

Dipl.-Ing. Karin Weimann

**Untersuchungen zur Nassaufbereitung
von Betonbrechsand unter Verwendung
der Setzmaschinenteknik**

Die vorliegende Arbeit entstand an der BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung.

Impressum

**Untersuchungen zur Nassaufbereitung
von Betonbrechsand unter
Verwendung der Setzmaschinenteknik**

2009

Herausgeber:

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
Unter den Eichen 87

12205 Berlin

Telefon: +49 30 8104-0

Telefax: +49 30 8112029

E-Mail: info@bam.de

Internet: www.bam.de

Copyright © 2009 by

BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung

Layout: BAM-Arbeitsgruppe Z.64

ISSN 1613-4249

ISBN 978-3-9812910-7-0

Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik

DISSERTATION

zur Erlangung des akademischen Grades

DOKTOR-INGENIEUR

(Dr.-Ing.)

an der Fakultät Bauingenieurwesen

der Bauhaus-Universität Weimar

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Karin Weimann

aus Berlin

Gutachter: 1. Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
2. Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz
3. Dr.-Ing. Matthias Maultzsch

Tag der Disputation 11.12.2008

Kurzfassung

Gegenwärtig wird Altbeton hauptsächlich durch Zerkleinerung und Klassierung zu rezyklierten Gesteinskörnungen verarbeitet. Dabei fällt bis zu 50 % des Ausgangsmaterials als Betonbrechsand an. Während gröbere Körnungen wieder in der Betonproduktion eingesetzt werden können, ist dieser Verwertungsweg für Betonbrechsande aufgrund ihrer vergleichsweise ungünstigeren Materialeigenschaften nicht möglich. Die schlechtere Baustoffqualität der feinen Körnungen beruht dabei maßgeblich auf ihrem höheren Altzementsteingehalt. In der vorliegenden Arbeit wurde die Verbesserung der Materialeigenschaften von Betonbrechsanden durch ein Nassaufbereitungsverfahren in Hinblick auf eine Wiederverwertung als Gesteinskörnung in der Betonproduktion untersucht. Das Verfahren beinhaltete eine Abrasionsbehandlung zur Abtrennung der Zementsteinmatrix vom Natursteinkorn, einen Klassierungsschritt zur Entfernung der Fraktion $< 100 \mu\text{m}$ und als Hauptverfahrensstufe eine Dichtesortierung mittels Setzmaschinenteknik.

Die Evaluierung der Baustoffeigenschaften von Ausgangsmaterial und aufbereiteten Körnungen erfolgte sowohl an den Gesteinskörnungen als auch an den daraus hergestellten Mörteln und Betonen. Dazu wurden verschiedene chemisch-physikalische und mikroskopische Untersuchungsmethoden eingesetzt. Die Analyseergebnisse zeigten, dass es möglich ist, maßgebliche Baustoffeigenschaften wie Porosität, Wasseraufnahme und Zementsteingehalt mit dem untersuchten Aufbereitungsverfahren deutlich zu verbessern. Die Untersuchungen der RC-Betone mit einem Anteil von bis zu 50 % Betonbrechsand an der gesamten Gesteinskörnung wiesen die positiven Auswirkungen der Nassaufbereitung eindeutig nach. Dies wurde besonders an den Messungen des dynamischen Elastizitätsmoduls und an den Schwindmessungen deutlich. Die Qualität von Natursanden konnte jedoch nicht erreicht werden.

Für sämtliche durchgeführten Betonuntersuchungen konnten signifikante Korrelationen zum Altzementsteingehalt nachgewiesen werden. Dieser konnte als eindeutiger und die tatsächlichen Wirkmechanismen berücksichtigender Güteparameter für rezyklierte Gesteinskörnungen identifiziert werden. Auf dieser Basis wurde ein neuer Bemessungsansatz für Recyclingbeton unter Einbeziehung des Altzementsteingehaltes formuliert.

Anhand einer Modellanlage im industriellen Maßstab wurden ergänzend eine ökobilanzielle Bewertung des Verfahrens und eine Wirtschaftlichkeitsbetrachtung durchgeführt. Die Bewertungen ergaben, dass das untersuchte Verfahren – in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen – sowohl ökologisch vorteilhaft als auch wirtschaftlich sinnvoll durchgeführt werden kann.

Abstract

Currently, concrete rubble is mainly recycled by crushing and classification. During this treatment up to 50 % of the recycled concrete rubble becomes crushed fines. While the coarse recycled concrete aggregates can be used in concrete production, the crushed concrete fines cannot be recycled in this manner because of their inferior material properties. This is primarily due to the remaining old cement paste. In this dissertation a wet treatment to improve the material properties of crushed concrete fines was investigated. The process included the abrasion of the binder matrix in a stirring unit, a classifying step to remove abraded cement particles < 100 µm and a density separation in a jig.

The building material properties of the input material and of the wet treated crushed concrete fines were tested on aggregates and on mortar and concrete specimen. Different physical and chemical analyses as well as microscopical investigations were used. The test results showed that the material qualities of the crushed concrete fines were improved by the wet treatment. The relevant building material properties, e. g. content of binder matrix, porosity and water absorption, changed significantly for the better. Concrete containing crushed concrete fines in a proportion of up to 50 % of the total amount of aggregates was tested. The tests, particularly the measurements of the modulus of elasticity and the shrinkage, clearly showed the positive impact of the wet treatment. The quality of natural sands, however, could not be reached.

The results of all the investigations of the concrete showed significant correlations to the content of old cement paste. It is a clear and relevant quality parameter for recycled concrete aggregates. On the basis of the content of old cement paste an approach for the assessment of concrete with recycled concrete aggregates was developed.

In addition, a life cycle analysis and an economic evaluation confirmed – depending on the general parameters – the environmental compatibility and the commercial feasibility of the wet processing.

INHALTSVERZEICHNIS

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Einleitung und Zielsetzung | 1 |
| 1.1 | Bedeutung des Baustoffrecyclings..... | 1 |
| 1.2 | Zielsetzung und Gliederung | 3 |
| 2. | Grundlagen..... | 5 |
| 2.1 | Stand des Bauschuttrecyclings..... | 5 |
| 2.1.1 | Situation in Deutschland und Europa | 5 |
| 2.1.2 | Regelwerke und Normen für rezyklierte Gesteinskörnungen | 6 |
| 2.2 | Gesteinskörnungen in der Baustoffherstellung | 9 |
| 2.2.1 | Eigenschaften von Gesteinskörnungen..... | 10 |
| 2.2.2 | Frischbetoneigenschaften | 16 |
| 2.2.3 | Festbetoneigenschaften | 18 |
| 2.3 | Technik der Bauschuttzubereitung | 21 |
| 2.3.1 | Zerkleinerung und Klassierung..... | 25 |
| 2.3.2 | Aufschlussverfahren..... | 26 |
| 2.3.3 | Sortierung..... | 28 |
| 2.4 | Setzmaschinentchnik | 32 |
| 2.4.1 | Grundlagen der Setztechnik..... | 32 |
| 2.4.2 | Setzmaschinenaufbau..... | 34 |
| 2.4.3 | Setzmaschinentypen | 35 |
| 2.4.4 | Betriebsparameter von Setzmaschinen..... | 37 |
| 2.4.5 | Beeinflussung des Setzvorgangs durch das Aufgabegut | 38 |
| 2.4.6 | Setztechnik in der Bauschuttzubereitung | 40 |
| 2.5 | Grundlagen der Bilanzierung von Prozessen und Produkten..... | 42 |
| 2.5.1 | Ökobilanzielle Bewertung..... | 42 |
| 2.5.2 | Ökonomische Bewertung | 47 |
| 3. | Material und Methoden..... | 48 |
| 3.1 | Versuchsserien - Ausgangsmaterialien..... | 48 |
| 3.2 | Versuchsanlage zur Mineralstoffzubereitung | 53 |
| 3.2.1 | Verfahrenskonzept und Anlagenaufbau | 53 |
| 3.2.2 | Aufschlussaggregat..... | 53 |
| 3.2.3 | Klassierungsstufe | 55 |
| 3.2.4 | Setzmaschine..... | 55 |
| 3.2.5 | Versuchsdurchführung | 58 |
| 3.3 | Prozessbewertung - Bilanzen und daraus abgeleitete Kenngrößen | 58 |
| 3.4 | Untersuchungen zur Produktbewertung..... | 61 |
| 3.4.1 | Siebanalysen..... | 61 |
| 3.4.2 | Bestimmung säurelöslicher und säureunlöslicher Bestandteile..... | 62 |

| | | |
|-------|---|-----|
| 3.4.3 | Bestimmung der Wasseraufnahme | 62 |
| 3.4.4 | Dichtebestimmungen..... | 63 |
| 3.4.5 | Porositätsbestimmungen | 63 |
| 3.4.6 | Bestimmung von Sulfat und Chlorid | 63 |
| 3.4.7 | Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit | 64 |
| 3.4.8 | Röntgendiffraktometrie | 64 |
| 3.5 | Mikroskopische Untersuchungen | 65 |
| 3.6 | Baustoffuntersuchungen | 65 |
| 3.6.1 | Herstellung der Mörtelmischungen | 65 |
| 3.6.2 | Herstellung der Betonmischungen | 67 |
| 3.6.3 | Frischmörtel- und Frischbetonuntersuchungen | 67 |
| 3.6.4 | Festmörtel- und Festbetonuntersuchungen..... | 68 |
| 4. | Ergebnisse und Auswertung..... | 69 |
| 4.1 | Prozessbewertung | 69 |
| 4.1.1 | Auswertung der Massenbilanzen | 69 |
| 4.1.2 | Anlagentechnik – Aufschlusswirkung des Intensivmischers | 72 |
| 4.1.3 | Anlagentechnik – Trennwirkung der Setzmaschine..... | 76 |
| 4.2 | Chemisch-physikalische Untersuchungen der Körnungen..... | 78 |
| 4.2.1 | Auswertung der Siebanalysen | 78 |
| 4.2.2 | Bestimmung säurelöslicher und säureunlöslicher Bestandteile | 82 |
| 4.2.3 | Wasseraufnahme der Körnungen..... | 86 |
| 4.2.4 | Dichtebestimmungen..... | 88 |
| 4.2.5 | Porositätsbestimmungen | 90 |
| 4.2.6 | Bestimmungen von Sulfat und Chlorid | 92 |
| 4.2.7 | Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit | 94 |
| 4.2.8 | Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie | 94 |
| 4.3 | Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen | 97 |
| 4.4 | Baustoffuntersuchungen | 108 |
| 4.4.1 | Ergebnisse der Mörteluntersuchungen..... | 108 |
| 4.4.2 | Ergebnisse der Betonuntersuchungen | 118 |
| 5. | Ökobilanzielle und ökonomische Bewertung des Verfahrens | 126 |
| 5.1 | Entwicklung eines Szenarios | 126 |
| 5.2 | Ökobilanzielle Bewertung..... | 128 |
| 5.2.1 | Ziel- und Untersuchungsrahmen | 128 |
| 5.2.2 | Sachbilanzierung der ökobilanziellen Bewertung | 129 |
| 5.2.3 | Wirkungsabschätzung der ökobilanziellen Bewertung | 130 |
| 5.2.4 | Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung..... | 131 |
| 5.3 | Ökonomische Bewertung..... | 138 |
| 5.3.1 | Szenario der ökonomischen Bewertung..... | 138 |

| | | |
|-------|--|-----|
| 5.3.2 | Ergebnisse der ökonomischen Bewertung | 139 |
| 6. | Diskussion | 141 |
| 6.1 | Verfahrenstechnische Bewertung | 141 |
| 6.2 | Baustofftechnische Bewertung..... | 143 |
| 6.3 | Ökologische und ökonomische Umsetzbarkeit des untersuchten Aufbereitungsverfahrens..... | 156 |
| 7. | Zusammenfassung und Ausblick..... | 158 |
| 8. | Literatur und Quellen | 162 |
| 9. | Anhänge | 174 |

