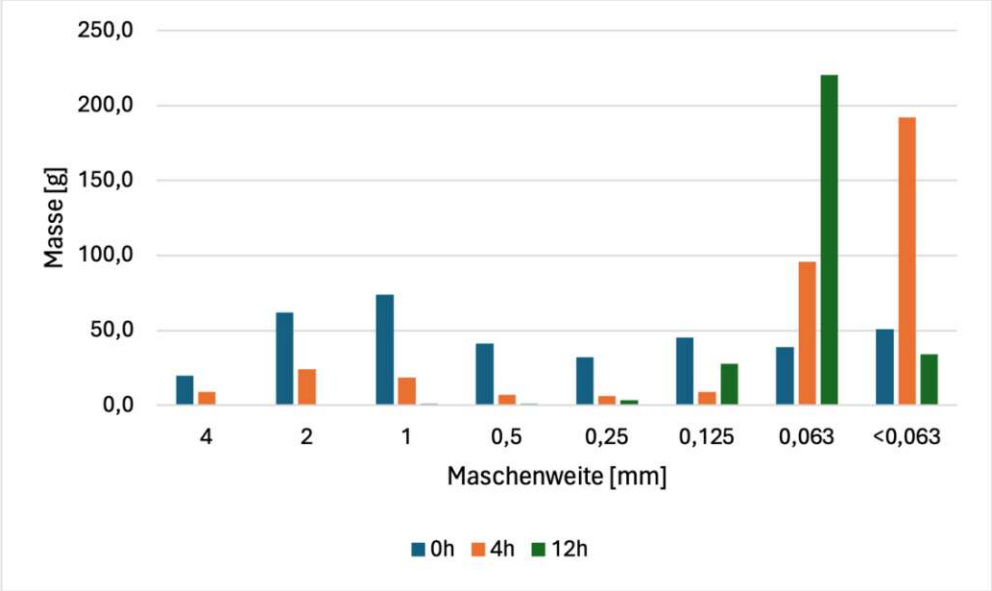

Abbildung 34: PK-O; Sieblinie 0 h, 4 h und 12 h

- PK-I

PK-I zeigt eine ähnliche Tendenz (Abbildung 35). Der Feingutanteil erreicht nach 4 h ein Maximum, nimmt im Laufe der Zeit jedoch ab. Auch hier kommt es zu Agglomerationen. Im Vergleich zu PK-O sind diese nach 4 h weniger stark ausgeprägt. Isopropanol wirkt als Dispergiermittel und löst Agglomerate schneller auf. Von einem anfänglichen Feingutanteil von 13,9 m-% steigt dieser nach 4 h mahlen auf 46,8 m-% und fällt schließlich nach 12 h mahlen auf 38,4 m-%.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

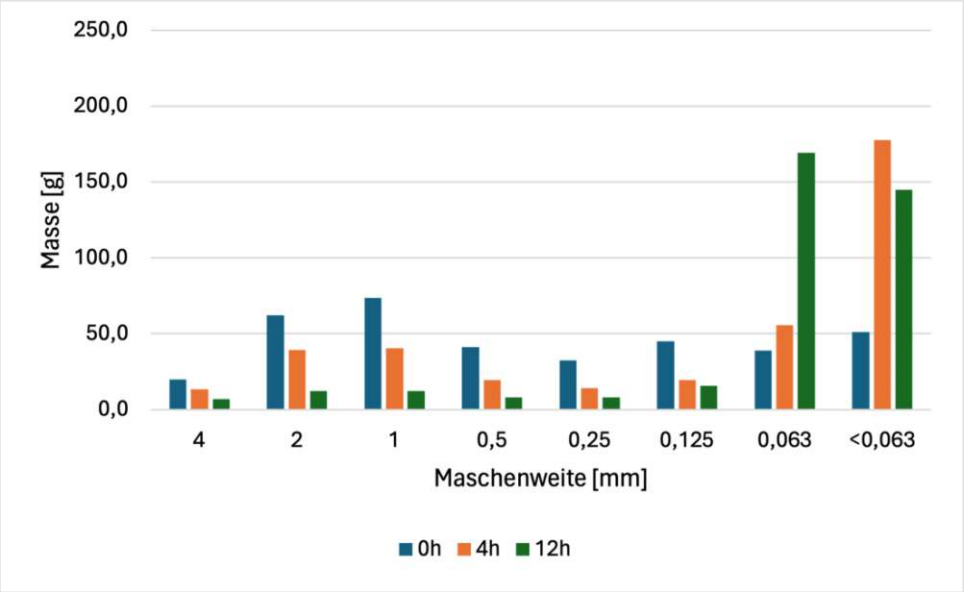

Abbildung 35: PK-I; Sieblinie 0 h, 4 h und 12 h

Abbildung 36 verdeutlicht den Einfluss des Dispergiermittel nach 12 h mahlen in der Fraktion 0,063 mm. Das Siebgut mit Isopropanol hat erheblich weniger stark anhaftende Partikel auf den Siebhilfen und wirkt feinteiliger.

Abbildung 36: PK-O und PK-I; Agglomerate und Krusten auf Siebhilfen. Quelle: Daniel Lemmen

In beiden Mahlprozessen wird ein Maximum des Feingutanteils nach 4 h erreicht. PK-O erzielt im Vergleich zu PK-I 6,2 m-% mehr Feingutanteil, trotz fehlendem Isopropanol als Dispergiermittel. Das Dispergiermittel wirkt erst nach 4 h desagglomerierend.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 37 fasst die Ergebnisse der optimalen Ausbeute an Feingutanteil, abhängig von der Mahldauer, zusammen. Der Einsatz von Isopropanol ist nach dieser Auswertung nicht nötig, solange innerhalb einer gewissen Zeit gemahlen wird. Zudem sollte nicht länger als 4 h gemahlen werden oder kontinuierlich frisches Material zugeführt bzw. Feingutanteil abgetrennt werden, um Agglomeration zu verhindern.

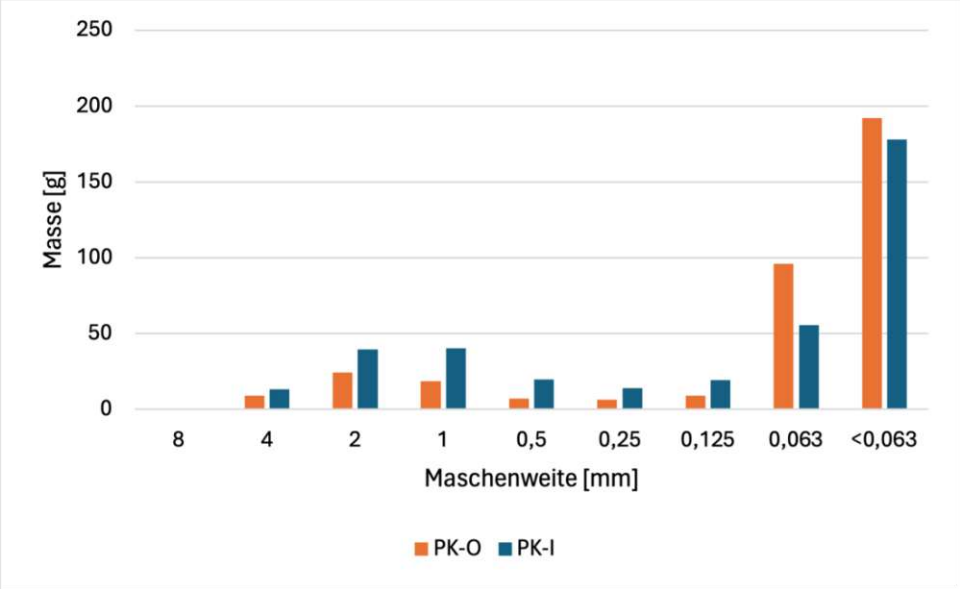

Abbildung 37: Optimale Ausbeute an Feingutanteil PK-O und PK-I nach jeweils 4 h Isopropanol

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.2.5 Mastersizer

Zur Analyse des Feingutanteils (<0,063 mm) (graue Trennlinie in Abbildung 38-40) wird mittels Laserbeugung die volumenbasierte Partikelgrößenverteilung bestimmt.

Im Folgenden werden die Ergebnisse der untersuchten Proben tabellarisch sowie grafisch dargestellt. Tabelle 11 fasst die Ergebnisse in d(0.1) (10 % der Partikel sind kleiner als der Messwert bei d(0.1)), d(0,5) (Median) und d(0.9) (90 % der Partikel sind kleiner als der Messwert bei d(0.9)) zusammen. Zudem wird die spezifische Oberfläche angegeben.

Tabelle 11: d(0,1); d(0,5); d(0,9); spezifische Oberfläche alternativen Zusatzstoffe

Bezeichnung	*d(0.1) [µm]*	*d(0.5) [µm]*	*d(0.9) [µm]*	*spez. Oberfläche [m^2/g]*
FB-IBA A-08	3,0	25,8	68,0	1,0
FB-IBA A-02	2,2	19,9	63,1	1,3
FB-IBA B-08	2,4	20,1	53,3	1,2
FB-IBA B-02	2,2	19,6	63,3	1,3
RC-ZS-O	1,2	9,8	75,3	1,9
RC-ZS-I	0,9	10,7	90,7	1,8
PK-O	1,4	6,4	20,0	0,9
PK-I	2,3	10,8	40,6	0,6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Bettasche (FB-IBA)

Die Verteilungen zeigen einen schmalen Peak in der Partikelgrößenverteilung und somit eine enge Partikelgrößenverteilung (Abbildung 38).

Im Vergleich hat FB-IBA A-08 höhere d(x)-Werte als FB-IBA B-08 (Tabelle 11). Das Maximum der Verteilungsfunktion liegt auf der Achse weiter rechts, die Partikel sind im Mittel (d(0.5)) größer. Die spezifische Oberfläche von FB-IBA A-08 ist zudem geringer als FB-IBA B-08 und beschreibt typisch gröbere Partikel.

Die Fraktionen FB-IBA A-02 und FB-IBA B-02 zeigen kaum erkennbare Unterschiede. Die spezifischen Oberflächen (1,3 m^2/g) der beiden Fraktionen geben Hinweise auf feinere Korngrößen im Vergleich zu den ursprünglich gröberen Fraktionen FB-IBA A-08 (1,0 m^2/g) und FB-IBA B-08 (1,2 m^2/g).

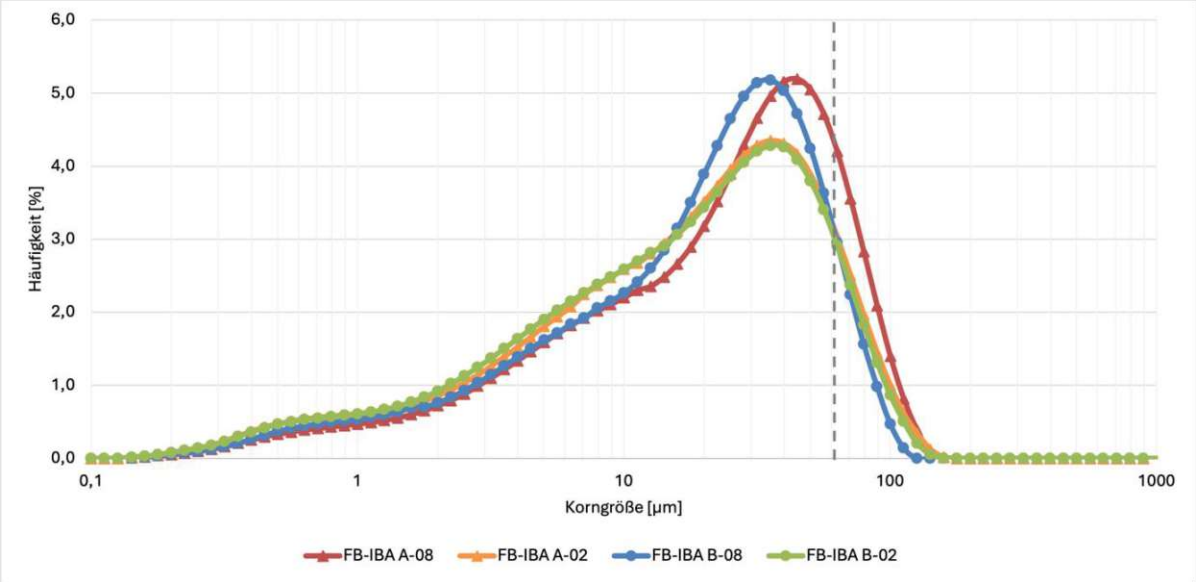

Abbildung 38: Mastersizer FB-IBA A und FB-IBA B

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Zementstein

Die Zugabe von Isopropanol bewirkt ein leicht verbesserte Desagglomeration bei RC-ZS-I im Feinkornbereich, erkennbar an dem geringeren d(0.1)-Wert von 0,9 µm im Vergleich zu RC-ZS-O mit 1,2 µm. Im Median d(0.5) und im gröberen Bereich d(0.9) nimmt die Partikelgröße im Vergleich jedoch zu (Abbildung 39).

Der d(0,9)-Wert von RC-ZS-I (90,7 µm) liegen deutlich über den Werten der Vergleichsprobe RC-ZS-O (75,3 µm) und übersteigen die eigentliche Partikelgröße von maximal 65 µm. Es ist zu vermuten, dass bei der Analyse, bzw. bei der Förderung der Probe über die Vibrationsrinne, es zu Agglomerationsbildung gekommen ist. Zudem ist kein positiver Einfluss von Isopropanol erkennbar.

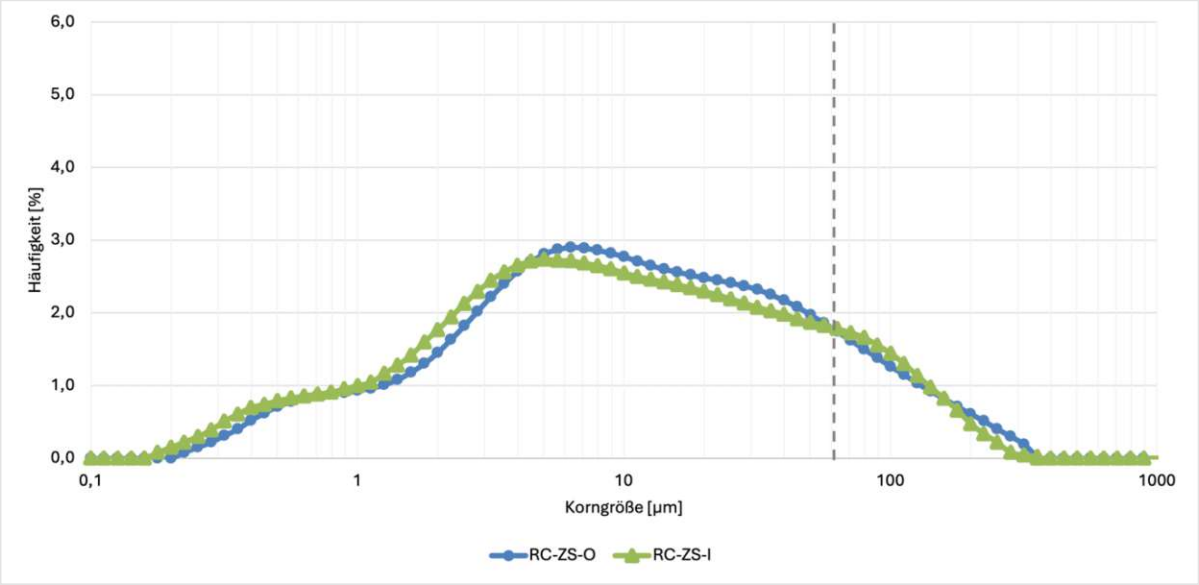

Abbildung 39: Mastersizer RC-ZS-O und RC-ZS-I

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Pyrolysekoks

Die Verteilung PK-O zeigt zwei Peaks bei ca. 6-10 µm und bei ca. 200 µm. Der zweite Peak deutet auf Agglomerate hin. Die Verteilungsfunktion liegt weit links mit einem d(0.9) Wert von 20 µm. Der Großteil der Probe ist sehr fein (Abbildung 40).

Durch die Zugabe von Isopropanol kommt es zu einem geringeren Feingutanteil und deutlich höherem Grobanteil (d(0.9)= 40,6 µm). Die Verteilung ist wesentlich breiter gestreut. Zudem ist die spezifische Oberfläche niedriger (0,6 vs. 0,9 m^2/g).

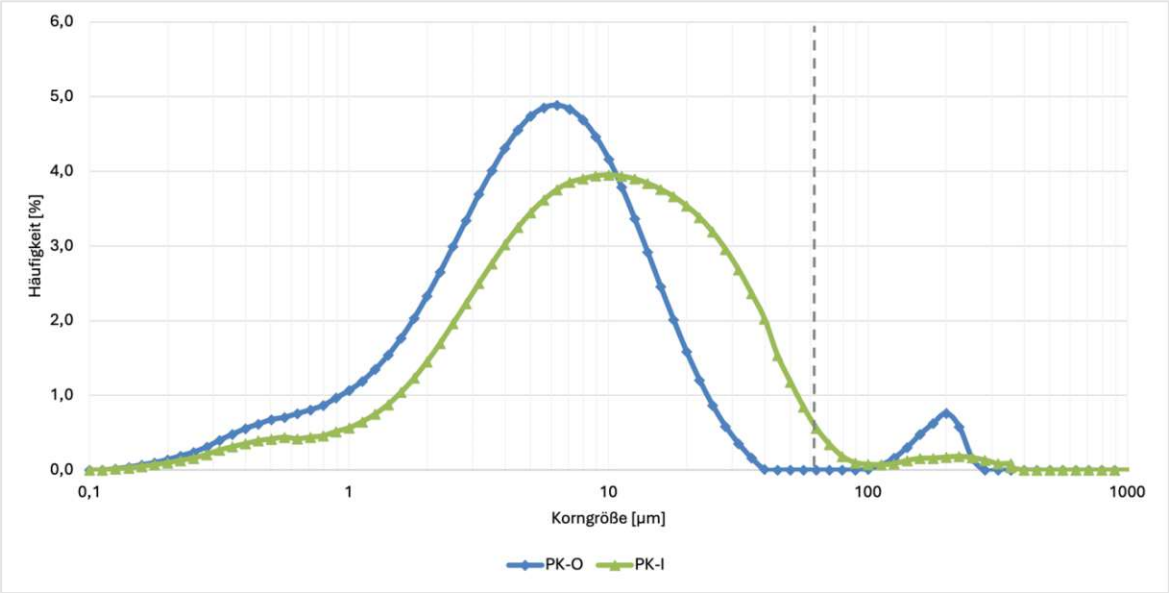

Abbildung 40: Mastersizer PK-O und PK-I

4.3 Chemische Analyse

4.3.1 RFA

Im diesem Kapitel beziehen sich alle massespezifischen Prozentangaben auf die Trockenmasse der untersuchten Proben.

Abbildung 41 zeigt die Ergebnisse aus der RFA-Analyse. Die gemessenen Spurenelemente werden Massenanteilig in ihre oxidische Form umgerechnet.

Der Balance Wert (Petroblau) ist prozentual am höchsten. Das RFA-Gerät ist analytisch limitiert. Leichtere Elemente mit einer niedrigeren Ordnungszahl als 12 (Mg) können nicht mehr zuverlässig bestimmt werden. In einer Studie über die Analyse von Zementproben mittels tragbaren RFA-Geräts von (Taylor 2012) zeigt sich, das ähnliche Balance Werte, wie für die Bettaschen und den Zementstein, erreicht werden. Dies schließt auf nicht detektierbare

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Komponenten wie insbesondere Sauerstoff, jedoch auch Wasserstoff, Stickstoff, Kohlenstoff und andere nicht messbare Elemente.

Pyrolysekoks besteht hauptsächlich aus Kohlenstoff. Da Kohlenstoff ein leichtes Element mit der Ordnungszahl 6 ist, ist das Ergebnis stark verzerrt. Die Analyse mittels RFA-Geräts kann hier nicht empfohlen werden.

Wie zu erwarten ist vor allem SiO_2 Hauptbestandteil der Bettaschen, gefolgt von CaO und Al_2O_3. Der Anteil an SiO_2 ist in den FB-IBA A/B-08 deutlich höher als in den Proben FB-IBA A/B-02. Gröbere Fraktionen enthalten häufig mineralische Bestandteile wie Quarz, die reich an Silizium sind und oftmals eine erhöhte Festigkeit aufweisen. Eingetragen werden sie beispielsweise durch Keramiken, Porzellan oder Verpackungsglas im Restmüll und landen deshalb eher in der Grobfraktion.

RC-ZS besteht hauptsächlich aus CaO gefolgt von SiO_2 und Al_2O_3.

Aufgrund der bereits benannten Problematik von PK wird das Ergebnis der RFA-Analyse nicht weiter betrachtet.

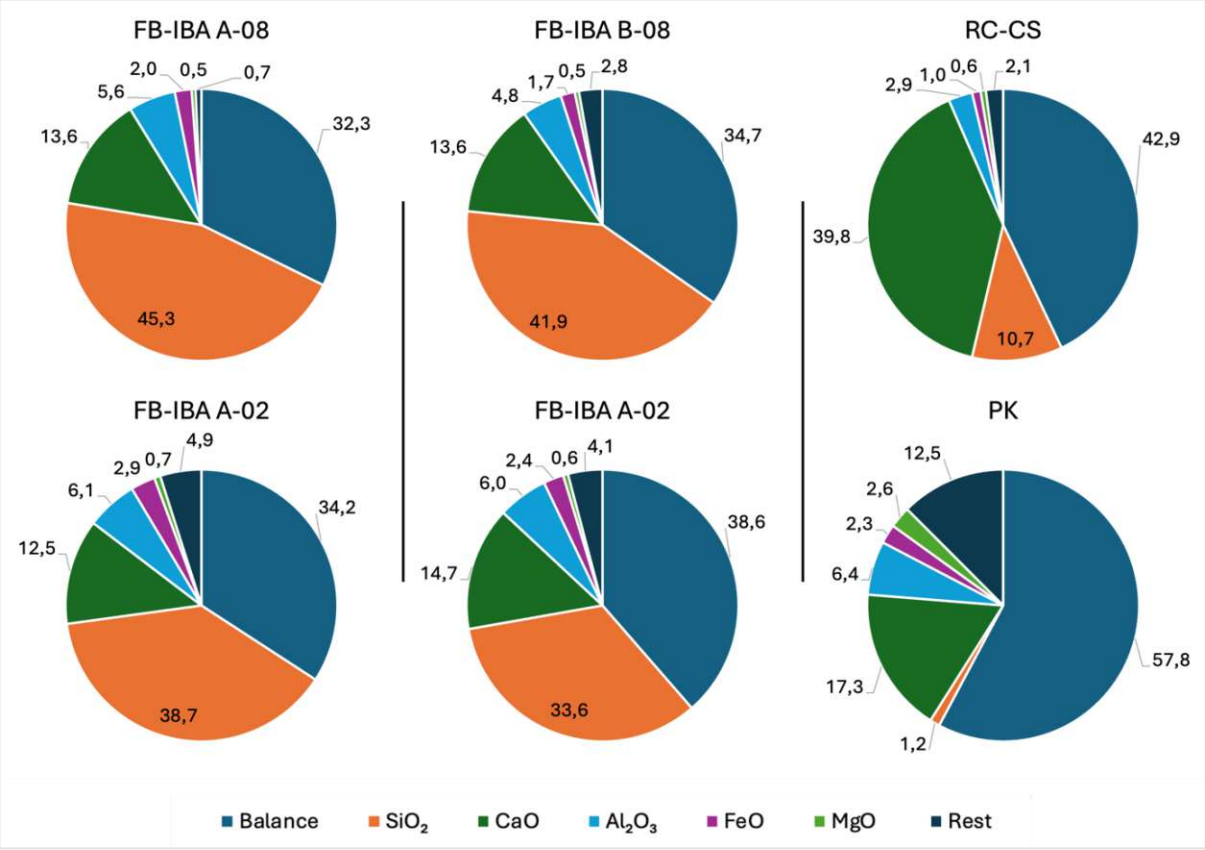

Abbildung 41: RFA Ergenisse FB-IBA, RC-ZS, (PK)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Zur genauen Einordnung der relevanten Oxide, soll im Folgenden die Wirkung der Hauptoxide in den später hergestellten Probenkörpern beschrieben werden.

- Hauptoxide

- Calciumoxid (CaO)

CaO ist Hauptbestandteil in Portlandzement, welcher zusammen mit Wasser zu Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) reagiert. Dies bildet die Grundlage für die Hydratation und die Festigkeitsbildung von Beton (Verein Deutscher Zementwerke e.V 2008).

- Siliciumdioxid (SiO_2)

SiO_2 reagiert mit dem gebildeten Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) zu C-S-H-Phasen welche die Festigkeit des Betons bestimmen (Neville 2011).

- Aluminiumoxid (Al_2O_3)

Al_2O_3 bildet zusammen mit CaO Tricalciumaluminat (C_3A) welches für die Erstarrung des Betons relevant ist. Bei Sulfatangriff kann es jedoch durch die Bildung von Ettringit zu Volumenvergrößerungen und Schäden kommen (Taylor 1997).

- Magnesiumoxid (MgO)

MgO führt in höheren Mengen zu Expansionen in Beton. DIN EN 197-1 gibt für Portlandzement ein maximum von <5 % vor.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Dreiphasendiagramm

Basierend auf den Ergebnissen aus der RFA-Analyse, welche in Tabelle 12 nochmals dargestellt sind, werden die potenziellen alternativen Zusatzstoffe in einem Dreiphasendiagramm genormten AHWZs zugeordnet.

Tabelle 12: Ergebnisse RFA-Analyse in Massen-% bezogen auf die Trockenmasse der Proben

Bezeichnung	*Balance*	*SiO_2*	*CaO*	*Al_2O_3*	*FeO*	*MgO*	*Rest*
FB-IBA A-08	28,8	45,3	13,6	6,7	4,5	0,5	0,7
FB-IBA A-02	29,5	38,7	12,5	7,2	6,5	0,7	4,9
FB-IBA B-08	31,8	41,9	13,6	5,7	3,8	0,5	2,8
FB-IBA B-02	34,6	33,6	20,6	7,1	5,3	0,6	4,1
RC-ZS	41,2	10,7	39,8	3,4	2,2	0,6	2,1

Das Dreiphasendiagramm Abbildung 42 zeigt die Zusammensetzung der alternativen Zusatzstoffe genormt auf die Hauptoxide SiO_2, CaO und Al_2O_3. Die Hauptoxide sind von zentraler Bedeutung, da sie Reaktivität, Hydration und die Dauerhaftigkeit des Betons bestimmen.