VERZEICHNIS VON SYMBOLEN UND ABKÜRZUNGEN**Symbole**

| | |
|------------------------------|---|
| Δ k-Wert L | prozentuale Veränderung des k-Wertes eines Leichtgutes gegenüber dem k-Wert des jeweiligen Ausgangsmaterials |
| Δ k-Wert S | prozentuale Veränderung des k-Wertes eines Schwergutes gegenüber dem k-Wert des jeweiligen Ausgangsmaterials |
| Δ RB ₄ | Absolutbetrag der Abweichung der Korngrößenverteilung eines Materials von der auf ein Größtkorn von 4 mm berechneten Regelsieblinie (Basis RB 16) |
| a | Ausbreitmaß nach 10 Minuten (DIN 1048) |
| β_D | Druckfestigkeit |
| β_{BZ} | Biegezugfestigkeit |
| c _A | Konzentration der Natursteinkörnung im Ausgangsmaterial |
| c _F | Konzentration der Natursteinkörnung im Feinstgut |
| c _L | Konzentration der Natursteinkörnung im Leichtgut |
| c _S | Konzentration der Natursteinkörnung im Schwergut |
| d | Korndurchmesser |
| d _m | mittlerer Korndurchmesser |
| D _i | Durchgang durch Sieb i |
| D _{iRC} | Durchgang einer rezyklierten Gesteinskörnung durch Sieb i |
| D _{iRB₄} | Durchgang der auf ein Größtkorn von 4 mm generierten Regelsieblinie B 16 durch Sieb i |
| E | dynamischer E-Modul |
| k | Körnungsziffer |
| M-% | Masseprozent |
| m _A | Masse des Austragsgutes |
| m _F | Masse der Feinstgutes |
| m _L | Masse des Leichtgutes |
| m _S | Masse des Schwergutes |
| m _Ü | Masse des Überkorns |
| n _T | Drehgeschwindigkeit des Mischbehälters vom Aufschlussaggregat |
| ρ | Dichte |
| ρ_F | Dichte des Fluids |
| r | Korrelationskoeffizient |
| R _i | Rückstand auf Sieb i |
| R _m | Masseausbringen |
| s | Standardabweichung |
| VK | relative Standardabweichung / Variationskoeffizient |

Abkürzungen

| | |
|--------------------|---|
| A | Ausgangsmaterial |
| BAM | Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung |
| BB | Backenbrecher |
| BS | Betonbrechsand aus einem selektiven Rückbau in Dresden |
| EDX | Energiedispersive Röntgenmikroanalyse |
| EMPA | Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt |
| ESEM | Environmental scanning electron microscope |
| F | Feinstgut |
| FFE | Forschungsstelle für Energiewirtschaft, München |
| Gemis | Gesamt-Emissions-Modell Integrierter Systeme |
| HAL | Betonbrechsandmischung aus der Aufbereitung von Betonbruch mittels Setzmaschinenteknik im Salzburger Land |
| KEV | kumulierter Energieverbrauch |
| L | Leichtgut |
| n.a. | nicht ausgewertet |
| n.b. | nicht bestimmt |
| Max | Maximum |
| Min | Minimum |
| MW | Mittelwert |
| NMVOC | flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen ohne Methan / Non-Methane Volatile Organic Compounds, |
| NS | Naturstein |
| PB | Prallbrecher |
| RC-Beton | Beton mit Anteilen von rezyklierter Gesteinskörnung |
| RC-Gesteinskörnung | zerkleinerte und klassierte Gesteinskörnung aus dem Bauschuttrecycling |
| RC-Mörtel | Mörtel mit Anteilen von rezyklierter Gesteinskörnung |
| RC-Sand | rezyklierte Sandfraktion aus dem Bauschuttrecycling |
| REM | Betonbrechsand aus dem Rückbau einer Autobahn in Sachsen |
| rpm | Umdrehungen pro Minute (rotations per minute) |
| S | Schwergut |
| SAL | Betonbrechsand aus einem selektiven Rückbau im Salzburger Land |
| SLB | salzsäurelösliche Bestandteile |
| SUR | salzsäureunlösliche Rückstände |
| VS | Vorabsiebung aus dem gleichen selektiven Rückbau wie BS |
| WA | Wasseraufnahme nach 10 Minuten (DIN 4226-100, Anhang D) |
| w/z-Wert | Verhältnis Wasser zu Zement in Mörtel oder Beton |
| ZS | Altzementstein (Zementsteingehalt der RC-Gesteinskörnung) |

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

| | | |
|----------------|--|----|
| Abbildung 1.1: | Betonproduktion und Schätzung der daraus resultierenden Betonabbruchmengen in Deutschland | 2 |
| Abbildung 2.1: | Recyclingquoten in Europa, Daten aus Veröffentlichungen der Jahre 1999 bis 2005 | 5 |
| Abbildung 2.2: | Verfahrensschema für die mehrstufige Bauschuttzubereitung in einer stationären Aufbereitungsanlage..... | 24 |
| Abbildung 2.3: | Schematische Darstellung der verschiedenen Stufen von Aufschluss und Zerkleinerung von Beton..... | 27 |
| Abbildung 2.4: | Handsetzarbeit mit Stauchsieben in der Erzaufbereitung im 16. Jahrhundert..... | 33 |
| Abbildung 2.5: | Grundaufbau einer Setzmaschine ohne Graupenbett (links) und mit Graupenbett (rechts) | 34 |
| Abbildung 2.6: | Luftgepulste Setzmaschinen: unterbettgepulste (links) und seitengepulste Setzmaschine (rechts) | 37 |
| Abbildung 2.7: | Aufbereitungsanlage für mineralische Rohstoffe und Bauschutt in Hallein, Österreich..... | 41 |
| Abbildung 2.8: | Bestandteile einer Ökobilanz nach EN ISO 14040..... | 43 |
| Abbildung 3.1: | Korngrößenverteilung und Fraktionsanteile der verschiedenen Korngruppen der Ausgangsmaterialien BS A (links) und VS A (rechts)..... | 50 |
| Abbildung 3.2: | Korngrößenverteilung und Fraktionsanteile der verschiedenen Korngruppen des Ausgangsmaterials REM A..... | 51 |
| Abbildung 3.3: | Korngrößenverteilungen und Fraktionsanteile der verschiedenen Korngruppen der Ausgangsmaterialien SAL A (links) und HAL A (rechts)..... | 52 |
| Abbildung 3.4: | Verfahrensfließbild zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand | 53 |
| Abbildung 3.5: | Schnitt durch den Eirich-Mischreaktor und Detailansicht des Sternwirblers | 54 |
| Abbildung 3.6: | Schemazeichnung der seitengepulsten Setzmaschine (Typ Alljig), Längs- und Querschnitt..... | 56 |
| Abbildung 3.7: | Schematische Darstellung der Stoffströme im Aufbereitungsprozess | 59 |
| Abbildung 4.1: | Bilanz des Zementsteins (links) und Massenbilanz (rechts) des Nassaufbereitungsprozesses, Versuchsserie BS, Mittelwerte der Versuchsfahrten mit einem Schwergutaustrag > 65% | 71 |
| Abbildung 4.2: | Zementsteingehalt von Leichtgut (links) und Schwergut (rechts) als Funktion des Leichtgut- bzw. des Schwergutaustrages, Serie BS | 72 |

| | | |
|-----------------|---|----|
| Abbildung 4.3: | Anteil des Feinstgutes am Gesamtaustrag in Abhängigkeit von der Rührintensität des Eirichmischers, Mittelwerte der jeweiligen Versuchsserien | 73 |
| Abbildung 4.4: | Zement- und Naturstein im Feinstgut, anteilig am Gesamtaustrag in Abhängigkeit von der Rührintensität des Mischers, Mittelwerte der Versuchsserien BS, VS und REM | 74 |
| Abbildung 4.5: | Protokoll einer Messwerterfassung: obere Linien: Sollsetzbethhöhe und tatsächliche Setzbethhöhe, untere Linie: Messwerterfassung des Mischers, Serie BS, Versuchsfahrten 92 und 93 | 76 |
| Abbildung 4.6: | Korngrößenverteilung von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuchsserie BS, Mittelwerte von 117 Versuchsfahrten | 79 |
| Abbildung 4.7: | Massenanteile der Kornfraktionen von Ausgangsmaterialien und summierten Austragsgütern, Mittelwerte der Serien BS und REM.... | 80 |
| Abbildung 4.8: | Prozentuale Veränderung des Zementsteingehaltes der Austragsgüter im Verhältnis zu den Ausgangsmaterialien, Mittelwerte der Serien BS, VS und REM | 84 |
| Abbildung 4.9: | Verteilung der Zementsteingehalte in den Korngruppen von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serien BS (Mittelwerte der Versuchsfahrten BS 103, BS 117, BS 119) und REM (REM 11) sowie die Siebdurchgangslinien der Materialarten | 85 |
| Abbildung 4.10: | Zementsteingehalte von Schwergut und Leichtgut innerhalb der Korngruppen der Versuchsserie BS (Mittelwerte aus 3 Versuchen) . | 86 |
| Abbildung 4.11: | Wasseraufnahmen von Ausgangsmaterial und Austragsgütern aller Versuchsserien..... | 87 |
| Abbildung 4.12: | Wasseraufnahme von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serien BS, REM und VS als Funktion des Zementsteingehaltes | 88 |
| Abbildung 4.13: | Reindichten (oben) und Rohdichten (unten) von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serie BS als Funktion des Zementsteingehaltes | 89 |
| Abbildung 4.14: | Kornrohndichten von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serien BS, REM und VS als Funktion des Zementsteingehaltes | 90 |
| Abbildung 4.15: | Gesamtporosität von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serie BS als Funktion des Zementsteingehaltes..... | 92 |
| Abbildung 4.16: | Mittelwerte der Sulfatgehalte in den 24-h-Eluaten von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Materialien BS (38 Versuche), VS (8 Versuche) und REM (20 Versuche)..... | 93 |

| | |
|--|-----|
| Abbildung 4.17: Mittelwerte der Chloridgehalte in den 24-h-Eluaten von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Materialien BS, REM und VS | 93 |
| Abbildung 4.18: Ausschnitte aus den Röntgendiffraktogrammen von Schwergut und Leichtgut der Serie BS sowie einer Feinstgutmischprobe | 96 |
| Abbildung 4.19: ESEM-Aufnahme eines Dünnschliffes aus Ausgangsmaterial, Versuch BS 109 | 98 |
| Abbildung 4.20: ESEM-Aufnahme eines Dünnschliffes aus Schwergut, Versuch BS 109 | 98 |
| Abbildung 4.21: ESEM-Aufnahme eines Betonbruchstücks in einem Dünnschliff aus Ausgangsmaterial, Versuch BS 109, sowie zugehörige EDX-Elementverteilungsbilder von Si, Al, Na und Ca..... | 102 |
| Abbildung 4.22: ESEM-Aufnahme eines Betonbruchstücks in einem Dünnschliff aus Schwergut, Versuch BS 109, sowie zugehörige EDX-Elementverteilungsbilder von Si, Al und Ca | 103 |
| Abbildung 4.23: ESEM-Aufnahme von mit Salzsäure behandelten Körnern aus Leichtgut, Versuch BS 109, sowie zugehörige EDX-Elementverteilungsbilder von Si, O, Al, K und Na | 104 |
| Abbildung 4.24: ESEM-Aufnahme eines Betonbruchstücks in einem Dünnschliff aus Ausgangsmaterial, Versuch BS 109 sowie Detailaufnahme eines Risses im Zementstein..... | 105 |
| Abbildung 4.25: ESEM-Aufnahmen von mit Salzsäure behandelten Körnern (links Quarzkörner und rechts Feldspatkorn) aus Schwergut, Versuch BS 109 | 106 |
| Abbildung 4.26: ESEM-Aufnahmen von mit Salzsäure behandelten Körnern aus Ausgangsmaterial (links) und Feinstgut (rechts), Versuch BS 109 | 106 |
| Abbildung 4.27: ESEM-Aufnahmen von Körnern aus Ausgangsmaterial (links) und Feinstgut (rechts), Versuch BS 109 | 107 |
| Abbildung 4.28: Vergleich der Mittelwerte der Luftgehalte von Materialarten aller Versuchsserien | 109 |
| Abbildung 4.29: Entwicklung der Druckfestigkeiten von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuche BS 92 (links) und REM 23 (rechts) im Vergleich zum Referenzmörtel | 111 |
| Abbildung 4.30: Druckfestigkeit nach 28 Tagen als Funktion des Alzementstein-gehalts für Mörtel der Serien BS und REM im Vergleich zum Referenzmörtel..... | 113 |

| | |
|---|-----|
| Abbildung 4.31: Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen als Funktion des Altzementsteingehalts für Mörtel der Serien BS und REM im Vergleich zum Referenzmörtel..... | 113 |
| Abbildung 4.32: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen als Funktion von Δ RB 4 für Mörtel der Serie BS im Vergleich zum Referenzmörtel..... | 114 |
| Abbildung 4.33: Entwicklung der dynamischen E-Moduli von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuche BS 92 (links) und REM 23 (rechts) im Vergleich zum Referenzmörtel..... | 116 |
| Abbildung 4.34: Dynamischer Elastizitätsmodul nach 28 Tagen als Funktion des Altzementsteingehalts für Mörtel der Serien BS und REM im Vergleich zum Referenzmörtel..... | 116 |
| Abbildung 4.35: Dynamischer E-Modul als Funktion der Gesamtporosität von Körnungen der Serien BS, VS und REM..... | 117 |
| Abbildung 4.36: Dynamische E-Moduli nach 28 Tagen als Funktion Δ RB 4 für Mörtel der Serie BS im Vergleich zum Referenzmörtel..... | 118 |
| Abbildung 4.37: Rohdichten nach 28 Tagen von Betonen mit variierten Anteilen von Ausgangsmaterial oder Schwergut, Versuch BS 119, im Vergleich zum Referenzbeton..... | 119 |
| Abbildung 4.38: Entwicklung der Druckfestigkeiten von Beton mit Anteilen von 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung am Gesamtzuschlag im Vergleich zum Referenzbeton, Versuch BS 119..... | 120 |
| Abbildung 4.39: 28-Tage-Druckfestigkeit als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons, Versuch BS 119..... | 121 |
| Abbildung 4.40: Entwicklung der dynamischen E-Moduli von Betonen mit Anteilen von 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung am Gesamtzuschlag im Vergleich zum Referenzbeton, Versuch BS 119..... | 122 |
| Abbildung 4.41: 28-Tage Werte des dynamischen E-Moduls als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons, Versuch BS 119..... | 122 |
| Abbildung 4.42: Druckfestigkeiten (links) und E-Moduli (rechts) von Beton aus Ausgangsmaterial und Schwergut als Funktion der Altzementsteingehalte der RC-Betone, Auswertung aller Betonversuchsreihen.... | 123 |
| Abbildung 4.43: 365-Tage -Schwindmaße von Beton mit Gehalten von 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung im Vergleich zum Referenzbeton, Versuch BS 119..... | 124 |
| Abbildung 4.44: Schwindmaße von Beton nach 365 Tagen als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons, Versuch BS 119..... | 124 |
| Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Untersuchungsrahmens der ökobilanziellen Betrachtung zur Aufbereitung von Betonbrechsand..... | 128 |

| | | |
|----------------|---|-----|
| Abbildung 5.2: | Kumulierter Energieverbrauch und entstehendes Versauerungspotential für die Herstellung von einer Tonne Natursand (rot) und von einer Tonne nass aufbereitetem Betonbrechsand (blau)..... | 133 |
| Abbildung 5.3: | Entstehung von kumuliertem Energieverbrauch und Versauerungspotential bei der Herstellung von einer Tonne nass aufbereitetem Betonbrechsand..... | 134 |
| Abbildung 5.4: | Entstehung von kumuliertem Energieverbrauch und Versauerungspotential bei der Herstellung von 1 m ³ RC-Beton..... | 137 |
| Abbildung 6.1: | Mittelwerte von Wasseraufnahmen als Funktion des Zementstein-gehaltes, Serien BS, REM und VS im Vergleich zu den Ergeb-nissen anderer Untersuchungen [224, 225] | 144 |
| Abbildung 6.2: | Kornrohdichten als Funktion des Zementstein-gehaltes, Serien BS, REM und VS im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Unter-suchungen | 145 |
| Abbildung 6.3: | Druckfestigkeiten (links) und E-Moduli (rechts) von Mörteln aus Aus-gangsmaterial, Schwergut und Leichtgut als Funktion des Alt-zementsteinanteils der Gesamtfeststoffzugabe, Mittelwerte aller Mörtelversuche der Serien BS, REM und VS..... | 149 |
| Abbildung 6.4: | Relative Druckfestigkeiten und E-Moduli von Beton aus Ausgangs-material und Schwergut als Funktion des Anteils der RC-Körnung im Vergleich zum Referenzbeton, Serie BS, Versuch 119..... | 150 |
| Abbildung 6.5: | Relative Druckfestigkeiten und E-Moduli von Beton aus Aus-gangsmaterial und Schwergut als Funktion des Altzement-steingehaltes des Betons im Vergleich zum Referenzbeton, Serie BS, Versuch 119..... | 151 |
| Abbildung 6.6: | Druckfestigkeiten als Funktion des Altzementsteingehaltes des RC-Betons, Auswertung der Messwerte aller Betonversuchsreihen | 152 |
| Abbildung 6.7: | Dynamische E-Moduli als Funktion des Altzementsteingehaltes des RC-Betons im Vergleich zu den Referenzbetonen, Auswertung der Messwerte aller Betonversuchsreihen | 153 |
| Abbildung 6.8: | Messwerte der dynamischen E-Moduli im Vergleich zu den nach Gleichung 6.4 berechneten Werten..... | 155 |

TABELLENVERZEICHNIS

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 2.1: | Betriebsparameter von Setzmaschinen | 38 |
| Tabelle 2.2: | Wirkungskategorien und Leitgrößen für eine ökologische Bewertung | 45 |
| Tabelle 3.1: | Ergebnisse der Schadstoffanalysen der Ausgangsmaterialien | 48 |
| Tabelle 3.2: | Daten zu der Herstellung und zu den Eigenschaften der untersuchten Ausgangsmaterialien | 49 |
| Tabelle 3.3: | Variationsmöglichkeiten der Setzmaschineneinstellungen | 57 |
| Tabelle 3.4: | Analysenverfahren zur Bestimmung von Schadstoffen | 64 |
| Tabelle 4.1: | Zusammenfassung der Ergebnisse der Massenbilanzen (< 4 mm) der Materialarten der Versuchsserien BS, VS, REM und SAL | 69 |
| Tabelle 4.2: | Vergleich der gemessenen und berechneten Natursteingehalte c_A des Ausgangsmaterials der Versuchsserien BS und REM | 70 |
| Tabelle 4.3: | Zementstein in Leichtgut und Schwergut und Veränderung gegenüber dem Ausgangsmaterial in Abhängigkeit vom Masseausbringen des Leichtgutes, Serie BS | 71 |
| Tabelle 4.4: | Mittlerer Korndurchmesser d_m der untersuchten Materialien vor und nach dem Aufbereitungsprozess | 80 |
| Tabelle 4.5: | Mittelwerte der Körnungsziffern k und prozentuale Veränderung des k -Wertes im Aufbereitungsprozess | 81 |
| Tabelle 4.6: | Abweichung der Sieblinien der Materialarten Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut von der Regelsieblinie B 4 (ΔRB_4) | 82 |
| Tabelle 4.7: | Zementsteingehalte (SLB) von Ausgangsmaterial und Austrags- gütern der Versuchsserien BS, REM und VS | 83 |
| Tabelle 4.8: | Wasseraufnahmen von Ausgangsgut, Schwergut und Leichtgut der Versuchsserien BS, REM und VS | 87 |
| Tabelle 4.9: | Mittelwerte von Rohdichten und Reindichten von Ausgangsgut, Schwergut und Leichtgut der Serien BS, REM und VS | 89 |
| Tabelle 4.10: | Gesamtporosität von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut, Serien BS, VS und REM | 91 |
| Tabelle 4.11: | Auflistung der mineralogischen Phasen die in den Versuchsmaterialien BS und SAL röntgenographisch festgestellt wurden | 95 |
| Tabelle 4.12: | Veränderungen der Materialeigenschaften der Austragsgüter im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien | 97 |
| Tabelle 4.13: | In den Versuchsmaterialien mittels Röntgenmikroanalyse (EDX) nachgewiesene Minerale | 100 |

| | | |
|---------------|---|-----|
| Tabelle 4.14: | Ausbreitmaße von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS..... | 108 |
| Tabelle 4.15: | Luftgehalte von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS..... | 109 |
| Tabelle 4.16: | Druckfestigkeiten nach 28 Tagen von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS..... | 110 |
| Tabelle 4.17: | Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS..... | 112 |
| Tabelle 4.18: | E-Moduli nach 28 Tagen von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS..... | 115 |
| Tabelle 5.1: | Stoffströme des Nassaufbereitungsprozesses..... | 130 |
| Tabelle 5.2: | Umrechnung der Wirkung verschiedener Emissionen auf den Leitindikator der Wirkungskategorie Treibhauswirkung: CO ₂ | 131 |
| Tabelle 5.3: | Umrechnung der Wirkung verschiedener Emissionen auf den Leitindikator der Wirkungskategorie Versauerung: SO ₂ | 131 |
| Tabelle 5.4: | Umrechnung der Wirkung verschiedener Emissionen auf den Leitindikator der Wirkungskategorie Ozonvorläuferpotential: NMVOC..... | 131 |
| Tabelle 5.5: | Umweltwirkungen der Herstellung von einer Tonne RC-Brechsand durch das untersuchte Nassaufbereitungsverfahren..... | 132 |
| Tabelle 5.6: | Vergleich der Umweltwirkungen der Herstellung von einem m ³ Beton mit einem Anteil von 20 % Schwergut an der Gesteinskörnung und einem m ³ Referenzbeton..... | 136 |

1. Einleitung und Zielsetzung

1.1 Bedeutung des Baustoffrecyclings

Das Wiederverwerten oder Wiederverwenden von Reststoffen und Abfällen wird seit Jahrhunderten weltweit praktiziert. Dabei standen vor allem wirtschaftliche Gründe im Vordergrund. Seit etwa Mitte der 70er Jahre des 20. Jahrhunderts spielt auch der Umweltschutzgedanke eine zunehmend wichtige Rolle. Vor allem in den entwickelten Industrieländern begann man nach wirtschaftlichen Möglichkeiten zur Reduzierung von Abfallströmen und zur Ressourcenschonung durch Recycling zu suchen.

In Deutschland wurde im Jahr 1994 mit dem Inkrafttreten des „Gesetzes zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen (KrW-/AbfG)“ [1] der Recyclinggedanke auch gesetzlich verankert. In § 4 dieses Gesetzes wird festgeschrieben, dass Abfälle in erster Linie zu vermeiden sind. In zweiter Linie sind sie stofflich oder energetisch zu verwerten. Die Verwertung eines Reststoffes ist nach Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz der Beseitigung vorzuziehen und beinhaltet nach § 4, Absatz 3 explizit die Substitution von natürlichen Rohstoffen durch die durch Recycling gewonnenen Sekundärrohstoffe.

Die Bauindustrie hat in Deutschland eine Schlüsselposition in der Gesamtwirtschaft. So wurden beispielsweise im Jahr 2006, trotz eines mehrjährigen Rückgangs des Bauvolumens, noch immer rund 4 % des Bruttoinlandsproduktes [2] im Baugewerbe erwirtschaftet. Entsprechend haben Abfälle aus der Bauindustrie neben den Bergbaurestmassen den größten Anteil am Gesamtabfallaufkommen in Deutschland. Daher wird in diesem Bereich schon seit Jahrzehnten an Lösungen für die Wiederverwertung bzw. die Wiederverwendung der anfallenden Reststoffe gearbeitet.