Die alternativen Zusatzstoffe werden mit bekannten Referenzen verglichen und eingeordnet. Dies ermöglicht eine qualitative Einschätzung, ob der alternative Zusatzstoff als reaktiver Zusatzstoff verwendet werden kann.

Die FB-IBA-Proben liegen im Referenzbereich der Steinkohleflugasche. FB-IBA A-08 hat den höchsten SiO_2 Anteil und damit das höchste erwartbare puzzolanische Potential der Proben ((Neville 2011; Taylor 1997; DIN EN 197-1). Die Probe FB-IBA A-02 ist nicht im oberen Referenzbereich des Steinkohleflugasche zu finden, sondern im unteren Referenzbereich. Dies liegt an einem vergleichbar höheren CaO Anteil.

FB-IBA B-08 hat einen hohe SiO_2 Anteil, mittlere Al_2O_3 Anteile und niedrige CaO Anteile, welche nach DIN EN 450-1 auf puzzolanisch Eigenschaften der Proben hindeuten. FB-IBA B-02 hat deutlich mehr CaO Anteile sowie weniger SiO_2 Anteile. Eine geringere puzzolanische Aktivität, im Vergleich zu FB-IBA B-08, ist erwartbar.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

RC-ZS liegt nah an dem Referenzbereich für Klinker. Der hohe Anteil an CaO ist typisch für hydratisierten Zementstein. Die geringen SiO_2 und Al_2O_3 Anteile lassen darauf schließen, dass lediglich der Zementstein von der Oberfläche der Gesteinskörnung abgetragen wurde und die Gesteinskörnung selbst nur wenig zum Feingutanteil beiträgt. Um die reaktiven Anteile an freiem CaO zu bestimmen, müsste zusätzlich eine Analyse gemäß DIN EN 196-2 durchführt werden, was jedoch in dieser Arbeit nicht erfolgt ist.

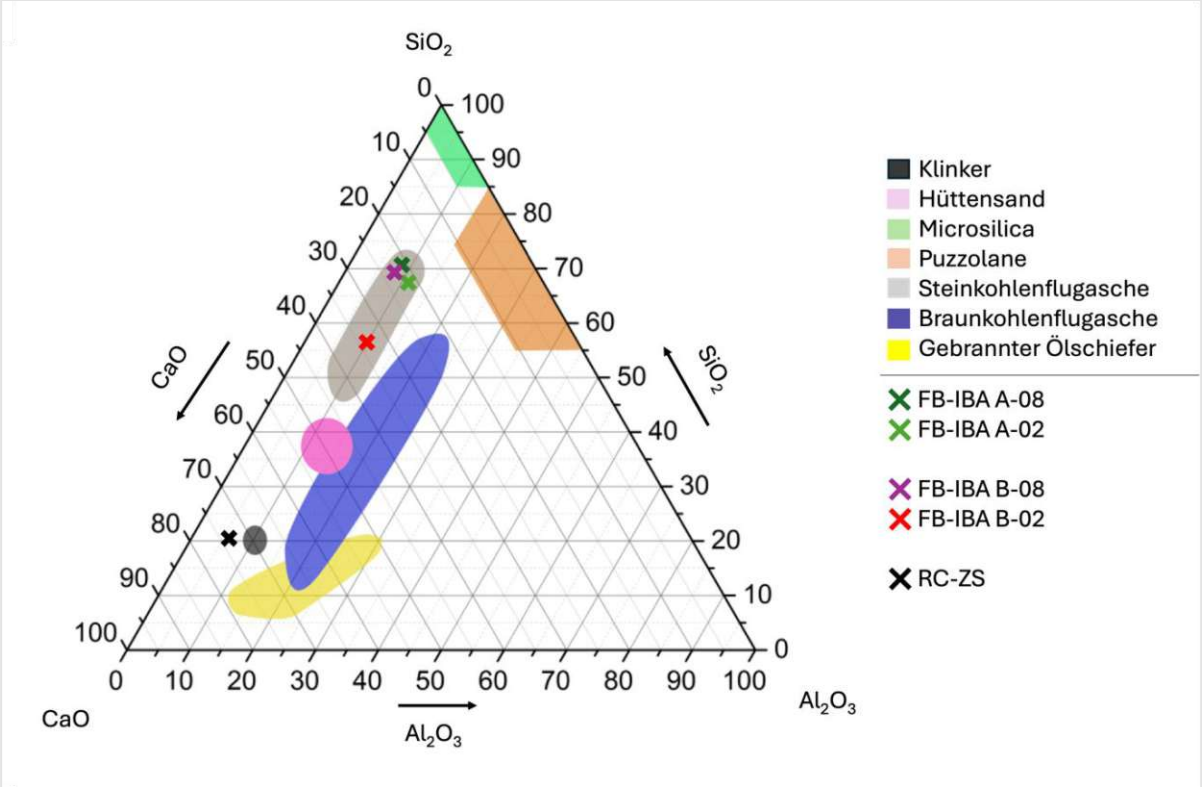

Abbildung 42: Drei Phasendiagramm alternative Zusatzstoffe (SiO_2, CaO, Al_2O_3) Quelle: Adaptiert: (Unseld 2019)

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- FB-IBA

Bettaschen sind in offiziellen DIN-Normen als alternativen Zusatzstoffe nicht definiert. Das Dreiphasendiagramm grenzt jedoch die Zugehörigkeit der Proben ein. So können die jeweiligen Proben mit DIN-Normen verglichen werden und Grenzwerte vergleichbar bewertet werden.

Für die Bettaschen werden die Grenzwerte in Tabelle 13 aus der DIN 450-1 für Flugaschen definiert. Die Bettaschen erfüllen nicht die Anforderungen der DIN EN 450-1 für Flugaschen, da sie den Grenzwert von 70 m-% für SiO_2, Al_2O_3 und Fe_2O_3 unterschreiten. Sie sind als Flugascheersatz nicht geeignet. Jedoch zeigen FB-IBA A/B-08 einen hohen Gehalt an SiO_2 und somit ausreichend puzzolanisches Reaktionsvermögen. Der MgO Gehalt in allen Bettaschen ist gering und stellt somit kein Risiko einer Volumeninstabilität dar.

Flugaschen mit einem CaO-Wert unter 10 m-% werden den kieselsäurereichen Flugaschen zugeordnet. Hier muss anteilig mindestens 25 m-% SiO_2 vorhanden sein, welches von allen aufgeführten Proben erfüllt wird. Jedoch liegen die CaO Werte alle über 10 m-%.

Flugaschen mit einem CaO-Wert über 10 m-% werden den kalkreichen Flugaschen zugeordnet. Sie besitzen puzzolanische und hydraulische Eigenschaften. Kalkreiche Flugasche mit CaO Anteilen von 10-15 m-% müssen mindestens 25 m-% SiO_2 aufweisen. Ist der CaO Gehalt über 15 m-% muss nach DIN EN 196-1 zusätzlich die Druckfestigkeit eines, rein mit Flugasche hergestellten, Prüfmörtels mindestens 10 MPa betragen.

Tabelle 13: Vergleich Bettaschen (FB-IBA) mit DIN EN 450-1 in Massen-% bezogen auf die Trockenmasse der Proben

	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	SiO_2	MgO	CaO	
Flugasche DIN EN 450-1	≥70	≥ 25	≤4	<10	≥ 10
FB-IBA A-08	56,4	45,3	0,5	13,6	
FB-IBA A-02	52,4	38,7	0,7	12,5	
FB-IBA B-08	51,3	41,9	0,5	13,6	
FB-IBA B-02	46,0	33,6	0,6	20,6	

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- RC-ZS

Der Zementstein (RC-ZS) liegt mit 50,2 % für SiO_2 + CaO knapp über der Mindestanforderung gemäß DIN EN 197-1 für Klinker (Tabelle 14). Der MgO Gehalt liegt deutlich unter dem Grenzwert. Es ist möglich, dass ein restliches chemisches Potential vorhanden ist und der Zementstein aufgrund der Zusammensetzung als Ca-haltiger Zumahlstoffe in Frage kommen kann. Inwieweit das CaO bereits in einem C-S-H-System gebunden ist, müsste über weitere Versuchsreihen getestet werden.

Tabelle 14: Vergleich Zementstein (RC-ZS) mit DIN EN 297-1 in Massen-% bezogen auf die Trockenmasse der Proben

	SiO_2 + CaO	*MgO*
Zement DIN EN 197-1	≥50	≤5
Zementstein (Betonabbruch)	50,5	0,6

4.4 Prüfung Festbeton-Druckfestigkeit

Die Probenkörper (Abbildung 14) mit den Maßen 150x150x150 mm, werden in einer Prüfeinrichtung (Abbildung 15) auf Druckfestigkeit geprüft. Dazu werden jeweils drei Probenkörper einer Mischung, nach 28 und 56 Tagen Lagerung in einem Wasserbad, getestet und die Ergebnisse gemittelt. Die Prüfmaschine gibt direkt Auskunft über die Bruchkraft (kN). Zur Auswertung wird diese mit Formel (4) in die Druckfestigkeit (MPa) umgerechnet und in einem Säulendiagramm mit der Standardabweichung dargestellt (Abbildung 44).

- Optische Merkmale nach 28 Tagen Wasserbad

Die Probenkörper haben nach 28 Tagen Wasserbad einen weißen teils kristallin nadelförmigen Oberflächenbelag (Abbildung 43). Der Belag ist mit einem Tuch abtragbar, körnig und hart. Die Ablagerungen können nach 56 Tagen nicht beobachtet werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 43: Weiße kristalline Schicht auf Probenkörper nach 28. Tagen; a. P_IBA 08 b. Zementstein c. Pyrolysekoks. Quelle: Daniel Lemmen

Mögliche Ursachen für die Oberflächenbeschaffenheit können vielfältig sein. Hier werden zwei Theorien vorgestellt:

- Ettringit

Einer der Hauptbestandteile von Zement, Tricalciumaluminat (C_3A) reagiert mit Sulfat und Wasser zu Ettringit ($Ca_6Al_2[(OH)_{12}(SO_4)_3]\cdot 26\ H_2O$). Es bilden sich kurze, prismatische Kristalle mit einer typischen Länge von 1 µm nahe der C_3A Oberflächen. Durch Reaktionsmechanismen über die Lösung entstehen auch an entfernteren Orten, abseits der C_3A Oberflächen, sekundäre Ettringit Kristalle. Dabei lösen sich Ionen (SO_4^-) und C_3A Phasen aus dem Zement in Wasser und diffundieren durch die Poren und reagieren ab einer bestimmten Konzentration zu Ettringit. Unter bestimmten Bedingungen (pH-Wert, Raumgröße und Sulfationen-Konzentration) kann auch sekundäres Ettringit mit längeren Nadeln in Poren und an der Oberfläche gebildet werden (Taylor 1997).

Um die Anwesenheit von Ettringit nachzuweisen, müssen in weiteren Versuchen Analysen der Probenkörper durchgeführt werden. Dazu kann beispielsweise ein Röntgendiffraktometer (XRD) als mögliche Analysemethode verwendet werden.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Ionentransport durch Bluten

Überschüssiges Wasser aus dem Frischbeton steigt mit gelösten Ionen wie z.B. Ca_2^+, OH^- oder SO_4^{2-} an die Betonoberfläche (Bluten). Durch diesen Prozess sammeln sich die Ionen an den Betonoberflächen und den Poren (Makul 2025). Werden die Probenkörper nach 28 Tagen aus dem Wasser genommen, reagiert Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) mit CO_2 aus der Luft zu Calciumcarbonat ($CaCO_3$). Dieser Prozess ermöglicht das Ausblühen weißer nadelförmiger Kristalle durch Karbonatisierung an der Oberfläche (Taylor 1997).

Auffällig geworden sind die Ablagerungen auf den Proben, nachdem diese aus dem Wasserbad genommen wurden und längere Zeit (1 h) an der Luft waren. Ob die Proben bereits im Wasserbad mit kristallinen Oberflächenstrukturen benetzt waren, kann im Nachhinein nicht genau beantwortet werden. Bei Folgeversuchen sollte darauf genauer geachtet werden.

- Verzögerte volumetrische Expansion der Probenkörper nach 56 Tagen

Zu beobachten ist, dass ein Großteil der Probenkörper nach 28 Tagen nicht die Normgröße von 150 x150x150 mm ± 1 mm erreicht (DIN EN 12390-1). Nach weiteren 28 Tagen im Wasserbad kommt es zu einer volumetrischen Zunahme und alle Probenkörper fallen in die Norm. Dies zeigt eine verzögerte Ausdehnung, welche auf die verspätete Reaktion von alternativen Zusatzstoffen im Vergleich zu reinem Portlandzement rückzuführen ist.
AHWZ im Allgemeinen, bilden verspätet (im Vergleich zu normalem Zement) C-S-H-Phasen, welche zu Volumenvergrößerungen führen (Poon, Lam, und Wong 2000).
Ein weiterer Grund kann die Bildung von sekundärem Ettringit sein. Dieses bildet sich nicht nur, wie zuvor beschrieben auf der Oberfläche der Probenkörper, sondern auch in Rissen und Poren innerhalb der Probenkörper. Voraussetzung sind hohe Feuchte und Sulfatverfügbarkeit aus bspw. den alternativen Zusatzstoffen. Dies führt zu einer langsamen Expansion während der Lagerung im Wasserbad (Taylor 1997).