Die mengenmäßig wichtigsten Ressourcen für Recyclingbaustoffe sind Bauschutt und Straßenaufbruch. Nach ihrer Aufbereitung werden die Recyclingbaustoffe überwiegend im Straßen-, Wege- und Erdbau, z.B. als Straßenunterbau, verarbeitet. Dadurch werden bereits erhebliche Bauschuttmengen verwertet. Laut dem „4. Monitoring-Bericht Bauabfälle“ [3] des Kreislaufwirtschaftsträgers Bau (KWTB) wurden 2002 etwa 70 % des Bauschutts recycelt.

Die meisten Verwertungswege, wie z.B. der Einsatz als Füllmaterial, können jedoch als Downcycling verstanden werden, da das im Recycling-Material (RC-Material) enthaltene Wertstoffpotential nicht ausgeschöpft wird. Besonders deutlich wird dies am Beispiel des Betonrecycling: Ein echtes Recycling von gebrochenem Beton als Gesteinskörnung für die Betonproduktion findet kaum statt. Im Jahr 2002 wurden z.B. in Deutschland weniger als 2 % des Bauschutts als Gesteinskörnung in der Betonherstellung recycelt [3]. Ursache hierfür sind die im Vergleich zu Natursteinkörnungen ungünstigeren Materialeigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnungen wie bei-

spielsweise die höhere Porosität und eine dadurch bedingte erhöhte Wasseraufnahme [4-6] oder die ungleichmäßigere Zusammensetzung der Körnungen [7, 8]. Zudem wird der aufzubereitende Altbeton aus unterschiedlichen Quellen und mit unterschiedlichen Techniken generiert. Entsprechend können rezyklierte Gesteinskörnungen inhomogen sein [9, 10] und ihre Sortenreinheit ist nicht immer gewährleistet [6]. Diese Unsicherheiten bei der Herstellung haben zu einer restriktiven Regelung für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen geführt [11-13].

Es ist jedoch zu erwarten, dass die Wiederverwertung von Betonabbruchmassen zukünftig an Bedeutung gewinnen wird. In Deutschland stieg die Betonproduktion seit Ende des 2. Weltkriegs stark an und betrug seit den 50er Jahren in der Regel über 100 Millionen Tonnen Beton pro Jahr. Bei einer durchschnittlichen Gebäudelebensdauer von 30-100 Jahren, bei Nichtwohngebäuden vielfach nur 40-50 Jahren [14], ist demzufolge mit einem verstärkten Anfall von Betonabbruchmassen in den kommenden Jahren zu rechnen (vgl. Abbildung 1.1).

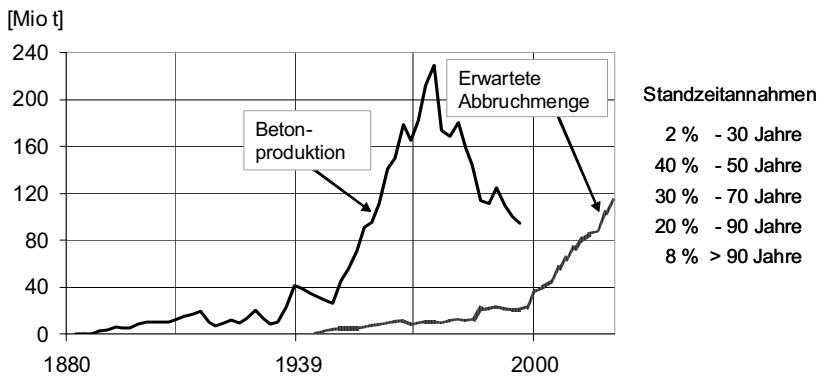


Abbildung 1.1: Betonproduktion und Schätzung der daraus resultierenden Betonabbruchmengen in Deutschland [14]

Gleichzeitig hat es in den vergangenen Jahren in Mitteleuropa einen deutlichen Anstieg an Flächen- und Landschaftsverbrauch gegeben, der allein in Deutschland derzeit ca. 130 ha pro Tag beträgt [15]. Daher werden der Verbrauch von Deponieraum sowie die Nutzung natürlicher Sand- und Kiesressourcen für die Gewinnung von Gesteinskörnungen für die Betonherstellung zunehmend kritischer betrachtet. In Zusammenhang mit der Nachhaltigkeitsdebatte ist es ein erklärtes Ziel der politisch Verantwortlichen, den täglichen Flächenverbrauch bis 2025 auf 30 ha pro Tag [16] zu reduzieren. Vor diesem Hintergrund wird das Recycling von Betonabbruch unabhängig von den gegenwärtigen konjunkturellen Schwierigkeiten in der Baubranche ein wichtiges Thema bleiben. Besondere Bedeutung kommt aufgrund des hohen Anfallvolumens von bis zu 50 % des Abbruchmaterials [17, 18] der Wiederverwertung von Betonbrechsand zu.

Bisher hat der Wiedereinsatz von Betonbrechsand als Gesteinskörnung für Beton, also gemäß seiner ursprünglichen Verwendung, nur eine geringe Bedeutung. Hier sind auch von rechtlicher Seite enge Grenzen gesetzt [12, 19]: Zur Zeit ist der Einsatz von Betonbrechsand < 2 mm in Beton nur über bauaufsichtliche Zustimmung im Einzelfall möglich. Ursache hierfür sind die im Vergleich zu größeren Körnungen ungünstigeren Eigenschaften von Brechsand. Eine wichtige Einflussgröße ist hierbei der im Vergleich zu größeren Fraktionen höhere Gehalt an Zementstein in der Sandfraktion [20-22], der beispielsweise eine geringere Rohdichte und erhöhte Wasseraufnahme induziert.

1.2 Zielsetzung und Gliederung

Die Untersuchungen zum Altbetonrecycling, die in der Literatur beschrieben werden, befassen sich überwiegend mit trocken arbeitenden Aufbereitungsverfahren und mit den Eigenschaften von trocken aufbereiteten rezyklierten Gesteinskörnungen der Korngrößenbereiche oberhalb des Sandbereiches [6, 23-26]. Nassverfahren zur Aufbereitung von Bauschutt werden in der Praxis selten angewandt und sind auch seltener Gegenstand von Untersuchungen. Dabei wurden bisher meist die Eigenschaften von Splitten betrachtet [27-29]. Die Fragestellung, ob durch ein geeignetes Aufbereitungsverfahren die Wiederverwendung von Betonbrechsanden für die Betonherstellung ermöglicht werden kann, wurde bisher wenig beachtet.

Ziel dieser Arbeit ist die Untersuchung eines Nassaufbereitungsverfahrens zur Verbesserung der Eigenschaften von Betonbrechsanden in Hinblick auf eine Verwendung als Gesteinskörnung in Beton. Die Versuche zur Nassaufbereitung unterschiedlicher Betonbrechsande sind dabei wesentlicher Bestandteil. Mit den Verfahrensschritten Aufschluss, Klassierung und Dichtentrennung mittels Setztechnik erfolgte eine Trennung der Ausgangsmaterialien in ein möglichst natursteinreiches Produkt, das Schwergut, sowie in die Reststoffe Leichtgut und Feinstgut. Die Materialeigenschaften von Ausgangsmaterial und Austragskörnungen wurden vergleichend untersucht. Anhand experimenteller Untersuchungen wurde die Wiederverwertbarkeit der Körnungen als Gesteinskörnung in der Mörtel- und Betonherstellung bewertet. Auf Basis der Adaption des Aufbereitungskonzeptes in das Modell einer großtechnischen Aufbereitungsanlage wurde die Umsetzbarkeit des Verfahrens in Hinblick auf Umweltverträglichkeit und Wirtschaftlichkeit betrachtet.

Am Beginn der Arbeit stehen in Kapitel 2 Ausführungen zum Stand des Bauschuttrecycling. Geltende Normen und Regelwerke werden dargestellt. Auf Basis einer Literaturlauswertung werden die Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen im Vergleich zu den Eigenschaften natürlicher Gesteinskörnungen beschrieben. Anschließend erfolgt eine Übersicht über die im Rahmen des Bauschuttrecycling eingesetzten Aufbereitungstechniken und eine Erläuterung des in dieser Arbeit untersuchten Verfahrens der Setzsartierung. Die Versuchsanlage und die Methoden der eingesetzten Analysen und Bewertungsverfahren werden in Kapitel 3 beschrieben. Die Auswertung

der Messdaten und die Ergebnisdarstellung schließen sich in Kapitel 4 an. In Kapitel 5 werden ökobilanzielle und ökonomische Bewertung des Verfahrens erläutert. Darauf aufbauend erfolgt in Kapitel 6 die Diskussion über die Ergebnisse und die Möglichkeiten und Grenzen des untersuchten Aufbereitungsverfahrens. Insbesondere werden dabei die folgenden Fragestellungen beleuchtet:

- Welche Auswirkungen hat das gewählte Aufbereitungsverfahren auf die gewonnene Gesteinskörnung und wie kann die Aufbereitung optimiert werden, um möglichst gute Ergebnisse bei der Baustoffherstellung zu erzielen?
- Wie verändern sich die Materialeigenschaften der aufbereiteten Materialien im Vergleich zum Ausgangsmaterial und welche Baustoffqualitäten können erreicht werden?
- Wie ist die Nassaufbereitung von Betonbrechsand mittels Setzmaschinenteknik ökologisch und in Hinblick auf eine großtechnische Umsetzung ökonomisch zu bewerten?

Eine Zusammenfassung und ein Ausblick bilden den Abschluss der Arbeit.

2. Grundlagen

2.1 Stand des Bauschuttrecyclings

2.1.1 Situation in Deutschland und Europa

Bau- und Abbruchabfälle gehören weltweit zu den größten Abfallströmen [5, 30-33]. Etwa 50 % des gesamten Abfallanfalls in Europa haben ihren Ursprung in Bauaktivitäten, pro Einwohner Europas fallen jährlich etwa 500 kg Bauschutt an [34, 35]. Eine Übersicht über Recyclingquoten in Europa ist in Abbildung 2.1 dargestellt [3, 31, 34, 36-38].

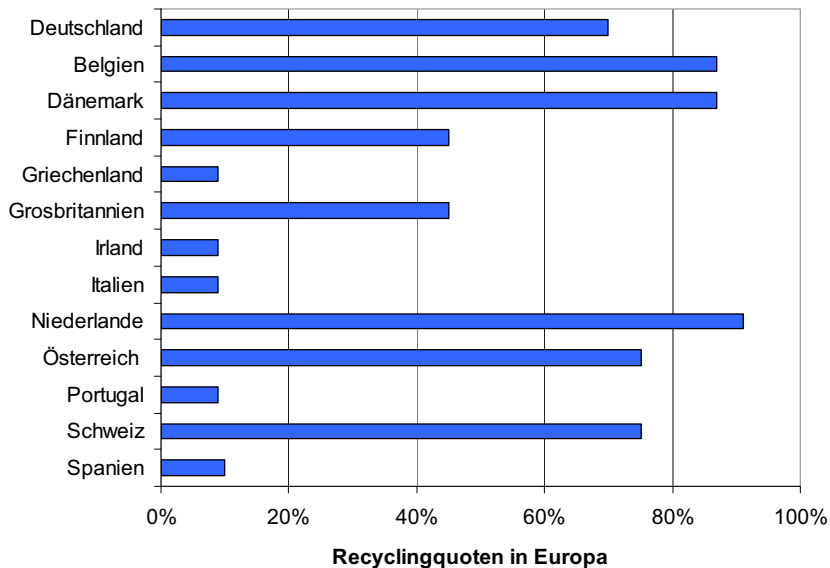


Abbildung 2.1: Recyclingquoten in Europa, Daten aus Veröffentlichungen der Jahre 1999 bis 2005

In Deutschland liegt der einwohnerbezogene Bauschuttanfall mit ca. 650 kg im Jahr 2002 [3] trotz eines mehrjährigen Rückgangs der Baukonjunktur noch immer sehr hoch. Von diesen Bauschuttanfallmengen werden in Deutschland seit mehreren Jahren etwa 70 % wieder verwendet, allerdings meist auf niedrigerem Wertniveau [39-41].

Für die Recyclingquoten der europäischen Nachbarländer werden in den meisten Veröffentlichungen Zahlen eines 1999 von der Europäischen Kommission veröffentlichten Berichtes angegeben [31, 35, 38, 40]. Obwohl vielfach zitiert, ist davon auszugehen, dass die angegebenen Zahlen aufgrund schwer vergleichbarer Quellen und Erfassungszeiträume nur unter Vorbehalt zu vergleichen sind [40]. Beispielsweise wird für Deutschland in diesem Bericht nur eine Recyclingquote von 17 % genannt. In diesem Zusammenhang sind auch die Qualität der für ein Recycling notwendigen Aufberei-

tungsprozesse und die Art der Wiederverwertung nicht aus den vorliegenden Zahlen ersichtlich.

Ausgehend von den zahlreichen Veröffentlichungen zum Thema Bauschutt kann jedoch allgemein festgestellt werden, dass das Recycling von Bauschutt in Europa in Abhängigkeit von den nationalen Randbedingungen sehr unterschiedlich ausgeprägt ist. Während Spanien noch im Jahr 2003 eine Recyclingquote von nur etwa 10 % [31] aufzuweisen hatte, haben Belgien und die Niederlande infolge ihrer begrenzten Kies- und Natursteinvorkommen schon frühzeitig das Recycling von Gesteinskörnungen verfolgt. Mittlerweile haben die Niederlande einen Recyclinganteil von mehr als 90 % verwirklicht [36, 37], in Belgien wurden 1990 bereits 87 % des Bauschutts recycelt. Durch die traditionelle Ziegelbauweise beider Länder, die ihren Ursprung sowohl in der oben genannten Beschränkung an natürlichen Gesteinskörnungen [42] als auch aufgrund der klimatischen Bedingungen hat, kam es zu einem hohen Anteil an rezyklierten Ziegelsplitten [37].

In alpinen Regionen sind die Kies- und Sandreserven ebenfalls aufgrund der geologisch bedingten Rohstoffsituation begrenzt [43, 44]. Schon heute wird ein Teil der Gesteinskörnungen als gebrochene Splitte und Brechsande vergleichsweise aufwändig durch Absprengungen aus alpinen Steinbrüchen gewonnen. Österreich und die Schweiz haben daher schon frühzeitig nach Gewinnungs- und Einsatzmöglichkeiten für Sekundärrohstoffe im Baubereich gesucht [36]. Ihre Recyclingquoten werden mit 70 % - 80 % angegeben [36, 40, 45]. In beiden Ländern wird die Bauschuttzubereitung zur Gewinnung von Gesteinskörnungen für Beton schon seit Jahren großtechnisch und auch unter Nutzung von Nassaufbereitungsverfahren umgesetzt [28, 46]. In Österreich wird gebrochener Bauschutt in Körnungen > 4 mm bereits seit einigen Jahren großtechnisch auch unter Verwendung der Setztechnik aufbereitet [47, 48].

2.1.2 Regelwerke und Normen für rezyklierte Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen für die Beton- und Mörtelproduktion müssen bestimmte Qualitätsanforderungen erfüllen. Trotz der Bemühungen um die Vereinheitlichung der Anforderungen an Baustoffe in Europa, gelten neben den europäischen Normen zum Teil auch noch nationale Regelwerke für den Einsatz von Recyclingbaustoffen [49]. Da sich diese Arbeit bzw. die Bewertung der Ergebnisse der Aufbereitungsversuche nach den deutschen Standards richtet, wird im Folgenden der Schwerpunkt auf die deutschen Normen gelegt.

Die Bestimmungen Österreichs, als EU-Mitglied, und der Schweiz, als Nichtmitgliedsland, werden zum Vergleich mit den deutschen Regelwerken herangezogen. Wie bereits erwähnt, verfügen beide Länder durch ihre Lage im alpinen Raum nur über begrenzte Kies- und Sandreserven. Gleichzeitig sind gerade in diesen Gebieten auch

Deponieflächen für die Ablagerung von Abfällen begrenzt. Das Interesse an der Wiederverwertung von Altbeton ist daher in beiden Ländern vergleichsweise groß.

Deutschland

Die DIN EN 206-1 [50] beinhaltet die Vorgaben für Eigenschaften, Herstellung und Konformität von Beton und ersetzt die bis 2004 geltende DIN 1045-1. Die DIN EN 206-1 bezieht neben natürlichen und künstlichen Gesteinskörnungen auch rezyklierte Gesteinskörnungen ein, sofern sie eine Kornrohddichte $> 2,0 \text{ g/cm}^3$ aufweisen.

Mit der DIN EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“ [51], einschließlich der Berichtigung 1 [52] werden die Anforderungen an Gesteinskörnungen im Sinne einer europäischen Vereinheitlichung festgeschrieben. Die Anwendung von Gesteinskörnungen in Bauwerken wird in absehbarer Zeit mit der DIN 2000-103 „Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken – Teil 103: Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2003-04“ geregelt werden. Zur Zeit liegt die entsprechende Vornorm vor [53]. Der Normentwurf DIN EN 12620 A1 [54] beinhaltet sowohl die Klassifizierung von rezyklierten Gesteinskörnungen als auch die physikalischen und chemischen Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen.

Die abweichenden, meist ungünstigeren Materialeigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen werden in der DIN 4226-100 für rezyklierte Gesteinskörnungen [13] berücksichtigt. Nach dieser Norm wird aufbereiteter Bauschutt in Abhängigkeit von seiner stofflichen Zusammensetzung in verschiedene Klassen eingeteilt. Bezugnehmend auf dieses Regelwerk ist in dieser Arbeit – wenn nicht ausdrücklich anders erwähnt – mit rezyklierter Gesteinskörnung eine Gesteinskörnung Typ 1 nach DIN 4226-100, Betonsplitt oder Betonbrechsand, gemeint.

Von besonderer Bedeutung ist die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Beton mit rezykliertem Zuschlag“, bzw. „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100“ [11, 12, 19]. Sie unterscheidet zwischen

- Konstruktionsbeton mit angepasster Zusammensetzung und
- Konstruktionsbeton mit angepasster Bemessung [55].

Bei Beton mit angepasster Zusammensetzung ist der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am Gesamtvolumen der Gesteinskörnung begrenzt. Die Verwendung von Betonbrechsand $< 2 \text{ mm}$ in Beton ist ausgeschlossen, da Nachweise für die Gewährleistung der Standsicherheit nach dem Bauordnungsrecht bisher noch nicht vorliegen. Die bekannten ungünstigeren Materialeigenschaften feiner rezyklierter Körnungen lassen jedoch negative Auswirkungen auf die Standsicherheit vermuten. Weitere Vorgaben sind:

- die maximale Betonfestigkeit C30/37 für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung
- die Unzulässigkeit von rezyklierten Gesteinskörnungen in Bauteilen aus Spann- oder Leichtbeton
- die Führung des Nachweises der Alkaliempfindlichkeit und der Frostwiderstandsfähigkeit F_4 (XF1) bzw. F_2 (XF3)
- eine erweiterte Produktionskontrolle sowie
- eine erweiterte Erstprüfung für Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung u. a.

Die Bemessung von Konstruktionsbeton mit angepasster Zusammensetzung erfolgt entsprechend der Bemessung für Normalbeton.

Auch bei Konstruktionsbeton mit angepasster Bemessung ist der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung < 2 mm nicht möglich. Mit rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm kann die natürliche Gesteinskörnung - bei entsprechend angepassten Bemessungsansätzen nach DIN - jedoch vollständig ersetzt werden [55].

Für die Bewertung der Umweltverträglichkeit von Bauschutt wurde die Mitteilung 20, „Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln“ der Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) erarbeitet [56]. In Abhängigkeit der Schadstoffbelastung kann nach den Vorgaben der sogenannten „LAGA-Liste“ eine Einstufung von Bauschutt in Einbauklassen von Z.0 (uneingeschränkter Einbau möglich) bis $> Z 2$ (kein Einbau zugelassen) erfolgen. Obwohl diese Technischen Regeln in den meisten Bundesländern eingeführt wurden, gelten sie nicht bundesweit. Im Einzelfall wird die LAGA-Liste jedoch auch in Ländern, die landesspezifische Regelungen haben, von den Vollzugsbehörden als „Stand der Technik“ herangezogen [57].

Der Entwurf einer bundesweit einheitlichen Regelung des Wiedereinsatzes von mineralischen Reststoffen im Baubereich ist in Vorbereitung. Ein erster Arbeitsentwurf der Ersatzbaustoffverordnung wurde im November 2007 vom Bundesumweltministerium vorgelegt [58]. Die vorgesehenen Anforderungen beziehen sich neben rezyklierten Gesteinskörnungen auch auf andere industrielle Abfälle und Nebenprodukte als Ersatzbaustoffe wie beispielsweise Gießereirestsande oder Hochofenschlacken. Der Entwurf stützt sich dabei nicht nur auf das Abfall-, sondern auch auf das Bodenschutzrecht. Für jeden Ersatzbaustoff soll der Einbau in definierte Bodenklassen unter Berücksichtigung von Schadstoffgrenzwerten und Einbauweisen geregelt werden.

Österreich

Auch in Österreich gelten nationale und europäische Regelwerke. Für die Umsetzung der OENORM EN 206-1, die analog der DIN EN 206-1 die Vorgaben für Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität von Beton beinhaltet, wurde im Jahr 2007 die OENORM B 4710-1 erlassen. Die europäische Norm OENORM EN 12620

„Gesteinskörnungen für Beton“ entspricht der deutschen DIN EN 12620 und beinhaltet entsprechend die Anforderungen an Gesteinskörnungen. Die OENORM B 3131 „Gesteinskörnungen für Beton – Regeln zur Umsetzung der OENORM EN 12620“ wurde für eine Übergangszeit erlassen. Mit dieser nationalen Norm erfolgt die Anpassung an die vormalig in Österreich geltenden Regelungen.

Die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen wurden vom Österreichischen Baustoffrecycling Verband (brv) mit der Herausgabe der „Richtlinie für Recycling-Baustoffe“ im Jahr 2004 erstmals veröffentlicht. Weiterhin existieren noch Vorgaben auf Länderebene wie beispielsweise die vom Land Oberösterreich herausgegebene Schrift „Baurestmassenrecycling – Leitfaden über den richtigen Umgang mit Baurestmassen“, die im Jahr 2006 veröffentlicht wurde.

Schweiz

In der Schweiz wird Beton nach der Schweizer Norm SN EN 206-1 erst dann als Recyclingbeton bezeichnet, wenn mindestens 25 Masseprozent der Gesteinskörnung aus rezyklierter Gesteinskörnung bestehen [59]. Rezyklierte Gesteinskörnungen wiederum werden nach der rechtlich bindenden „Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle“ [60] des Bundesamtes für Umwelt (BAFU), vormalig als „BUWAL-Richtlinie“ veröffentlicht, in Betongranulat und Mischgranulat unterschieden. Es wird entsprechend zwischen klassifiziertem Recyclingbeton aus Betongranulat und nicht klassifiziertem Recyclingbeton aus Mischgranulat unterschieden.

Für Recyclingbeton wurde bereits 1994 eine eigene Norm, die SIA 162/4, erlassen. Auch hier wird klar zwischen klassifiziertem und nicht klassifiziertem Recyclingbeton unterschieden. So empfiehlt die SIA 162/4 beispielsweise Recyclingmaterial mit einem Anteil an Mischabbruch größer als 3 M.-% nur als Gesteinskörnung für nicht klassifizierten Beton einzusetzen [61]. Die Empfehlungen dieser Norm werden zurzeit durch einen Sachstandsbericht aktualisiert, dessen erster Teil im Sommer 2007 veröffentlicht wurde. Nach Fertigstellung des zweiten Teils in der 2. Jahreshälfte 2009, wird auf Grundlage dieser Berichte eine neue SIA-Richtlinie in Kraft treten [62].

Die Aufbereitung von rezyklierten Gesteinskörnungen wird mit den Normen SN 670 143 „Recycling - Betonabbruch“ und SN 670'143 „Recycling - Mischabbruch“ reguliert. Die stoffliche Zusammensetzung von rezyklierten Gesteinskörnungen wird in der SN 670 951 „Recyclingbaustoffe: Stoffliche Zusammensetzung“ behandelt. Spezielle Vorgaben für die Behandlung von Betonbrechsanden gibt es in der Schweiz nicht [62].