- Präzision der Messung

Nach DIN EN 12390-3 dürfen auf Grundlage der Wiederholungsbedingung für 150 mm Würfel die Messewerte maximal um 9 % vom Mittelwert abweichen. In diesem Fall erfüllen alle Probenkörper die Bedingung. Zudem darf die Standardabweichung um maximal 3,2 % abweichen. P_IBA-02 hat nach 28 Tagen hat eine Standartabweichung von 3,3 %. Die Messung

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

der drei Probenkörper müsste nach Norm wiederholt werden. In Tabelle 15 sind die Standardabweichungen der Messreihen dargestellt.

Tabelle 15: Standardabweichung der Probenkörper (Druckfestigkeit)

Probe	*Standartabweichung [MPa]*
P_IBA-02	3,3
P_IBA-08	1,4
P_RC-ZS	3,1
P_IBA-PK	0,6

4.4.1 Auswertung Druckfestigkeit

Abbildung 44 zeigt 4 verschiedene Druckfestigkeits-Versuche. Die Beschriftung gibt lediglich die Zusammensetzungen der alternativen Zusatzstoffe an. Die exakte Probenzusammensetzung der Probenkörper sowie die Messmethodik wird in Kapitel 3.3.3 beschrieben. Zur genauen Zuordnung der Probenkörper folgt eine kurze Zusammenfassung:

- **P_IBA-02**: Probenkörper mit Bettasche; ursprünglichen Körnung von 0-2 mm
- **P_IBA-08**: Probenkörper mit Bettasche; ursprünglichen Körnung von 0-8 mm
- **P_RC-ZS**: Probenkörper mit autogen abgetragenen Zementstein aus Betonabbruch
- **P_IBA-PK**: Probenkörper mit Bettasche; ursprünglichen Körnung 0-8 mm sowie Pyrolysekoks aus Verbrennungsrückstand von organischem Material

Das Säulendiagramm (Abbildung 44) zeigt zum einen die Druckfestigkeit [MPa] nach 28 Tagen (blauer Balken) und zum anderen die Druckfestigkeit nach 56 Tagen (orangene Balken). Zudem beinhaltet das Säulendiagramm zwei Trennlinien. Die rote Linie zeigt den Grenzwert für C30/37 Beton, die lila Linie den Grenzwert für C25/30 Beton nach Norm DIN EN 206-1; Tabelle 10. Beide Festigkeitsklassen finden Anwendung in Standartbauwerken.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

4.4.1.1 P_IBA

Die Probenkörper P_IBA, substituiert mit FB-IBA A+B-02 und FB-IBA A+B-08, zeigen in Abbildung 44 eine deutliche Festigkeitsentwicklung nach 28 Tagen. Der Schwellenwert des C25/30 Betons wird überschritten. Die Druckfestigkeit des Probekörpers P_IBA-02 erreicht nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 26,8 MPa, die des Probenkörpers P_IBA-08 erreicht nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 29,4 MPa.

Nach weiteren 28 Tagen kann erneut eine deutliche Festigkeitsentwicklung beobachtet werden. P_IBA-02 zeigt nach 56 Tagen eine Steigerung der Druckfestigkeit um ca. 20 % auf 32,3 MPa. Die Mischung mit der gröberen Bettasche P_IBA-08 eine Steigerung um ca. 11 % auf 32,8 MPa.

In Quellen vergleichbar zu den alternativen Zusatzstoffen wie Flugasche wird beschrieben, dass die puzzolanischen Reaktionen in Systemen bestehend aus Zement und Flugasche wesentlich verzögert über Wochen hinweg ablaufen (Poon, Lam, und Wong 2000; Snellings und Scrivener 2016; Taylor 1997).

Die Hauptreaktion bei Zement läuft in den ersten Tagen. Dabei bildet sich CH, welches notwendig ist, um mit den alternativen Zusatzstoffen C-S-H-Hydrate zu bilden. Die C-S-H-Hydrate sind wesentlich für die Festigkeitsentwicklung im Beton. Erst wenn durch die Zementhydration ausreichend CH vorhanden ist, beginnt die Reaktion. Die C-S-H-Hydrate sind chemisch anders aufgebaut als C-S-H-Hydrate aus reiner Zementhydration. Das Calcium zu Silikat Verhältnis nimmt mit steigender Substitution von AHWZ zu. Dies sorgt einerseits für eine geringere Frühfestigkeit wirkt sich jedoch langfristig positiv auf den Beton aus. Es entstehen durch das veränderte Ca/Si-Verhältnis stabilere Mikrostrukturen, welche die Dauerhaftigkeit des Betons begünstigen (Poon, Lam, und Wong 2000; Snellings und Scrivener 2016; Taylor 1997).

Die Bettaschen zeigen im Vergleich zu den anderen alternativen Zusatzstoffen die höchste Druckfestigkeit.

4.4.1.2 P_RC-ZS

P_RC-ZS zeigt ähnliche Festigkeitsentwicklungen wie die Bettaschen (Abbildung 44). Die Hydrationsfähigkeit des Zementes ist somit noch nicht vollständig erschöpft. Wie vermutet sind nicht reagierte puzzolanisch aktive Reste vorhanden. Der Probenkörper erreicht nach 28

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Tagen das C25/30 Niveau mit einer Druckfestigkeit von 25,9 MPa und pendelt sich nach 56 Tagen um ca. 30 MPa ein.

4.4.1.3 P_PK

P_PK erzielt die geringste Druckfestigkeit im Vergleich zu den anderen alternativen Zusatzstoffen (Abbildung 44) und erreicht knapp den C25/30 Schwellenwert mit einer Druckfestigkeit von 25 MPa. Nach weiteren 28 Tagen nimmt die Festigkeitsentwicklung geringfügig zu und steigt auf 26,6 MPa. Grund hierfür ist der Mahlgrad. Aufgrund der schwierigen Mahlbedingungen (Staubentwicklung) war es nicht möglich ausschließlich Material <0,063 mm zu verwenden, da nicht genügend Material zur Verfügung stand. In der Betonmischung wird Material ≤2 mm verwendet. Nicht gemahlene Kohle behält seine zelluläre Porenstruktur der ursprünglichen Biomasse behält. Die Partikel sind spröde und sorgen für eine Makroporosität im Zementgefüge. Dies schafft Bruchpfade außerhalb der Zementmatrix und erleichtert die Bildung von Mikrorissen. Dadurch kommt es im Falle einer äußeren Belastung zu einem frühzeitigen Versagen der Probenkörper (Hylton u. a. 2024b). In Folge-Versuchen sollte ausschließlich feines Material <0,063 mm verwendet werden.

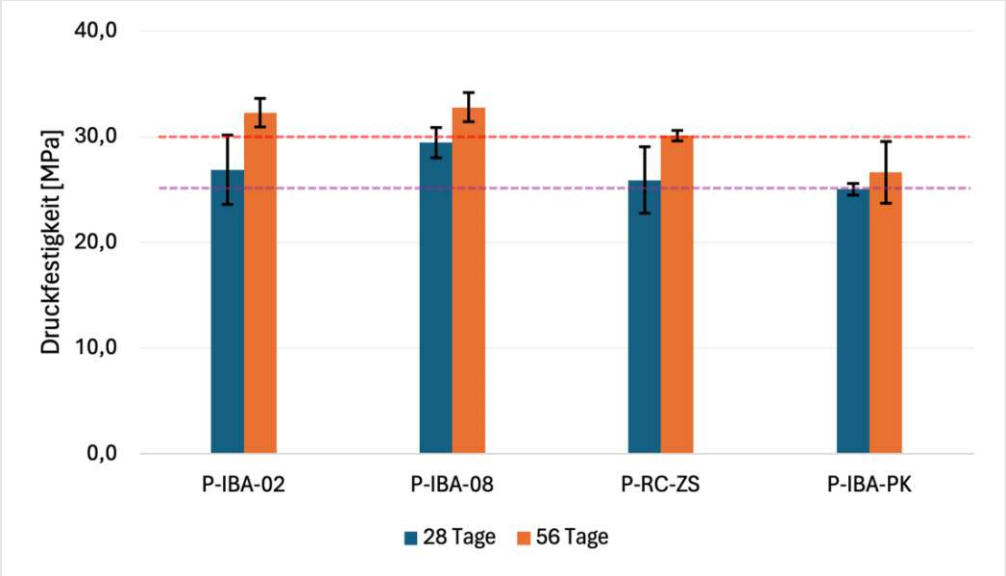

Abbildung 44: Druckfestigkeit [MPa] der Probenkörper mit alternativen Zusatzstoffen

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

5 Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Diplomarbeit wurden drei verschiedene potenzielle alternative Zusatzstoffe für die Betonherstellung mechanisch aufarbeitet, mittels Laser-Diffraktometrie und Röntgenfluoreszenz analysiert und anschließend gemäß DIN EN 206 auf Druckfestigkeit geprüft und in Festigkeitsklassen eingeordnet.

Es stellt sich heraus, dass die Siebparameter (Zeit und Amplitude) den größten Einfluss auf die Feinkorn-Ausbeute (<0,063 mm) haben. Dazu wird der Siebturm (0,063-8 mm) zunächst 10 min bei maximaler Amplitude von 2 betrieben. Nach Ablauf der Zeit wird der Siebturm geteilt (0,063-0,5 mm) und erneut auf maximaler Amplitude für 10 min gesiebt. Die Teilung des Siebturms bewirkt, dass die Amplitude von 2 effektiv erreicht wird. Anderenfalls kann nur eine Amplitude von 1 erreicht werden.

- FB-IBA

Die Bettaschen mit der ursprünglichen Körnung von 0-8 mm und 0-2 mm zeigen in der Analyse des Feinkornbereichs (Laserdiffraktometer) hohe Feingutanteile, welche sich in den hohen Druckfestigkeiten widerspiegeln. Die chemische Analyse der Bettaschen zeigt einen hohen SiO_2 Gehalt und können mittels dem Phasendiagramm Flugaschen chemisch zugeordnet werde. Aufgrund der hohen CaO Anteile (>10 %) sind sie nach DIN EN 450-1 den kalkreichen Flugaschen ähnlich.

P_IBA 02 erzielt eine Druckfestigkeit von 26,8 MPa (C25/30) nach 28 Tagen und 32,3 MPa nach 56 Tagen.

P_IBA 08 erzielt die höchste Druckfestigkeit mit 29,4 MPa (C25/30) nach 28 Tagen und 32,8 MPa nach 56 Tagen.

- RC-ZS

Der Zementstein kann erfolgreich durch den autogenen Mahlprozess von der Gesteinskörnung des recyclierten Betonabbruchs abgetragen werden. Der Feinkornbereich ist im Vergleich zu den Bettaschen und dem Pyrolysekoks breiter gestreut. Die Einordnung des Zementsteins nach der chemischen Analyse liegt laut Phasendiagramm nahe der Zusammensetzung von Klinker. Die Druckfestigkeit der Probenkörper P_RC-ZS liegen nach 28 Tagen bei 25,9 MPa (C25/30). Nach 56 Tagen steigt die Druckfestigkeit auf 30,1 MPa. Es stellt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

sich heraus das der Zementstein eine restliche puzzolanische Aktivität besitzt und als Zumahlstoffe für Zement in Frage kommt.

- PK

Der Mahldurchgang mit Pyrolysekoks ist der Herausforderndste. Es kommt zu einer Staubentwicklung die das Arbeiten erschwert und notwendige Sicherheitsmaßnahmen wie Atemmaske und Absaugung erfordert. Durch die erschwerten Mahlbedingungen konnte im Laufe der Versuchsreihe nicht genügend feinkörniges Material hergestellt werden. Aufgrund dessen wurde als alternativen Zusatzstoff Material ≤2 mm für die Probenkörper verwendet. Dies führte vermutlich zu der geringeren Festigkeitsentwicklungen der Probenkörper P_PK durch Restporosität in den Probenkörpern. Der Probenkörper P_PK erzielt eine Druckfestigkeit von 25 MPa nach 28 Tagen und 26,6 MPa nach 56 Tagen.
Eine fundiert chemische Analyse war, aufgrund der fehlenden analytischen Nachweisbarkeit von Kohlenstoff bei RFA-Messungen, nicht möglich.

Die Ergebnisse zeigen, dass Bettaschen und Zementstein ausreichend reaktiv sind um Anwendung als alternative Zusatzstoffe zu finden. Pyrolysekoks konnte aufgrund der genannten Problematiken nicht eindeutig als alternativer Zusatzstoff nachgewiesen werden. Um die Materialien weiter zu analysieren und deren Potential voll auszuschöpfen sollen folgende Punkte zukünftige Entwicklungen aufzeigen.

- Mahl- und Aufbereitungstechnologie

Der Mahlgrad ist entscheidend für die Reaktivität der alternativen Zusatzstoffe. Um den Mahldurchgang zu optimieren, sollten weitere Versuchsreihen gestartet werden. Vor allem sollte der Füllgrad angepasst werden. Die Literatur schreibt optimale Bedingungen bei 40-70 % vor (Zoz, Reichardt, und Kim 2001).