2.2 Gesteinskörnungen in der Baustoffherstellung

Der Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Materialeigenschaften von Mörteln und Betonen ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen und Veröffentlichungen

gen, z. B. [23, 26, 63, 64]. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass natürliche Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen nicht ohne weiteres und nicht ohne besondere Bemessung vollständig ersetzt werden können.

Gesteinskörnungen aus Bauschutt können aufgrund ihrer inhomogenen Zusammensetzung deutlich unterschiedliche Materialeigenschaften aufweisen. In der überwiegenden Mehrheit der Untersuchungen wurde festgestellt, dass sich die Baustoffeigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen mit zunehmendem Ziegelanteil verschlechtern. Neben einer beobachteten Abnahme der Festigkeitswerte von RC-Betonen oder RC-Mörteln hat die Zunahme des Ziegelanteils in der Gesteinskörnung vor allem eine Abnahme des Elastizitätsmoduls zur Folge [65-67]. Für den Einsatz als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonherstellung werden daher Gesteinskörnungen mit einem hohen Anteil an Körnungen aus Altbeton bevorzugt.

Als wesentliche Voraussetzung für eine gute Qualität von rezyklierten Gesteinskörnungen wird neben der Aufbereitung vor allem ihre sortenreine Gewinnung angesehen [17, 68, 69]. Jedoch weisen auch rezyklierte Körnungen aus Beton, die aus einem selektiven Rückbau stammen, im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen in der Regel ungünstigere Eigenschaften auf. Eine wesentliche Ursache für die Verschlechterung der Materialeigenschaften ist, dass Gesteinskörnungen aus Altbeton neben natürlichen Gesteinskörnern auch unterschiedlich große Anteile an Altzementstein enthalten.

Die Eigenschaften dieser Altzementsteinmatrix, insbesondere die vergleichsweise höhere Porosität, können negative Auswirkungen auf die Qualität des daraus hergestellten Recyclingbetons haben [5, 6]. Dies wird vor allem beim Einsatz der in der Regel besonders zementsteinreichen feinen Körnungen in der Mörtel- und Betonherstellung deutlich [70, 71].

Da die spezifische Oberfläche von Gesteinskörnungen mit abnehmendem Korndurchmesser exponentiell ansteigt, haben Sande eine größere Oberfläche als Kiese oder Splitte. Im Betongefüge werden feinere Natursteinkörner daher bezogen auf ihre Masse von einer anteilmäßig größeren Zementsteinmasse umhüllt als gröbere Körner. Entsprechend kommt es bei rezyklierten Gesteinskörnungen zu vergleichsweise höheren Zementsteinanteilen in den feinen Fraktionen, die wiederum die Qualität von daraus hergestellten Baustoffen ungünstig beeinflussen können [5, 18, 72].

2.2.1 Eigenschaften von Gesteinskörnungen

Kornoberfläche und Kornform

Die Kornoberfläche von Gesteinskörnungen für die Betonproduktion sollte möglichst glatt sein, da sich glatte Körner im frischen Beton besser verarbeiten lassen [73]. Eine gewisse Rauigkeit kann zwar die Haftung des Zementleims am Korn begünstigen [74], jedoch sind große Poren, in denen der Zementleim verschwindet ohne sich an der Ver-

kittung zu beteiligen, aufgrund des erhöhten Zementbedarfs nachteilig [75]. Spalten und Klüfte im Korn können wegen auftretender Kerbspannungen zu verminderten Druckfestigkeiten des Baustoffs führen. Die Zugfestigkeit eines Betons aus gebrochenen Natursteinkörnungen ist aufgrund einer besseren Haftung zwischen Zementleim und Gesteinskorn jedoch oftmals höher als die vergleichbarer Kiessandbetone [73].

Eine gedrungene Kornform ist für die Verarbeitbarkeit vorteilhaft. Im Gefüge von erhärteten Betonen oder Mörteln begünstigt sie eine gleichmäßige Verteilung von einwirkenden Lasten auf das Korn und ist damit günstig für das Erreichen von höheren Druckfestigkeiten. Ist das Verhältnis von Länge zu Breite größer als 3 zu 1, so wird die Kornform als ungünstig bezeichnet [76]. Kanten oder „Kornauskragungen“ von ungleichmäßig geformten Körnern können bei Druckbelastung vorzeitig versagen.

Die Kornform ist auch ein Qualitätsmerkmal für gebrochene Körnungen, deren Produktion in den vergangenen Jahren aufgrund sich verknappender Kiesvorräte angestiegen ist. Während 1990 nur 10 % des gesamten Betonzuschlags aus gebrochenen Körnungen bestand, lag 2002 ihr Anteil an der gesamten Kies- und Sandproduktion bereits bei 30 % [73] [77]. Für die Herstellung von Brechsanden und Splitten werden natürliche Felsgesteine in Brechern zerkleinert. Durch den Einsatz von Prallbrechern können die bevorzugten gedrungenen Körnungen hergestellt werden, die dann als Edelsplitt oder Edelbrechsande bezeichnet werden. Ihr Anteil an der Gesamtproduktion von Kiesen und Sanden betrug 2002 ca. 9 % [77].

Rezyklierte Gesteinskörnungen, die durch das Brechen von Altbeton hergestellt werden, weisen in der Regel einen höheren Anteil an kantigen, teilweise platten Körnern mit unebenen Oberflächen auf als ungebrochene natürliche Gesteinskörnungen [26, 78, 79]. Die Bruchkanten dieser Körnungen verlaufen meist durch Bindemittelanhaftungen am Gesteinskorn und beeinflussen so die Form des rezyklierten Kornes. Gleichzeitig bewirkt der Brechvorgang während der trockenen Aufbereitung auch Brüche im Natursteinkorn [80, 81].

Der hohe Anteil an kantigen Körnern in gebrochenen Gesteinskörnungen führt zu einem höheren Hohlraumgehalt in der Schüttung als dies bei ungebrochenen Kiesen und Sanden – bei gleicher Sieblinie – der Fall ist. Entsprechend wird ein erhöhter Anteil an Zement- bzw. Bindemittelleim benötigt, um den Frischbeton gut verarbeiten zu können [74, 82]. Durch die Porosität der an rezyklierten Gesteinskörnungen anhaftenden Zementsteinreste wird zusätzlicher Porenraum in den Baustoff eingebracht, der neben einer erhöhten Wasseraufnahme [4, 22, 83] wiederum zu einem zusätzlichen Bedarf an Zementleim zur Erreichung der gewünschten Festigkeit führen kann [75].

Korngrößenverteilung

Die Anforderungen an die Sieblinie einer Gesteinskörnung in der Baustoffherstellung richten sich nach den Anforderungen an den herzustellenden Beton oder Mörtel. Die für die Festigkeit optimale Kornverteilung liegt im Bereich der Regelsieblinien AB der DIN 1045, die sich wiederum aus der Fullerparabel ableiten. Kriterium ist eine möglichst dichte Packung zur Erreichung von möglichst hohen Festigkeiten [74]. Bei nicht optimalen Korngrößenverteilungen können Festigkeitsverluste, z.B. durch eine Erhöhung des Zementanteils, ausgeglichen werden. Anhand der Korngrößenverteilung wird auch die Körnungsziffer k ermittelt, die als Richtwert für die Bestimmung der benetzbaren Oberfläche einer Gesteinskörnung und damit auch für die Berechnung des Wasseranspruchs dieser Körnung dient (siehe Kapitel 3.4.1).

Die Herstellung von Betonen mit besonderen Eigenschaften wie Hochleistungsbetone oder selbstverdichtende Betone erfordert eine besonders hohe Gleichmäßigkeit der Sieblinie [84]. Auch beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen könnte eine engere Orientierung an den Regelsieblinien sinnvoll sein, da sich die Korngrößenverteilung von rezyklierten Gesteinskörnungen während des Mischvorgangs bei der Verarbeitung durch Absplitterungseffekte an einzelnen Körnern oder durch den Abrieb anhaftender Zementsteinmatrix verändern kann [72, 85].

Dichte und mineralogische Zusammensetzung

In der Baustoffherstellung können – auch in Abhängigkeit von der Baustoffart und den regionalen geologischen Verhältnissen – unterschiedliche Gesteinsarten verwendet werden. Während für Leichtbetone Gesteinskörnungen mit einer Kornrohddichte ≤ 2000 kg/m³ – z.B. Bims – eingesetzt werden, erfolgt die Herstellung von Schwerbetonen für beispielsweise den Kernreaktorbau mit schweren Gesteinskörnungen mit einer Kornrohddichte von mindestens 3000 kg/m³. Dafür geeignet ist Baryt mit einer Dichte von 4500 kg/m³. In Normalbetonen werden Gesteinskörnungen unterschiedlicher mineralogischer Zusammensetzung mit Kornrohddichten zwischen 2000 kg/m³ und 3000 kg/m³ eingesetzt. In Deutschland stellen Kiese, Sande und Splitte aus Kalkstein, Granit, Quarzit, Basalt, Diabas, Grauwacke, Gabbro und Sandstein die Hauptmasse der abgebauten und aufbereiteten Gesteinsarten [74, 86, 87].

Gesteinsarten können aus einer Vielzahl von unterschiedlichen Mineralen bzw. Mineralgruppen zusammengesetzt sein. Obwohl die International Mineralogical Association (IMA) mehr als 4000 Minerale erfasst und anerkannt hat [88], sind nur etwa 30 Minerale für die Gesteinsbildung von Bedeutung. Diese bestehen wiederum zu über 90 % aus Silikaten und Quarz, wobei die am häufigsten vorkommenden gesteinsbildenden Mineralgruppen Quarzit und Feldspäte sind [89].

Die Eigenschaften der an der Gesteinsbildung beteiligten Minerale unterscheiden sich zum Teil deutlich voneinander und beeinflussen die Eigenschaften der Gesteinsart.

Feldspäte, Quarz und Glimmer sind die Hauptbestandteile von Granit und unterscheiden sich beispielsweise in ihrer Härte (Ritzhärte nach Mohs) und Spaltbarkeit [90]. Die Härte von Quarz wird mit 7 angegeben, Feldspäte haben eine Mohs'sche Härte von 5 – 6. Glimmer haben eine Ritzhärte von nur 2 – 3.

Als Spaltbarkeit wird bei Mineralen und Kristallen die Tendenz bezeichnet, an bestimmten parallelen Ebenen im Kristallgitter zu brechen. Entsprechend bewirkt die Spaltbarkeit eine besondere Art eines Bruchs. Im Gegensatz zu dem als nichtspaltbares Mineral geltenden Quarz sind Feldspäte gut spaltbar und Glimmer-Mineralen sehr gut spaltbar. Glimmerhaltige Gesteine und Sande, die vor allem in den Zentralalpen vorkommen, können die Festigkeit von Beton deutlich verringern und zählen in Abhängigkeit von Menge und Verteilung zu den für Beton schädlichen Bestandteilen [73].

Der Einfluss der Gesteinsart auf die Beton- oder Mörtel­eigenschaften wird in der Literatur unterschiedlich beschrieben. In der Mehrzahl der Untersuchungen wurde festgestellt, dass herkömmliche Gesteinsarten als Zuschlag die Baustoff­eigenschaften von Normalbeton nicht signifikant beeinflussen. Lediglich der Elastizitäts­modul der untersuchten Betone wurde teilweise von der Wahl der Gesteinskörnung beeinflusst [91]. Hier lagen die Werte von Normalbetonen mit Quarzgesteinskörnungen über den Werten von Betonen mit Granitgesteinskörnungen. Bei Hochleistungsbetonen wurde eine um 10 - 20 % höhere Bruchfestigkeit bei Verwendung von Quarzgesteinskörnungen im Vergleich zu Beton aus Granitgesteinskörnungen beobachtet. Quarzbetone wiesen ebenso deutlich höhere Werte für den Elastizitäts­modul auf [25].

Penttala et al. konnten in ihren Untersuchungen ebenfalls nachweisen, dass Elastizitätseigenschaften am stärksten von dem eingesetzten Gesteinstyp beeinflusst werden [92]. Zusammenhänge sind auch zwischen Gesteinsart und thermischer Dehnung des Betons bekannt. In Abhängigkeit von ihrem Wärmedehnungskoeffizienten sind einige Gesteinsarten nicht für die Herstellung von Betonen für die Temperaturbereiche oberhalb 250° C geeignet [73, 93].

Die Rohdichte von Beton hängt hauptsächlich von der Kornroh­dichte der verwendeten Gesteinskörnung und der Kornroh­dichte des die Körnung verkittenden Zementsteins ab. Die Zementsteinroh­dichte liegt in der Größenordnung zwischen 1400 und 1800 kg/m³, die Rohdichte von Normalbeton im Bereich zwischen 2000 und 2400 kg/m³. Rezyklierte Gesteinskörnungen haben – in Abhängigkeit vom Verhältnis Zementstein zu Naturstein – in der Regel Kornroh­dichten zwischen 1800 und 2400 kg/m³ [6, 72, 94, 95]. Durch den Einsatz von vergleichsweise aufwendigen Auf­bereitungsv­erfahren kann der Anteil der Zementsteinmatrix so weit reduziert werden, dass eine Kornroh­dichte der rezyklierten Gesteinskörnung in der Größenordnung von 2500 kg/m³ erreicht wird [6, 96, 97].

Die Kornrohddichte von Betonbrechsanden ist aufgrund des in der Regel höheren Zementsteinanteils geringer als die Kornrohddichte von Betonsplitten [98]. Nahezu übereinstimmend wurde in verschiedenen Arbeiten eine Korrelation zwischen der Kornrohddichte einer rezyklierten Gesteinskörnung und den Festigkeitseigenschaften der hieraus hergestellten Baustoffe festgestellt [5, 99, 100].

Porosität

Die Porosität von natürlichen Gesteinskörnungen ist von der eingesetzten Gesteinsart abhängig. Natürliche Gesteinskörnungen für Leichtbeton weisen generell eine höhere Porosität auf als Zuschläge für Normal- und Schwerbeton. Im Falle von rezyklierten Gesteinskörnungen wird die Porosität vom porösen Zementsteinanteil maßgeblich beeinflusst. Mit steigendem Gehalt an Zementstein ist entsprechend auch ein Anstieg der Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung verbunden.

Ebenso wie die Rohddichte kann die Porosität einer Gesteinskörnung als Leitgröße für verschiedene Materialeigenschaften von Baustoffen betrachtet werden. Der mit dem Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen einhergehende Anstieg der Porosität bedingt in der Regel eine Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften der Körnungen. Eine hohe Porosität ist mit einem Verlust von Druckfestigkeit und besonders mit einer Reduzierung des E-Moduls verbunden [6].

Eine gute Korrelation von offener Porosität und Wasseraufnahme bei rezyklierten Gesteinskörnungen wurde von Maultzsch et al. festgestellt [4]. Im Rahmen seiner Arbeiten wies Rühl auf die Zusammenhänge zwischen Dichte, Wasseraufnahme, Porosität und Korngröße hin [98]. Katz führte die in seinen Untersuchungen nachgewiesene Verringerung der Dichte und die Erhöhung der Wasseraufnahme auf die Porosität des mit der rezyklierten Gesteinskörnung eingetragenen Alzementsteingehaltes zurück [22]. Auch hier wurde eine Verschlechterung der Baustoffqualität mit zunehmendem Anteil an feinen rezyklierten Gesteinskörnungen festgestellt.

Wasseraufnahme

Natürliche Gesteinskörnungen, die in der Betonproduktion eingesetzt werden, haben meist eine sehr geringe Wasseraufnahme. Der Wert für die Wasseraufnahme nach zehn Minuten, WA , ist in der Regel kleiner als 2 M-% und wird für Quarzit mit 0,7 M-% und für Granit mit 0,6 M-% angegeben [74, 101].

Rezyklierte Gesteinskörnungen weisen demgegenüber eine erhöhte Wasseraufnahme, teilweise in Größenordnungen über 10 M-% auf [4, 63, 102]. Diese erhöhte Wasseraufnahme der rezyklierten Gesteinskörnungen kann mit der Porosität der Gesteinskörnung erklärt werden und ist damit wiederum vom Zementsteingehalt abhängig [72, 78]. Infolge des mit abnehmender Korngröße zunehmenden Zementsteingehaltes von RC-Gesteinskörnungen ist entsprechend auch die Wasseraufnahme von feinen RC-

Gesteinskörnungen höher [103]. Das zusätzliche Wassersaugen der Körnung kann während des Betonmischvorgangs zu einem Ansteifen des Frischbetons führen, dem jedoch durch Vornässen oder durch eine um die Saugwassermenge erhöhte Wasserzugabe begegnet werden kann [12]. Inwieweit das Verhältnis Wasser zu Zement (w/z-Wert) im herzustellenden Beton durch das im Verlauf der Vornässung in die Poren der rezyklierten Gesteinskörnung gelangte Wasser beeinflusst wird, ist nicht abschließend geklärt [104]. Während eine Erhöhung des w/z-Wertes in der Regel zu verminderten Festigkeiten führt, kann durch eine Nachhydratation von nicht vollständig hydratisiertem Zementstein auch die Festigkeit des RC-Betons erhöht werden [78].

In einer Reihe von Studien wird davon ausgegangen, dass dieses Wasser später in den Poren des Gesteinskorns verbleibt und daher für die Hydratation des Zements nicht wirksam ist [7]. Andere Untersuchungen stellen fest, dass Wasser aus den Poren des RC-Materials zur sich bildenden Zementmatrix wandern und so den w/z-Wert verändern kann [83]. Übereinstimmend kann jedoch festgestellt werden, dass durch die mit der Bestimmung der Wasseraufnahme verbundenen Messunsicherheiten ein zusätzlicher Einflussfaktor für Schwankungen bei der Betonherstellung gegeben ist. Dies kann gerade bei Transportbeton zu ungewollten Störungen führen [105].

Schädliche Stoffe, Fremd- und Störstoffe

Als für Beton schädliche Stoffe gelten nach DIN 12 620 und 4226-100 [13, 51] Inhaltsstoffe, die die Eigenschaften des Betons nachteilig beeinflussen können. Hierzu zählen beispielsweise organische oder andere Stoffe, die das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des Betons verändern. Dies können beispielsweise Sulfate sein, die mit Gipsanteilen des Bauschutts in rezyklierte Gesteinskörnungen gelangen und sich erhärtungsstörend oder negativ auf die Raumbeständigkeit von Mörteln oder Betonen [106] auswirken können.

Chloride gelten ebenfalls als schädliche Stoffe, da sie in höheren Konzentrationen beton- oder stahlangreifend wirken können [107]. Ihre Konzentration in Bauschutt oder Straßenaufbruch ist abhängig von der Herkunft des Altbetons. Eine Quelle können zum Beispiel Tausalzrückstände in Straßenaufbruch sein. In den Regelwerken für rezyklierte Gesteinskörnungen werden entsprechende Anforderungen hinsichtlich des Gehalts an Chloriden und Sulfaten gestellt. Ebenso sind Höchstwerte für alkalireaktive Substanzen [108] und abschlämmbare Bestandteile aufgeführt.

In der Literatur findet man unterschiedliche Angaben zu den Sulfat- oder Chloridgehalten von rezyklierten Gesteinskörnungen. Gerade die Zementsteinmatrix von Recyclingzuschlägen kann Chloride enthalten [95]. In der Regel werden die zulässigen Höchstwerte an Chloriden und Sulfaten jedoch nicht überschritten [6].

Da sich die Herkunft der aufbereiteten Altbetone in der Praxis oftmals nicht nachvollziehen lässt, kann auf die Analyse von Sulfat und Chlorid nicht verzichtet werden. Durch den Einsatz von Nassaufbereitungsverfahren können erhöhte Sulfat- und Chloridgehalte sowie Gehalte von abschlämmbaren Bestandteile jedoch aus den aufbereiteten Gesteinskörnungen reduziert werden [8, 109].

Fremd- oder Störstoffe können in rezyklierten Gesteinskörnungen in unterschiedlichen Mengen vorhanden sein. Zu ihnen zählen beispielsweise aus der Abbruchmaßnahme stammende Ziegel-, Kunststoff- oder Keramikanteile sowie Holz oder andere minderfeste Bestandteile, welche die Wiederverwertung des Materials bei der Baustoffherstellung erschweren oder verhindern. Um die gewünschte Sortenreinheit [11, 12, 19, 110, 111] rezyklierter Gesteinskörnungen zu gewährleisten, sind sowohl die Gewinnung von Altbeton durch selektiven Rückbau [17, 68, 109, 112] als auch der Einsatz von Sortierverfahren [113, 114] sinnvoll und möglich.

Schadstoffe – Umweltverträglichkeit

Umweltschadstoffe sind Stoffe, die die Eigenschaften von Baustoffen nicht zwangsläufig negativ beeinflussen, jedoch zu Umwelt- oder Gesundheitsschäden führen können. Rezyklierte Gesteinskörnungen können in Abhängigkeit von der Herkunft des Altbetons auch Schadstoffgehalte aufweisen [14]. Die am häufigsten in Bauschutt anzutreffenden anorganischen Schadstoffe sind Schwermetalle wie beispielsweise Cadmium oder Blei, die häufig aus Altfarben stammen. Auch organische Schadstoffe wie polycyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) oder Mineralölkohlenwasserstoffe (MKW) können in Bauschutt, der aus dem Rückbau von Industriebauten stammt, nachgewiesen werden. In den Regelwerken für rezyklierte Gesteinskörnungen sind entsprechend Grenzwerte für typische Schadstoffe enthalten [11-13, 19].

Mit abnehmendem Korndurchmesser erhöht sich das Verhältnis Kornoberfläche zu Kornvolumen. Da sich Schadstoffe an der Kornoberfläche anlagern, sind feine Körnungen stärker mit Schadstoffen belastet als gröbere Körnungen [28, 115]. Zusätzlich wird die Kornoberfläche durch die anhaftende poröse Zementsteinmatrix noch vergrößert. Dies verstärkt den Effekt der Schadstoffanreicherung in Brechsandfraktionen.

Durch selektiven Rückbau können mögliche Schadstoffgehalte im Altbeton grundsätzlich gering gehalten werden. Die Anwendung eines Nassaufbereitungsverfahrens kann nachträglich eine Verringerung der Schadstoffgehalte in den rezyklierten Gesteinskörnungen bewirken [114].

2.2.2 Frischbetoneigenschaften

Mit Frischbeton wird fertig gemischter, noch zu verarbeitender und verdichtbarer Beton bezeichnet, dessen wichtigste Eigenschaft die Verarbeitbarkeit ist. Unter Verarbeitbarkeit als Sammelbegriff werden die Eigenschaften verstanden, die das Verhalten des

Frischbetons beim Mischen, Transportieren sowie beim Einbringen und Verdichten beeinflussen [116]. Sie ist ebenso wie die spätere Betondruckfestigkeit eine maßgebende Materialeigenschaft und wird mittels des Mischungsentwurfs des Betons auf den jeweiligen Anwendungsfall abgestimmt.

Verarbeitbarkeit

Als Maß für die Beurteilung der Verarbeitbarkeit dient die Konsistenz, die nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 [50, 73] in Abhängigkeit von der Prüfmethode in Konsistenzklassen, z.B. Ausbreitmaßklassen oder Verdichtungsmaßklassen, eingeteilt wird und mit denen jeweils Teilbereiche der Frischbetonverarbeitbarkeit erfasst werden. Innerhalb dieser Klassen werden unterschiedliche Konsistenzbereiche zwischen steif oder sehr steif bis zu fließfähig bzw. sehr fließfähig unterschieden.

Rezyklierte Gesteinskörnungen können die Verarbeitbarkeit von Frischbeton analog zu gebrochenen natürlichen Körnungen durch ihre Kornform beeinflussen. Durch die eckigeren Kornformen können höhere Hohlraumgehalte als bei der Verwendung kugeligere Körnungen entstehen, so dass eine größere Zugabe von Zementleim erforderlich sein kann, um die gleiche Verarbeitbarkeit wie „Kies-Betone“ zu erhalten [117].