- Standardisierung und Normung

Da es aktuell keine klaren Normen für die alternative Zusatzstoffe gibt sollte es künftig Studien geben, die sich auf die Entwicklung eigener Prüfmethoden und Kriterien beziehen um Bettaschen, Zementstein und Pyrolysekoks klassifizieren.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

- Weitere Analysen

Die Probenkörper sollten weiteren chemischen Analysen unterzogen werden um die Hydrationsprodukte wie Ettringit und C-S-H Phasen nachzuweisen.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

6 Literaturverzeichnis

An, Jinwoo, Jinyoung Kim, und Boo Hyun Nam. 2017. „Investigation on Impacts of Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash on Cement Hydration“. *ACI Materials Journal* 114(5). doi:10.14359/51689712.

Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie und Klima- und Energiefonds. 2021. *Innovatives Bauen ressourcenschonend, energieeffizient und klimaneutral*.

Cheah, Chee Ban, Jia Jia Liew, Khaw Le Ping Kevin, Rafat Siddique, und Weerachart Tangchirapat. 2023. „Influence of milling parameters on the properties of ground coal bottom ash and its blended cement“. 363. doi:https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.129745.

DETELLIS, JOSHUA, THOMAS JEFFREY, JOSEPHINE H CHEUNG, und DAVID F MYERS. 2018. „Grinding Stabilizing Additive for Vertical Roller Mills“.

Dora, Bernd. 2001. „Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand“.

Europeen Environment Agency. 2024. „Buildings and construction“. https://www.eea.europa.eu/en/topics/in-depth/buildings-and-construction?utm_source=chatgpt.com&activeAccordion=&activeTab=e3e6b879-fef4-4a88-9436-5f0064698270.

Ganapathi, Harsh, und Mayuri Phukan. 2020. „Environmental Hazards of Limestone Mining and Adaptive Practices for Environment Management Plan“. In *Environmental Processes and Management*, Water Science and Technology Library, hrsg. Raj Mohan Singh, Prabhakar Shukla, und Prachi Singh. Cham: Springer International Publishing, 121–34. doi:10.1007/978-3-030-38152-3_8.

Grübl, Peter, Helmut Weigler, und Sieghart Karl. 2002. *Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften*. John Wiley & Sons.

Gubin, V., D. Kadlez, A. Bartik, L. Steiner, J. Zeitlhofer, F. Thelen, H. Hofbauer, und S. Müller. 2025. „Hydrogen Production from Woody Biomass via Fixed-Bed Gasification at Pilot-Scale“. *International Journal of Hydrogen Energy* 114: 462–74. doi:10.1016/j.ijhydene.2025.02.357.

Gupta, V.K. 2017. „Effect of size distribution of the particulate material on the specific breakage rate of particles in dry ball milling“. *Powder Technology* 305: 714–22. doi:10.1016/j.powtec.2016.10.075.

Hamada, Hussein M., Farid Abed, und Arhum Hassan. 2024. „Combined Effect of Iron Ore Waste and Basalt Fiber with High-Volume Supplementary Cementitious Materials on the Workability, Strength, and Microstructure of Sustainable Concrete“. *Construction and Building Materials* 444: 137679. doi:10.1016/j.conbuildmat.2024.137679.

Heike, Mayer-Jauck. 2023. „Österreichisches Montan-Handbuch 2023“.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Hirosawa, Fumie, Tomohiro Iwasaki, und Masashi Iwata. 2021. „Particle Impact Energy Variation with the Size and Number of Particles in a Planetary Ball Mill“ hrsg. M. Shimada. *MATEC Web of Conferences* 333: 02016. doi:10.1051/matecconf/202133302016.

Huber, Harald, Marion Jaros, und Peter Lechner. 1996. „EMISSIONSVERHALTEN VON MVA-SCHLACKE NACH KÜNSTLICHER ALTERUNG“.

Hylton, Julia, Aaron Hugen, Steven M. Rowland, Michael Griffin, und Lori E. Tunstall. 2024a. „Relevant Biochar Characteristics Influencing Compressive Strength of Biochar-Cement Mortars“. *Biochar* 6(1): 87. doi:10.1007/s42773-024-00375-6.

Hylton, Julia, Aaron Hugen, Steven M. Rowland, Michael Griffin, und Lori E. Tunstall. 2024b. „Relevant Biochar Characteristics Influencing Compressive Strength of Biochar-Cement Mortars“. *Biochar* 6(1). doi:10.1007/s42773-024-00375-6.

Imbabi, Mohammed S., Collette Carrigan, und Sean McKenna. 2012. „Trends and Developments in Green Cement and Concrete Technology“. *International Journal of Sustainable Built Environment* 1(2): 194–216. doi:10.1016/j.ijsbe.2013.05.001.

Jacoby, Mitch. 2020. „Alternative Materials Could Shrink Concrete's Giant Carbon Footprint“. *Chemical & Engineering News*: 26–30. doi:10.47287/cen-09845-cover.

Kleinschmidt, S., und J. Tomas. 2009. „Verbesserung der Fließfähigkeit feiner kohäsiver Pulver durch nanoskalige Fließhilfsmittel“. *Chemie Ingenieur Technik* 81(6): 717–33. doi:10.1002/cite.200900025.

Leal Filho, Walter, Julian Hunt, Alexandros Lingos, Johannes Platje, Lara Vieira, Markus Will, und Marius Gavriletea. 2021. „The Unsustainable Use of Sand: Reporting on a Global Problem“. *Sustainability* 13(6): 3356. doi:10.3390/su13063356.

Leckner, Bo, und Fredrik Lind. 2020. „Combustion of Municipal Solid Waste in Fluidized Bed or on Grate – A Comparison“. *Waste Management* 109: 94–108. doi:10.1016/j.wasman.2020.04.050.

Lederer, Jakob, Johannes Hron, Felix Feher, Simon Mika, Julia Mühl, Oliver Zeman, und Konrad Bergmeister. 2024. „Evaluation of Standard Concretes Containing Enhanced-Treated Fluidized-Bed Waste Incineration Bottom Ash as Manufactured Aggregate“. *Case Studies in Construction Materials* 21: e03759. doi:10.1016/j.cscm.2024.e03759.

Makul, Natt. 2025. *Dictionary of Concrete Technology*. Singapore: Springer Nature Singapore. doi:10.1007/978-981-97-2998-2.

Matsanga, Nyasha, Willie Nheta, und Ngonidzashe Chimwani. 2023. „Grinding Media in Ball Mills-A Review“. doi:10.20944/preprints202304.0811.v1.

Mika, Simon, Julia Mühl, Stefan Skutan, Philipp Aschenbrenner, Andreas Limbeck, und Jakob Lederer. 2025. „Substance Flows of Heavy Metals in Industrial-Scale Municipal Solid Waste Incineration Bottom Ash Treatment: A Case Study from Austria“. *Waste Management* 195: 240–52. doi:10.1016/j.wasman.2025.02.011.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Miller, Sabbie A., Arpad Horvath, und Paulo J. M. Monteiro. 2018. „Impacts of Booming Concrete Production on Water Resources Worldwide“. *Nature Sustainability* 1(1): 69–76. doi:10.1038/s41893-017-0009-5.

Mühl, Julia, Stefan Skutan, Gerhard Stockinger, Dominik Blasenbauer, und Jakob Lederer. 2023. „Glass Recovery and Production of Manufactured Aggregate from MSWI Bottom Ashes from Fluidized Bed and Grate Incineration by Means of Enhanced Treatment“. *Waste Management* 168: 321–33. doi:10.1016/j.wasman.2023.05.048.

Müller, Walter. 2014. *Mechanische Verfahrenstechnik und ihre Gesetzmäßigkeiten*. 2., Auflage. München: de Gruyter Oldenbourg.

Murodif, Atfal, Anas Miftah Fauzi, Erizal, und Lina Karlinasari. 2025. „Environmental Impact of Limestone Mining Using A Life Cycle Assessment Method“. *Jurnal Pengelolaan Sumberdaya Alam dan Lingkungan (Journal of Natural Resources and Environmental Management)* 15(1): 122. doi:10.29244/jpsl.15.1.122.

Neville, Adam M. 2011. *Properties of Concrete*. 5th Edition. Harlow Munich: Pearson.

Niedballa, Sabine. 1999. „Dispergierung von feinen Partikelfraktionen in Gasströmungen - Einfluss von Dispergierbeanspruchung und oberflächenmodifizierenden Zusätzen“.

Pacheco, Torgal Fernando, und Said Jalali. 2011. *Eco-efficient construction and building materials*. Springer Science & Business Media.

Poon, C.S., L. Lam, und Y.L. Wong. 2000. „A Study on High Strength Concrete Prepared with Large Volumes of Low Calcium Fly Ash“. *Cement and Concrete Research* 30(3): 447–55. doi:10.1016/s0008-8846(99)00271-9.

Retsch GmbH. 2024. *Application Report: Grinding of Incinerator Bottom Ash*.

Schubert, Heinrich. 2002. *Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik*. WILEY-VCH.

Shivaprasad, Kadepalli Nagendra, Hyun-Min Yang, und Jitendra Kumar Singh. 2024. „A Path to Carbon Neutrality in Construction: An Overview of Recent Progress in Recycled Cement Usage“. *Journal of CO2 Utilization* 83: 102816. doi:10.1016/j.jcou.2024.102816.

Snellings, Ruben, und Karen L. Scrivener. 2016. „Rapid Screening Tests for Supplementary Cementitious Materials: Past and Future“. *Materials and Structures* 49(8): 3265–79. doi:10.1617/s11527-015-0718-z.

Stieß, Matthias. 2009. *Mechanische Verfahrenstechnik - Partikeltechnologie 1*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. doi:10.1007/978/3-540-32552-9.

Stojimirovic, Biljana, Marco Galli, und Gregor Trefalt. 2020. „Forces between Silica Particles in Isopropanol Solutions of 1:1 Electrolytes“. *Physical Review Research* 2(2): 023315. doi:10.1103/PhysRevResearch.2.023315.

Taylor. 1997. *Cement Chemistry*. 2nd ed. London: T. Telford.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Taylor. 2012. *Application of a Portable X-Ray Fluorescence Technique to Assess Concrete Mix Proportions*. Iowa State: National Concrete Pavement Technology Center Iowa State University.

Vaičienė, Marija, und Elvinas Simanavičius. 2022. „The Effect of Municipal Solid Waste Incineration Ash on the Properties and Durability of Cement Concrete“. *Materials* 15(13): 4486. doi:10.3390/ma15134486.

Verein Deutscher Zementwerke e.V, hrsg. 2008. *Zement Taschenbuch*. 51. Ausgabe. Düsseldorf: Verlag Bau+Technik.

Zoz, H., R. Reichardt, und J.S. Kim. 2001. „Anwendung und Auslegung von Trommelmühlen“.

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

7 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: 1. Kaskadenbewegung; 2. Kataraktbewegung; 3. Zentrifuge; 4. Schwingen. Quelle: Daniel Lemmen 13
Abbildung 2: Schema FB-IBA Behandlungsanlage. Adaptiert: (Mika u.a. 2025) 16
Abbildung 3: Beprobung FB-IBA mit Radlader; Mischprobe. Quelle: Simon Mika und Julia Mühl 17
Abbildung 4: Lagerstätte Recyclinggesteinskörnung für RC-ZS der Firma Wopfinger Transportbeton GmbH. Quelle: Jakob Lederer 18
Abbildung 5: Darstellung Down-Draft-Festbettvergaser. Adaptiert: (Gubin u. a. 2025) 19
Abbildung 6: Backenbrecher Firma Retsch GmbH Typ BB 200. Quelle: Daniel Lemmen 20
Abbildung 7: Standard Topfroller Typ TR 12. Quelle: Daniel Lemmen 21
Abbildung 8: Analysesiebmaschine -HAVER EML 450 digital plus- der Firma Haver und und Boecker. Quelle: Daniel Lemmen 23
Abbildung 9: RFA-Gerät und Probenbehälter. Quelle: Daniel Lemmen 25
Abbildung 10: Laserdiffraktometer Typ Mastersizer 2000 der Firma Malvern Panalytical Ltd.. Quelle: Daniel Lemmen 26
Abbildung 11: Zuführrinne mit Vibrationseinheit Mastersizer. Quelle: Daniel Lemmen 26
Abbildung 12: a. Zementmischer b. trockene Bestandteile c. Wasser einfüllen. Quelle: Daniel Lemmen 29
Abbildung 13:a. Einölen der Prüfform b. Rütteltisch c. beschriftete Proben. Quelle: Daniel Lemmen 30
Abbildung 14: a. Ausschalen Probenkörper b. Probenkörper c. Wasserbad. Quelle: Daniel Lemmen 31
Abbildung 15: a. Normmaß quadratische Probenkörper b. Waage c. Prüfeinrichtung. Quelle: Daniel Lemmen 32
Abbildung 16: Überlast Probenkörper a. Zementstein b. Pyrolysekoks. Quelle: Daniel Lemmen 33
Abbildung 17: Agglomerate auf den Sieben mit Maschenweite 0,25 mm-0,063 mm. Quelle: Daniel Lemmen 36
Abbildung 18: Partikel kleiner 0,063 mm (FB-IBA B-08). Quelle: Daniel Lemmen 37

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Abbildung 19: Wasserstoffbrücke zwischen Partikeln. Quelle: Daniel Lemmen 38
Abbildung 20: FB-IBA B-08; 8h gemahlen mit 30 mm Stahlkugeln; Vergleich: 0 h bzw. 2 h bei 80°C trocknen 39
Abbildung 21: Energieeintrag auf ein Agglomerat. Quelle: Daniel Lemmen 39
Abbildung 22: Vergleich Sieblinie verschiedener Siebzeiten und Amplituden an FB-IBA B-0841
Abbildung 23: FB-IBA B-08 gemahlen und 20 min gesiebt bei max. Amplitude und Teilen des Siebturms nach 10 min. Quelle: Daniel Lemmen 41
Abbildung 24: FB-IBA A-08; Siblinie 0 h, 4 h, 12 h 43
Abbildung 25: FB-IBA A-02; Siblinie 0 h, 4 h, 12 h 44
Abbildung 26: FB-IBA A-08: Bild A: 4 h mahlen mit 30 mm Kugeln; Bild B: weitere 8 h mahlen mit 10 mm Kugeln. Quelle: Daniel Lemmen 44
Abbildung 27: FB-IBA B-08; Sieblinie 0 h, 4 h, 12 h 45
Abbildung 28: FB-IBA B-08; Reststoffe nach 12 h mahlen. Quelle: Daniel Lemmen 46
Abbildung 29: FB-IBA B-02; Sieblinie 0 h, 4 h, 12 h 46
Abbildung 30: Autogen gemahlener Betonabbruch nach 12 h. Quelle: Daniel Lemmen 47
Abbildung 31: RC-ZS-0; Sieblinie nach 0 h, 6 h, 12 h 48
Abbildung 32: RC-ZS-I; Sieblinie nach 0 h, 6 h, 12 h 49
Abbildung 33: RC-ZS-O; Material Sieblinie 1-<0,063 mm. Quelle: Daniel Lemmen 50
Abbildung 34: PK-O; Sieblinie 0 h, 4 h und 12 h 51
Abbildung 35: PK-I; Sieblinie 0 h, 4 h und 12 h 52
Abbildung 36: PK-O und PK-I; Agglomerate und Krusten auf Siebhilfen. Quelle: Daniel Lemmen 52
Abbildung 37: Optimale Ausbeute an Feingutanteil PK-O und PK-I nach jeweils 4 h Isopropanol 53
Abbildung 38: Mastersizer FB-IBA A und FB-IBA B 55
Abbildung 39: Mastersizer RC-ZS-O und RC-ZS-I 56
Abbildung 40: Mastersizer PK-O und PK-I 57
Abbildung 41: RFA Ergenisse FB-IBA, RC-ZS, (PK) 58
Abbildung 42: Drei Phasendiagramm alternative Zusatzstoffe (SiO_2, CaO, Al_2O_3) Quelle: Adaptiert: (Unseld 2019) 61
Abbildung 43: Weiße kristalline Schicht auf Probenkörper nach 28. Tagen; a. P_IBA 08 b. Zementstein c. Pyrolysekoks. Quelle: Daniel Lemmen 64

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildung 44: Druckfestigkeit [MPa] der Probenkörper mit alternativen Zusatzstoffen..... 68
Abbildung 45: Prüfprotokoll P_IBA-02 nach 28 Tage..... 95
Abbildung 46: Prüfprotokoll P_IBA-02 nach 56 Tage..... 95
Abbildung 47: Prüfprotokoll P_IBA-08 nach 28 Tage..... 95
Abbildung 48: Prüfprotokoll P_IBA-08 nach 56 Tage..... 95
Abbildung 49: Prüfprotokoll P_RC-ZS nach 28 Tage 95
Abbildung 50: Prüfprotokoll P_RC-ZS nach 56 Tage 95
Abbildung 51: Prüfprotokoll P_PK nach 28 Tage 95
Abbildung 52: Prüfprotokoll P_PK nach 56 Tage 95

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

8 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Mörtelprismen Druckfestigkeit mit Betonbrechsand 7
Tabelle 2: Siebdauern in Abhängigkeit der Maschenweite 10
Tabelle 3: Probenbezeichnung Bettaschen (FB-IBA) 17
Tabelle 4: Probenbezeichnung durch Autogenmahlung hergestellte Feinfraktion aus Betonabbruch, welche überwiegend aus Zementstein besteht (RC-ZS) 18
Tabelle 5: Probenbezeichnung Pyrolysekoks (PK) 19
Tabelle 6: Trommel-Konfigurationen Kugeln 22
Tabelle 7: Rezeptur P_IBA-02 und P_IBA--08 27
Tabelle 8: Rezeptur P_RC-ZS 28
Tabelle 9: Rezeptur P_IBA-PK 28
Tabelle 10: Siebturm Versuchs-Parameter 40
Tabelle 11: d(0,1); d(0,5); d(0,9); spezifische Oberfläche alternativen Zusatzstoffe 54
Tabelle 12: Ergebnisse RFA-Analyse in Massen-% bezogen auf die Trockenmasse der Proben 60
Tabelle 13: Vergleich Bettaschen (FB-IBA) mit DIN EN 450-1 in Massen-% bezogen auf die Trockenmasse der Proben 62
Tabelle 14: Vergleich Zementstein (RC-ZS) mit DIN EN 297-1 in Massen-% bezogen auf die Trockenmasse der Proben 63
Tabelle 15: Standardabweichung der Probenkörper (Druckfestigkeit) 66
Tabelle 16: Sieblinie FB-IBA B-08; 20 mm Stahlkugeln; Amplitude: 0,5; Siebzeit: 5 min; 12 h mahlen 81
Tabelle 17: Sieblinie FB-IBA B-08; 30 mm Stahlkugeln; Amplitude: 0,5; Siebzeit: 5 min; 12 h mahlen 81
Tabelle 18: Sieblinie FB-IBA B-08; 10/30 mm Stahlkugeln-Mischung; Amplitude: 1; Siebzeit: 10 min; 24 h mahlen 82
Tabelle 19: Sieblinie FB-IBA B-08; 30 mm 8h + 10 mm 16 h Stahlkugeln; Amplitude: 1; Siebzeit: 10 min; 24 h mahlen 82
Tabelle 20: Sieblinie FB-IBA B-08; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2 82

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 21: Sieblinie FB-IBA B-02; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2 83
Tabelle 22: Sieblinie FB-IBA A-08; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2 83
Tabelle 23: Sieblinie FB-IBA A-02; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2 83
Tabelle 24: Sieblinie Betonabbruch 12 h gemahlen; 5 Sieblinien; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2 84
Tabelle 25: Sieblinie Betonabbruch 12 h gemahlen mit 4 ml Isopropanol; 5 Sieblinien; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2 84
Tabelle 26: Sieblinie Betonabbruch gemahlen 12 h; 1 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2 84
Tabelle 27: Sieblinie Betonabbruch gemahlen 12 h mit 3 ml Isopropanol; 1 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2 84
Tabelle 28: Sieblinie Pyrolysekoks gemahlen 12 h mit 4 ml Isopropanol; 12 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2 85
Tabelle 29: Sieblinie Pyrolysekoks gemahlen 12 h; 12 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2 85
Tabelle 30: Mastersizer Analyseergebnis 86
Tabelle 31: RFA Analyseergebnisse alternative Zusatzstoffe 89
Tabelle 32: Schwermetallgehalt FB-IBA A-08 und FB-IBA B-08 90
Tabelle 33: Festigkeitsmessung 28 Tage: Maße Probekörper [cm], Druckfläche [kg], Gewicht [kg] 92
Tabelle 34: Festigkeitsmessung 28 Tage: Bruchkraft [kN] Druckfestigkeit [MPa] 93
Tabelle 35: Festigkeitsmessung 56 Tage: Maße Probekörper [cm], Druckfläche [kg], Gewicht [kg] 93
Tabelle 36: Festigkeitsmessung 56 Tage: Bruchkraft [kN] Druckfestigkeit [MPa] 94

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

9 Anhang

9.1 Siebanalyse

- FB-IBA B-08

Tabelle 16: Sieblinie FB-IBA B-08; 20 mm Stahlkugeln; Amplitude: 0,5; Siebzeit: 5 min; 12 h mahlen

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	5,2	565	550,4	118,2	33,8	244	752,2	268,2	45,6
2	6,6	514	466,4	69	18,4	885,8	413,2	140,4	59,6
4	6	480,9	420	54,4	21	1045	358,4	90,8	73,6
6	2,6	452,2	398,2	45,2	10,8	928,8	445,6	178	95,8
8	4,4	372,8	294,2	28,4	10,2	532,4	777,8	371,4	153,6
10	4	325,8	244,4	18,2	7,6	485,2	945,8	304,4	193,4
12	4,4	308	205	14	25,8	937,8	637,4	178,6	211,2

Tabelle 17: Sieblinie FB-IBA B-08; 30 mm Stahlkugeln; Amplitude: 0,5; Siebzeit: 5 min; 12 h mahlen

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	5,8	352,8	741,2	115,8	57,4	528,2	730,6	296,2	37,6
2	1,6	186,6	145,2	24,6	16,4	49,6	1282,2	686,8	116
4	0,8	105,2	61,4	8	15,8	70,4	1472,4	594,6	164,8
6	0	61	34,6	4,2	7	56,8	996,8	1055,4	274,2
8	0	25,4	8,6	3,8	7,6	1101,6	595,4	274,2	486,4
10	0	23,4	9,2	4,4	10,2	471,6	1041	466,6	539,8
12	0	23,4	6,8	3	830,6	625	357	156,8	565,6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 18: Sieblinie FB-IBA B-08; 10/30 mm Stahlkugeln-Mischung; Amplitude: 1; Siebzeit: 10 min; 24 h mahlen

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	2,2	317,4	387,4	110,4	142,2	548,8	554,8	128,2	14,2
4	1,2	276,4	320,2	70,4	25	619	711,8	164	18,6
8	0,6	227,2	278,8	55,9	318,6	634,8	467,3	179,4	24
12	1	189,8	213,8	32,8	371,8	914,2	348,4	46,8	22,8
16	0,4	155,6	161,4	24,2	8,2	9,4	99,2	632,2	1068,4
20	0,4	118,9	97,6	13	44	249,8	19,2	291,8	1321
24	0,4	106	84,2	14	11,8	7,4	129,2	608,4	1186

Tabelle 19: Sieblinie FB-IBA B-08; 30 mm 8h + 10 mm 16 h Stahlkugeln; Amplitude: 1; Siebzeit: 10 min; 24 h mahlen

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	1,4	220	241,8	47,2	21,4	68,4	1167,8	379,2	51,2
4	0,2	103	73,2	10,4	7,2	117,2	1320,8	507	57,2
8	0	103,3	71,6	8	10	984	821,6	177,8	21
12	0	105,6	73,4	48,4	1021	558,6	354,8	62,8	18
16	0	100,6	71,6	7,8	2,2	2	77,6	674,4	1233,2
20	0	100,2	70	7,4	3,6	1,8	24,6	671	1306,6
24	0	98,4	71,6	8,2	4,6	1,4	10,6	106,4	1864,6

Tabelle 20: Sieblinie FB-IBA B-08; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	12,7	624,6	640,0	316,2	219,8	138,5	83,5	56,6	70,8
4	3,6	170,2	160,6	24,2	9	16,4	112,8	436	1229,9
8	3	167,9	159,4	23,4	4,8	3	9	191	1596,2
12	3,2	166	161,6	20,8	4,4	3,4	19,4	172	1607,8

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 21: Sieblinie FB-IBA B-02; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	-	-	970,4	479,4	333,2	210	126,6	85,8	107,4
4	-	-	0,2	4	14,6	286,8	612,6	395	842,2
8	-	-	0	4,4	10,6	96,9	531,2	487,8	1017,8
12	-	-	0	2,6	9,2	38,2	350	572,6	1166,2

- FB-IBA A-02

Tabelle 22: Sieblinie FB-IBA A-08; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	24,6	221,0	628,4	429,1	255,8	233,6	173,7	93,1	55,1
4	0,6	45,8	73,6	17,2	4,2	11,8	239,6	579,8	1209,2
8	0,6	43,4	16,4	74,4	3,4	1,6	34,8	527,8	1474,4
12	0,6	42,8	12,8	76,8	3	1,4	5,4	247,8	1777,8

Tabelle 23: Sieblinie FB-IBA A-02; 30 mm 4 h + 10 mm 8 h Stahlkugeln; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
4	-	-	0	25,2	103,6	468	531,2	379,6	639,4
8	-	-	0	25	70,8	282,4	494,8	396,2	870
12	-	-	0	23,2	59	158,2	462,8	382,2	1047,6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- RC-ZS

Tabelle 24: Sieblinie Betonabbruch 12 h gemahlen; 5 Sieblinien; Siebzeit: 20 min; Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*16*	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]										
0	202,4	847,2	603,2	532,6	445,8	265,4	197,8	107	67,8	80,4
3	150	882,8	601,2	517,2	436,2	260	206,2	120	112,6	60
6	152,9	886,8	610	536,9	419	242	180	84,8	46,6	186,4
9	153,2	867,4	614	528,9	409,4	225	171	75,2	32,9	236,4
12	147	869,6	619	528	401,6	220,2	163,4	73,6	2,8	292,2

Tabelle 25: Sieblinie Betonabbruch 12 h gemahlen mit 4 ml Isopropanol; 5 Sieblinien; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*16*	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]										
0	217	817,9	619,6	549,9	444,6	262,6	199	108,4	63,4	81
3	221	783	621,4	535,8	431	263,4	244,2	117	96	42
6	222,4	789,6	625	546,2	415,8	253,6	186,4	90	61,4	167,8
9	212	797,9	625,4	539	417,9	236,6	177,8	80,9	16	244
12	194,6	807,4	631	541,4	407,4	227,2	169	78,2	1,2	294

Tabelle 26: Sieblinie Betonabbruch gemahlen 12 h; 1 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*16*	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]										
0	209,7	832,5	611,4	541,2	445,2	264	198,4	107,7	65,6	80,7
12	348,2	1642,6	1241,6	1188,2	952,4	552,6	405	168,4	13,6	373,6

Tabelle 27: Sieblinie Betonabbruch gemahlen 12 h mit 3 ml Isopropanol; 1 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*16*	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]										
0	209,7	832,5	611,4	541,2	445,2	264	198,4	107,7	65,6	80,7
12	255	1648,2	1320,4	1197	946,4	567	437	177,4	26	307,2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

- Pyrolysekoks

Tabelle 28: Sieblinie Pyrolysekoks gemahlen 12 h mit 4 ml Isopropanol; 12 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	0,2	20,0	62,0	73,8	41,1	32,3	45,1	39,0	51,0
1	0	9	34,2	25	16,8	21	44,6	130,2	83,6
2	0	10,6	32,2	23,6	13,2	26,2	39,6	174,2	45,2
3	0	10,6	27,8	19,6	11,8	24,2	29,2	200,4	38,9
4	0	9,2	24,2	18,6	7	6,2	9,2	95,8	192
6	0	7,4	17	11,4	6,8	4,4	6	172	116,9
8	0	6,2	10,8	8,2	4,4	3,6	7,2	221,8	89
10	0	3,8	2,6	1,8	1,8	4,4	5,2	238,9	91
12	0	0,4	0,2	0,9	0,9	3,5	27,8	220,4	34

Tabelle 29: Sieblinie Pyrolysekoks gemahlen 12 h; 12 Sieblinie; Siebzeit: 20 min, Amplitude 2

Maschenweite [mm]	*8*	*4*	*2*	*1*	*0,5*	*0,25*	*0,125*	*0,063*	*<0,063*
Zeit [h]									
0	0,2	20,0	62,0	73,8	41,1	32,3	45,1	39,0	51,0
1	0,2	15,4	53,2	44,4	28,4	29	41	112	64,8
2	0,6	14,6	49,2	43,2	26,2	28	38,6	139,4	48,4
3	0	14,4	45,4	41	22	12,8	38,6	154,6	38
4	0	13,4	39,4	40,4	19,6	14	19,4	55,6	177,8
6	0	9,8	31,6	33,6	17	12,2	16,4	141,8	130
8	0	9,2	23,8	27,6	13,4	12	16,4	123,4	156,8
10	0	7	18,9	20,8	14,2	10,6	20,2	197,6	89,8
12	0	6,8	12,4	12,2	8,2	8	15,6	169,2	144,8

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

9.2 Mastersizer

Tabelle 30: Mastersizer Analyseergebnis

Probe:	*FB-IBA B 08*	*FB-IBA B 02*	*FB-IBA A 08*	*FB-IBA A 02*	*Zement-stein + Iso*	*Zement-stein*	*Pyrolysekoks + Iso*	*Pyrolysekoks*
Korngröße [µm]	Mittelwert prozentuale Masseanteile [%]							
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,1
0,2	0,0	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1
0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,0	0,1	0,1
0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2
0,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,3	0,2	0,2	0,2
0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,4	0,2	0,2	0,3
0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,3	0,3	0,4
0,4	0,2	0,3	0,2	0,3	0,6	0,4	0,3	0,5
0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

0,4	0,3	0,4	0,3	0,4	0,7	0,6	0,4	0,6
0,5	0,4	0,5	0,3	0,5	0,8	0,7	0,4	0,7
0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,8	0,8	0,4	0,7
0,6	0,4	0,5	0,4	0,5	0,9	0,8	0,4	0,8
0,7	0,5	0,6	0,4	0,6	0,9	0,9	0,4	0,8
0,8	0,5	0,6	0,4	0,6	0,9	0,9	0,5	0,9
0,9	0,5	0,6	0,5	0,6	1,0	0,9	0,5	1,0
1,0	0,5	0,6	0,5	0,6	1,0	0,9	0,6	1,1
1,1	0,6	0,6	0,5	0,6	1,0	1,0	0,6	1,2
1,3	0,6	0,7	0,5	0,6	1,2	1,0	0,8	1,4
1,4	0,6	0,7	0,6	0,7	1,3	1,1	0,9	1,5
1,6	0,7	0,8	0,6	0,7	1,4	1,2	1,0	1,8
1,8	0,7	0,8	0,7	0,8	1,6	1,3	1,2	2,0
2,0	0,8	0,9	0,7	0,9	1,8	1,5	1,5	2,3
2,2	0,8	1,0	0,8	0,9	1,9	1,6	1,7	2,7
2,5	0,9	1,1	0,9	1,0	2,1	1,8	2,0	3,0
2,8	1,0	1,2	1,0	1,1	2,3	2,0	2,2	3,3
3,2	1,1	1,4	1,1	1,3	2,4	2,2	2,5	3,7
3,6	1,3	1,5	1,2	1,4	2,6	2,4	2,8	4,0
4,0	1,4	1,6	1,3	1,5	2,7	2,6	3,0	4,3
4,5	1,5	1,8	1,5	1,7	2,7	2,7	3,3	4,6
5,0	1,6	1,9	1,6	1,8	2,7	2,8	3,5	4,7
5,6	1,7	2,0	1,7	1,9	2,7	2,9	3,6	4,9
6,3	1,8	2,2	1,8	2,1	2,7	2,9	3,8	4,9
7,1	1,9	2,3	1,9	2,2	2,7	2,9	3,9	4,8
8,0	2,1	2,4	2,0	2,4	2,6	2,9	3,9	4,7
8,9	2,2	2,5	2,1	2,5	2,6	2,8	3,9	4,5
10,0	2,3	2,6	2,2	2,6	2,5	2,8	4,0	4,2
11,2	2,4	2,7	2,3	2,7	2,5	2,7	3,9	3,8
12,6	2,6	2,8	2,4	2,8	2,5	2,7	3,9	3,4
14,2	2,8	2,9	2,5	2,9	2,4	2,6	3,8	2,9
15,9	3,1	3,1	2,7	3,1	2,4	2,6	3,8	2,5
17,8	3,5	3,2	2,9	3,3	2,3	2,5	3,7	2,0
20,0	3,9	3,4	3,2	3,5	2,3	2,5	3,5	1,6
22,4	4,3	3,6	3,5	3,7	2,2	2,5	3,4	1,2
25,2	4,7	3,9	3,9	4,0	2,2	2,4	3,2	0,9
28,3	5,0	4,1	4,3	4,2	2,1	2,4	3,0	0,6

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

31,7	5,1	4,2	4,7	4,3	2,1	2,3	2,7	0,4
35,6	5,2	4,3	5,0	4,4	2,0	2,3	2,4	0,2
39,9	5,0	4,3	5,2	4,3	2,0	2,2	2,0	0,0
44,8	4,7	4,1	5,2	4,2	1,9	2,1	1,5	0,0
50,2	4,2	3,8	5,1	3,9	1,9	2,0	1,2	0,0
56,4	3,6	3,4	4,7	3,5	1,8	1,9	0,8	0,0
63,2	3,0	2,9	4,2	3,0	1,8	1,7	0,6	0,0
71,0	2,2	2,4	3,6	2,5	1,7	1,6	0,3	0,0
79,6	1,6	1,8	2,8	2,0	1,7	1,5	0,2	0,0
89,3	1,0	1,3	2,1	1,5	1,6	1,4	0,1	0,0
100,2	0,5	0,9	1,4	1,0	1,4	1,3	0,1	0,0
112,5	0,1	0,5	0,8	0,6	1,3	1,2	0,1	0,1
126,2	0,0	0,2	0,4	0,3	1,1	1,0	0,1	0,2
141,6	0,0	0,1	0,1	0,1	1,0	0,9	0,1	0,3
158,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,8	0,8	0,2	0,5
178,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,7	0,7	0,2	0,6
200,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,6	0,2	0,8
224,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,3	0,5	0,2	0,6
251,8	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,4	0,2	0,2
282,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,1	0,0
317,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,1	0,0
355,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
355,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
399,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
447,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
502,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
563,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
632,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
709,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
796,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
893,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1002,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1124,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1261,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1415,9	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1588,7	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1782,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

9.3 RFA-Analyse

Tabelle 31: RFA Analyseergebnisse alternative Zusatzstoffe

	FB-IBA B-08 [ppm]	*FB-IBA B-02 [ppm]*	*FB-IBA A-08 [ppm]*	*FB-IBA -08 2 [ppm]*	*Zementstein [ppm]*	*Pyrolysekoks [ppm]*
Mo	61,5	43,3	61,2	58,6	9,1	39,0
Zr	437,4	465,9	443,1	363,7	79,3	52,0
Sr	204,4	264,7	218,8	261,9	228,8	208,5
U	7,6	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Rb	54,6	65,1	58,5	58,2	19,8	61,8
Th	4,3	4,4	4,2	5,5	1,8	1,7
Pb	680,9	802,5	737,4	880,6	30,2	23,3
Au	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Se	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
As	33,4	27,8	37,6	40,3	8,5	7,8
Hg	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Zn	646,6	2041,4	926,4	2598,9	80,0	119,8
W	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Cu	543,4	2371,9	1035,7	3639,8	68,4	110,9
Ni	191,1	143,7	197,5	240,7	< LOD	< LOD
Co	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Fe	13134,9	18611,1	15571,6	22670,5	7198,0	10849,5
Mn	333,0	639,0	436,3	1082,0	1939,5	3347,6
Cr	564,0	425,7	571,3	556,7	57,7	729,1
V	47,0	69,1	46,7	57,7	27,3	26,4
Ti	2201,9	2673,6	1800,1	2273,6	1624,5	1235,0
Sc	89,2	113,7	77,0	78,0	161,8	152,7
Ca	97407,5	147332,7	83700,9	89553,4	277506,8	228972,3
K	9593,6	12318,0	13198,3	15905,9	6648,0	32473,4
S	1069,6	2317,6	1690,5	5377,9	1823,7	1493,9
Ba	560,4	482,9	514,5	695,3	< LOD	< LOD
Cs	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Te	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Sb	< LOD	< LOD	< LOD	77,5	< LOD	< LOD
Sn	< LOD	< LOD	< LOD	85,3	< LOD	< LOD
Cd	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ag	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Pd	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Bal	650729,6	617165,3	640291,7	638870,3	638162,3	656450,3
Nb	12,4	15,5	14,2	14,1	7,0	8,7
Bi	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Re	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Ta	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD
Hf	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD	< LOD

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.
TU Bibliothek Your knowledge hub WIEN

Al	15006,8	18753,0	17650,9	19095,1	8433,6	12559,2
P	2601,4	3250,4	2990,9	3934,0	1493,2	3149,6
Si	195778,4	157146,3	211650,1	180688,6	50000,1	36495,2
Cl	2084,1	5605,1	1751,3	3351,1	402,8	452,1
Mg	3874,9	4510,1	4118,6	5624,1	4519,6	9646,6

Tabelle 32: Schwermetallgehalt FB-IBA A-08 und FB-IBA B-08

		Herkunft MVA		*FB-IBA A*	*FB-IBA B*
Gesamtgehalt	Restmetallgehalt Fe > 4mm	RM Fe	%TM	0,02%	0,00%
	Restmetallgehalt NE > 4mm	RM NE	%TM	0,09%	0,06%
	Aluminium metallisch	Al met	%	0,06	0,07
	Aluminium ges	Al	%	0,832	0,852
	Antimon ges	Sb	mg/kg TS	32,6	26,7
	Arsen ges	As	mg/kg TS	4,61	2,95
	Barium ges	Ba	mg/kg TS	230	284
	Beryllium ges	Be	mg/kg TS	0,44	0,313
	Blei ges	Pb	mg/kg TS	180	166
	Bor ges	B	mg/kg TS	114	59,1
	Cadmium ges	Cd	mg/kg TS	0,99	1,22
	Calcium ges	Ca	mg/kg TS	40.500	62.200
	Chrom ges	Cr	mg/kg TS	189	70,2
	Cobalt ges	Co	mg/kg TS	47,7	35,2
	Eisen ges	Fe	mg/kg TS	10.200	7.610
	Kupfer ges	Cu	mg/kg TS	1.810	2.800
	Lithium ges	Li	mg/kg TS	< 1,79	< 1,79
	Magnesium ges	Mg	mg/kg TS	6.550	11.500
	Mangan ges	Mn	mg/kg TS	569	458
	Molybdän ges	Mo	mg/kg TS	6,81	5,59
	Nickel ges	Ni	mg/kg TS	89,3	36,5
	Quecksilber ges	Hg	mg/kg TS	< 0,179	< 0,180
	Selen ges	Se	mg/kg TS	1,53	< 0,692
	Silber ges	Ag	mg/kg TS	7,31	0,911
	Thallium ges	Tl	mg/kg TS	2,22	1,72

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Vanadium ges	V	mg/kg TS	16,7	18,1
Zink ges	Zn	mg/kg TS	1.300	590
Zinn ges	Sn	mg/kg TS	37,4	20,5
Kalium ges	K	mg/kg TS	1.970	1.790
Natrium ges	Na	mg/kg TS	5.570	3.690
Phosphor ges	P	mg/kg TS	< 5.340	< 5.370
Schwefel ges	S	mg/kg TS	4.880	1.530
Titan ges	Ti	mg/kg TS	927	666
TOC fest	TOC fest	%	0,301	0,0605
Kohlenwasserstoffe ges	KW	mg/kg TS	207	301
PAK ges	PAK	mg/kg TS	0,351	0,384
BTEX ges	BTEX	mg/kg TS	< 0,210	< 0,208
Glühverlust	GV	%	0,587	0,37
Trockensubstanz	TS	%	95,21	95,96
Wassergehalt	WG	%	4,79	4,04
pH Wert	pH	-	11,4	11,3
Trübung Wert	Trübung	NTU	6,2	6,4
Leitwert	Leitwert	mS/m	142	69,7
Abdampfrückstand	AR	mg/kg TS	9.700	3.750
Aluminium Eluatgehalt	Al Eluat	mg/kg TS	3,1	18
Antimon Eluatgehalt	Sb Eluat	mg/kg TS	0,085	0,21
Arsen Eluatgehalt	As Eluat	mg/kg TS	< 0,0070	< 0,0070
Barium Eluatgehalt	Ba Eluat	mg/kg TS	2	2,3
Beryllium Eluatgehalt	Be Eluat	mg/kg TS	< 0,00022	< 0,00022
Blei Eluatgehalt	Pb Eluat	mg/kg TS	0,076	0,037
Bor Eluatgehalt	B Eluat	mg/kg TS	0,21	0,61
Cadmium Eluatgehalt	Cd Eluat	mg/kg TS	< 0,0016	< 0,0016
Calcium Eluatgehalt	Ca Eluat	mg/kg TS	2000	600
Chrom Eluatgehalt	Cr Eluat	mg/kg TS	0,29	0,12
Chromat-Cr	CrO4 2- Eluat	mg/kg TS	< 0,50	< 0,50
Cobalt Eluatgehalt	Co Eluat	mg/kg TS	< 0,0017	< 0,0017
Eisen Eluatgehalt	Fe Eluat	mg/kg TS	< 0,35	< 0,35
Kupfer Eluatgehalt	Cu Eluat	mg/kg TS	0,25	< 0,032
Magnesium Eluatgehalt	Mg Eluat	mg/kg TS	< 73	< 73
Mangan Eluatgehalt	Mn Eluat	mg/kg TS	< 0,0082	< 0,0082
Molybdän Eluatgehalt	Mo Eluat	mg/kg TS	0,45	0,18
Nickel Eluatgehalt	Ni Eluat	mg/kg TS	< 0,0040	< 0,0040
Quecksilber Eluatgehalt	Hg Eluat	mg/kg TS	< 0,0032	< 0,0032
Selen Eluatgehalt	Se Eluat	mg/kg TS	< 0,012	< 0,012

Eluatgehalt

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Silber Eluatgehalt	Ag Eluat	mg/kg TS	< 0,0047	< 0,0047
Thallium Eluatgehalt	Tl Eluat	mg/kg TS	< 0,0032	< 0,0032
Vanadium Eluatgehalt	V Eluat	mg/kg TS	< 0,11	0,14
Zink Eluatgehalt	Zn Eluat	mg/kg TS	< 0,021	< 0,021
Zinn Eluatgehalt	Sn Eluat	mg/kg TS	< 0,0025	< 0,0026
Kalium Eluatgehalt	K Eluat	mg/kg TS	130	99
Natrium Eluatgehalt	Na Eluat	mg/kg TS	320	220
Phosphor Eluatgehalt	P Eluat	mg/kg TS	< 0,034	< 0,034
Schwefel Eluatgehalt	S Eluat	mg/kg TS	1400	180
Titan Eluatgehalt	Ti Eluat	mg/kg TS	< 0,069	< 0,069
Ammonium-N	NH4-N Eluat	mg/kg TS	0,91	0,63
Chlorid	Cl- Eluat	mg/kg TS	500	610
Fluorid	F- Eluat	mg/kg TS	< 11	< 11
Nitrat-N	NO3-N Eluat	mg/kg TS	0,28	< 0,25
Nitrit-N	NO2-N Eluat	mg/kg TS	< 0,34	< 0,34
Phosphat-P	PO4-P Eluat	mg/kg TS	< 0,36	< 0,36
Sulfat	SO4 Eluat	mg/kg TS	4100	600
TOC flüssig	TOC fl	mg/kg	55	31
AOX	AOX	mg/kg	1	0,9

9.4 Druckfestigkeitsversuche

Tabelle 33: Festigkeitsmessung 28 Tage: Maße Probekörper [cm], Druckfläche [kg], Gewicht [kg]

Probe	*Zusammensetzung [%]*		*Probenkörper-Maße [cm]*				*Druckfläche [cm²]*	*Gewicht [kg]*
1	FB-IBA A-02	50	14,7	14,7	14,5	14,7	214,5	8,2
	FB-IBA B-02	50	14,9	14,6	14,9	14,6	217,3	8,1
			15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	Mittelwert						218,9	8,2
2	FB-IBA A-08	50	14,7	14,7	14,9	14,9	218,9	8,2
	FB-IBA B-08	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
			14,8	14,9	14,9	14,9	221,1	8,2
	Mittelwert						221,7	8,2
3	RC-ZS	100	14,9	15,0	14,8	14,9	221,4	8,3
			14,8	15,0	14,7	14,9	220,4	8,2
			15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	Mittelwert						222,3	8,2
4	FB-IBA A-08	25	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
	FB-IBA B-08	25	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
	PK	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,1
	Mittelwert						225,0	8,2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 34: Festigkeitsmessung 28 Tage: Bruchkraft [kN] Druckfestigkeit [MPa]

Probe	*Probenkörper*	*Bruchkraft [kN]*	*Druckfestigkeit [MPa]*
1	P_IBA 02	500,6	23,3
		648,5	29,8
		614,3	27,3
	Mittelwert	587,8	26,8
2	P_IBA 08	619,5	28,3
		697,9	31,0
		639,9	28,9
	Mittelwert	652,4	29,4
3	P_RC-ZS	621,7	28,1
		530,3	24,1
		574,6	25,5
	Mittelwert	575,5	25,9
4	P_PK	552,9	24,6
		577,4	25,7
		558,5	24,8
	Mittelwert	562,9	25,0

Tabelle 35: Festigkeitsmessung 56 Tage: Maße Probekörper [cm], Druckfläche [kg], Gewicht [kg]

Probe	*Zusammensetzung [%]*		*Probenkörper-Maße [cm]*				*Fläche [cm²]*	*Gewicht [kg]*
1	FB-IBA A-02	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	FB-IBA B-02	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
			15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	Mittelwert						225,0	8,3
2	FB-IBA A-08	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	FB-IBA B-08	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
			15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
	Mittelwert						225,0	8,3
3	RC-ZS	100	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
			15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,2
			15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,1
	Mittelwert						225,0	8,2
4	FB-IBA A-08	25	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	FB-IBA B-08	25	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,3
	PK	50	15,0	15,0	15,0	15,0	225,0	8,1
	Mittelwert						225,0	8,2

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Tabelle 36: Festigkeitsmessung 56 Tage: Bruchkraft [kN] Druckfestigkeit [MPa]

Probe	*Probenkörper*	*Bruchkraft [kN]*	*Druckfestigkeit [MPa]*
1	P_IBA 02	704,3	31,3
		713,3	31,7
		760,7	33,8
	Mittelwert	726,1	32,3
2	P_IBA 08	730,6	32,5
		771,6	34,3
		710,7	31,6
	Mittelwert	737,6	32,8
3	P_RC-ZS	664,9	29,6
		685,2	30,5
		681,7	30,3
	Mittelwert	677,3	30,1
4	P_PK	671,0	29,8
		541,9	24,1
		584,1	26,0
	Mittelwert	599,00	26,62

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_IBA 02	strength class:	
date of manufacturing:	02.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	–	size of test member:	
date of testing:	30.04.2025	remarks:	
tester:	ARON	age in days:	28
testing temperature:	20,2	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (side area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,19	500,6
2	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,07	648,5
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,28	644,3
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Würfel 1: Druckfläche : 146,6 / 146,6 / 145,3 / 147,3 mm
Würfel 2: -"- : 149,0 / 145,6 / 148,8 / 146,3 mm

Formular F03, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 45: Prüfprotokoll P_IBA-02 nach 28 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_IBA 02	strength class:	–
date of manufacturing:	03.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	–	size of test member:	–
date of testing:	28.05.2025	remarks:	–
tester:	HRON	age in days:	56
testing temperature:	20,4	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (sida area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,27	704,3
2	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☒*	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,22	713,3
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,34	760,7
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	726,1
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	32,3
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Formular F03, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 46: Prüfprotokoll P_IBA-02 nach 56 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_IBA 08	strength class:	
date of manufacturing:	02.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	–	size of test member:	–
date of testing:	30.04.2025	remarks:	-
tester:	HEON	age in days:	28
testing temperature:	20.2	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (sida area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,18	619,5
2	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,16	597,9
3	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	8,19	639,9
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Würfel 1: 146,5 / 146,8 / 149,4 / 149,1 mm

Würfel 3: 148,3 / 148,5 / 149 / 149 mm

Formular F03, Version 09 erstellt am 15.10.2023

Abbildung 47: Prüfprotokoll P_IBA-08 nach 28 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_IBA 08	strength class:	–
date of manufacturing:	03.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	–	size of test member:	–
date of testing:	28.05.2025	remarks:	–
tester:	HRON	age in days:	56
testing temperature:	20,4	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (sida area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,28	730,6
2	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,25	771,6
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,23	710,7
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	737,6
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	32,8
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Formular F03, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 48: Prüfprotokoll P_IBA-08 nach 56 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_RC-ZS	strength class:	
date of manufacturing:	02.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	–	size of test member:	–
date of testing:	30.04.2025	remarks:	–
tester:	HRON	age in days:	28
testing temperature:	20.2	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (sida area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,25	621,7
2	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☐	not o.k. ☒	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,16	530,3
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,25	574,6
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Würfel 1: 148,5 / 149,9 / 148,2 / 148,6 mm
Würfel 2: 148,3 / 149,6 / 146,7 / 149,2 mm

Formular F03, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 49: Prüfprotokoll P_RC-ZS nach 28 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_RC-ZS	strength class:	–
date of manufacturing:	03.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	–	size of test member:	–
date of testing:	23.05.2025	remarks:	–
tester:	HRON	age in days:	56
testing temperature:	20,4	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (sida area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,19	664,9
2	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,19	685,2
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,09	681,7
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	677,3
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	30,1
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Formular F03, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 50: Prüfprotokoll P_RC-ZS nach 56 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87500
email: iki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	P_PK	strength class:	
date of manufacturing:	02.04.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	-	size of test member:	-
date of testing:	30.04.2025	remarks:	-
tester:	HRON	age in days:	28
testing temperature:	20.2	storage temperature:	

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (sida area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from eveness (± 0,0006 d)		4.2.3.1: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,22	552,9
2	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,19	577,4
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,11	558,8
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	~~469,4~~ 563,03
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	25,0
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Formular F03, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 51: Prüfprotokoll P_PK nach 28 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Department for Civil Engineering and Natural Hazards
Institute for Structural Engineering - Testing Laboratory
A-1190 Wien, Peter-Jordan-Straße 82
Tel: +43/1/47654-87503
email: ki-labor@boku.ac.at

Concrete compressive strength in accordance to EN 12390-3

batch no.	Kohle	strength class:	-
date of manufacturing:	03.09.2025	manufacturer:	TU Wien
date of delivery:	-	size of test member:	-
date of testing:	29.05.2025	remarks:	-
tester:	HRON	age in days:	56
testing temperature:	20,4	storage temperature:	-

test specimen:			
☒ cube 150 x 150 x 150 mm		☐ cylinder d/h =1/2	
☐ cylinder d/h =1/1		☐ other:	
storage condition	☒ water ☐ air	☒ formwork	☐ drilling

test specimen no.	test specimen in accordance to EN 12390-1/4.5.1								mass of test specimen [kg]	concrete compressive strength [MPa] ☐ [kN] ☒
	4.2.3.1: deviation from named dimension (pressure area) (± 0,5 %)		4.2.3.2: deviation from named dimension (side area) (± 0,5 %)		4.2.3.3: deviation from evenness (± 0,0006 d)		4.2.3.4: deviation from perpendicularity (± 0,5 mm)			
1	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,26	671,0
2	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,27	541,9
3	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	o.k. ☒	not o.k. ☐	8,12	584,1
4	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		
5	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐	o.k. ☐	not o.k. ☐		

mean value of test values [kN]	599,0
coefficient of variation of test values [%]	
concrete compressive strength [MPa]	26,6
expanded measurement uncertainty [MPa] ±	

Formular FD3, Version 09, erstellt am 15.10.2023

Abbildung 52: Prüfprotokoll P_PK nach 56 Tage

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.