Ein wesentlicher Nachteil von RC-Gesteinskörnungen ist das zusätzliche Wassersaugen des Altzementsteins [7]. Diese Eigenschaft hat Auswirkungen auf das Ansteifverhalten des Betons, da diese mit zunehmendem Anteil an Zementstein stärker ansteifen können [118]. Aufgrund der höheren Anteile an Altzementstein in den Sandfraktionen sind die Veränderungen bei Frischbetonen mit Brechsandanteil besonders ausgeprägt. Umso wichtiger ist die genaue Kenntnis des zusätzlichen Wassersaugens, um eine gute Verarbeitbarkeit durch zusätzliche Wasserzugabe zu erreichen [49].

Eine Vornässung der rezyklierten Gesteinskörnung muss sehr sorgfältig durchgeführt werden. Untersuchungen von Poon haben gezeigt, dass es bei zu stark vorgehängten Gesteinskörnungen zu einer Erhöhung des w/z-Wertes und so zu einer Reduzierung der Druckfestigkeit kommen kann [83]. Für die Erreichung einer bestimmten Konsistenz und Festigkeit kann bei RC-Betonen daher eine im Vergleich zu Referenzbetonen höhere Zementzugabe erforderlich sein [49]. Der Einsatz von Fließmitteln kann die Verarbeitbarkeit verbessern [83]. Bei genauer Fließmitteldosierung kann eine Erhöhung des Zementgehaltes vermieden oder zumindest begrenzt werden [119].

Luftgehalt

Der Luftgehalt von Frischbeton muss nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 [120, 121] in Abhängigkeit vom Größtkorn der Gesteinskörnung in vorgegebenen Grenzen liegen und beeinflusst naturgemäß auch die Frisch- und Festbetonrohddichte. Ein höherer Luftgehalt kann die Druckfestigkeit schwächen [122], jedoch auch den Frostwiderstand von Beton erhöhen [123].

Über Veränderungen des Luftgehaltes von Frischbeton durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen werden in der Literatur unterschiedliche Angaben gemacht [72]. Während der überwiegende Teil der Autoren, z.B. Katz [22] und Schießl [118], einen Anstieg der Luftgehalte im Frischbeton besonders beim Einsatz von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen beobachteten, zeigten einige Untersuchungen übereinstimmende Luftgehalte von RC-Frischbetonen und Referenzbetonen gleicher Rezeptur [23, 124].

2.2.3 Festbetoneigenschaften

Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit ist die Hauptkenngröße für Festbetone und Festmörtel. Dementsprechend wird Beton nach DIN EN 206 [120] nach seiner 28-Tage-Druckfestigkeit in Festigkeitsklassen und Betongruppen eingeteilt. Eine Vielzahl von Faktoren bestimmt die Druckfestigkeit von Beton und Mörtel. Zu diesen Faktoren zählen neben Einflüssen aus Herstellungsprozess, Probekörperform und Lagerung der Probekörper vor allem die stoffliche Zusammensetzung und die Eigenschaften der Ausgangsstoffe.

Die Porosität ist als Einflussgröße für die Druckfestigkeit des Betons oder Mörtels von besonderer Bedeutung [6, 73]. Betone mit Anteilen von rezyklierten Gesteinskörnungen können aufgrund ihrer höheren Porosität daher geringere Druckfestigkeiten als entsprechende Referenzbetone aufweisen [70, 78]. In der Mehrzahl der Untersuchungen zum Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Druckfestigkeit von Baustoffen wurde entsprechend ein Festigkeitsverlust festgestellt, der mit dem Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung am gesamten Zuschlag korreliert [63, 79]. Die Angaben zum Festigkeitsverlust schwanken zwischen 15 % und 20 % beim Ersatz der Körnungen oberhalb der Sandfraktion [72, 125] und zwischen 40 % und 50 % beim Ersatz der gesamten Körnung durch rezykliertes Material [6, 100].

Nur wenige Autoren berichten von unveränderten Druckfestigkeiten von RC-Betonen im Vergleich zu Referenzbetonen gleicher Herstellart. Chen et al. beobachteten beispielsweise Druckfestigkeiten gleicher Größenordnung beim Einsatz von Betonsplitten in Betonen mit Wasser/Zement-Werten ab 0,6 und höher [66]. Ravindrarajah und Tam konnten beim Ersatz von Natursand durch Betonbrechsand sogar Druckfestigkeitserhöhungen feststellen, die sie mit der Nachhydratation nicht hydratisierter Zementphasen im Altbeton erklärten [78].

Siebel und Kerkhoff machten in ihren Studien ähnliche Beobachtungen, die sie dahingehend interpretierten, dass der mit zunehmendem RC-Anteil teilweise beobachtete Anstieg der Druckfestigkeiten möglicherweise auf ein zusätzliches Wasser-saugen des Zuschlags und die damit verbundene Verringerung des wirksamen w/z -Wertes zurückzuführen sei [71, 103].

Biegezugfestigkeit

Ein weiteres Kriterium für die Qualität eines Betons ist die Biegezugfestigkeit, die als Festigkeit in der Zugzone bei Biegebeanspruchung gemessen wird. Sie unterscheidet sich von der reinen Zugbeanspruchung dadurch, dass im Betonquerschnitt eine Druck- und eine Zugzone entstehen. Die Biegezugfestigkeit wird an Balken bzw. Prismen ermittelt, die bis zum Bruch belastet werden (DIN EN 206 [50].)

Die Biegezugfestigkeit wird ebenfalls vom vorhandenen Betonporenraum bzw. Zementsteinporenraum beeinflusst. Die meisten Untersuchungen der Biegezugfestigkeiten von Baustoffen mit rezyklierten Gesteinskörnungen berichten von einer Abnahme der Werte [72]. Chen et al. stellten in ihren Untersuchungen beispielsweise Biegezugfestigkeitsverluste in Größenordnungen zwischen 9 % und 22 % fest, wobei die Werte durch eine Nassaufbereitung der rezyklierten Gesteinskörnungen verbessert werden konnten [66]. Katz stellte in Abhängigkeit vom eingesetzten Zementtyp Biegezugfestigkeitsverluste bis zu 30 % im Vergleich zu Referenzbetonen fest [22].

Die Verringerung der Biegezugfestigkeit war in den meisten Untersuchungen geringer als die der Druckfestigkeit [66, 126]. Durch die unterschiedliche Beeinflussung von Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit durch die Porosität können Baustoffe mit Anteilen rezyklierter Gesteinskörnungen auch unterschiedliche Verhältnisse von Biegezugfestigkeit zu Druckfestigkeit im Vergleich zu den jeweiligen Referenzbaustoffen aufweisen. Hoppe et al. wiesen in ihrer Studie über die Verwertbarkeit von rezyklierten feinen Gesteinskörnungen auf das teilweise sehr niedrige Verhältnis von Biegezugfestigkeit zu Druckfestigkeit hin [17, 69]. Daraus folgt, dass die untersuchten Mörtel bei gleicher Druckfestigkeit wie übliche Mauermörtel nicht im gleichen Maße auf Zug belastet werden konnten. Dies galt jedoch nur für Recyclingbrechsande mit einem hohen Anteil Porenbeton oder Leichtmauerziegel [17, 69].

Elastizitätsmodul

Der Elastizitätsmodul (E-Modul) ist die materialspezifische Größe für die elastische Verformung von Werkstoffen unter Lasteinwirkung. In Abhängigkeit von der späteren Nutzung von Baustoffen werden an diese Kenngröße unterschiedliche Anforderungen gestellt. Im Konstruktionsbeton ist in der Regel eine hohe Festigkeit bei möglichst kleinen Verformungen gefordert, im Straßen- oder Brückenbau kann dagegen eine hohe Elastizität erforderlich sein.

Der Elastizitätsmodul von Beton und Mörtel ist primär abhängig vom E-Modul der eingesetzten Gesteinskörnung und dem E-Modul des Zementsteins. Beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen ist die Porosität des Zuschlags eine entscheidende Einflussgröße. Außerdem wird der E-Modul auch vom Verbundverhalten zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix beeinflusst. Durch dieses gleichzeitige Wirken mehrerer Einflussgrößen wird der E-Modul in der Regel stärker vom Gehalt an

rezyklierter Gesteinskörnung bzw. vom Altzementstein beeinflusst als dies bei der Druckfestigkeit der Fall ist [127].

In nahezu allen ausgewerteten Veröffentlichungen wurde übereinstimmend festgestellt, dass die Abnahme des Elastizitätsmoduls von RC-Betonen über den Druckfestigkeitsverlusten lag und dass mit zunehmenden Anteilen an rezyklierten Gesteinskörnungen auch eine Abnahme des Elastizitätsmoduls zu verzeichnen ist [5, 67, 128]. Selbst in Untersuchungen von Beton, die keine Veränderung der Druckfestigkeit durch den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen erfuhren, wurde bei der Messung von dynamischem und statischem E-Modul eine eindeutige Reduzierung dieser Messgrößen festgestellt [78].

Schwinden

Mit dem Begriff Schwinden werden Formänderungen von Beton oder Mörtel beschrieben, die durch Veränderungen des Wasserhaushalts im Baustoffgefüge verursacht werden. Durch die Abgabe von Wasser erfährt das Material eine Volumenverringerung, das Schwinden. Folgende Arten des Schwindens werden unterschieden:

- Bereits während des Betonierens setzt durch die Verdunstung von Wasser das sogenannte Kapillar- oder Fröhschwinden ein.
- Unter Trocknungsschwinden versteht man die Volumenabnahme infolge der Verdunstung von Wasser bei der Erhärtung des Baustoffs.
- Autogenes Schwinden wird beim erhärteten Beton durch die sogenannte Selbst-austrocknung des während der Hydratation entstandenen Porenraums hervorgerufen. Der entstehende Zementstein nimmt ein geringeres Volumen ein als seine Ausgangsprodukte Wasser und Zement.

Fröhschwinden und Trocknungsschwinden sind im Gegensatz zum autogenen Schwinden reversibel und können durch die Zugabe von Wasser ausgeglichen bzw. reduziert werden. Bei normaler, austrocknender Lagerung werden autogenes Schwinden und Trocknungsschwinden zusammen gemessen.

Der bestimmende Faktor für die Schwindvorgänge in Beton oder Mörteln ist ihr Zementsteingehalt, da die Wasserabgabe primär durch den Zementstein erfolgt. Bei Baustoffen mit Anteilen von rezyklierten Gesteinskörnungen wird das Schwinden des Betons oder Mörtels durch die Porosität des Altzementsteins in der RC-Gesteinskörnung und die damit verbundene erhöhte Feuchtigkeitsabgabe noch vergrößert. Entsprechend wird in den Untersuchungen zum Schwindverhalten von RC-Baustoffen in der Literatur fast übereinstimmend von einer Erhöhung der Endschwindmaße berichtet [49, 72]. Die Angaben zum Betrag der Erhöhung des Schwindmaßes der RC-Baustoffe im Vergleich zu den jeweiligen Referenzbetonen schwanken und sind abhängig vom Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung. In der Regel führt der Ersatz von Natursand

durch feine rezyklierte Gesteinskörnungen zu einer stärkeren Erhöhung des Schwindmaßes als die Zugabe von groben rezyklierten Körnungen [4, 72, 78].

Ravindrarajah stellte bei Beton, der vollständig aus rezyklierter Gesteinskörnung bestand, eine Verdopplung des Schwindmaßes fest [5]. Siebel und Kerkhoff beobachteten bei ähnlichen Betonen zudem auch die Bildung von feinen Rissen [71]. Dies ist mit den Gefügespannungen bzw. Schwindzugspannungen zu erklären, die aufgrund der unterschiedlichen Schwindmaße von Gesteinskörnung und Zementstein auftreten und eben zu Mikrorissen an der Grenzfläche zwischen Gesteinskorn und Zementstein aber auch zu Rissen im Zementstein führen können [73]. Tavakoli und Soroushian stellen in ihren Untersuchungen einen direkten Zusammenhang zwischen dem Endschwindmaß und dem Anteil an Zementstein in der rezyklierten Gesteinskörnung her [129].

Kriechen

Als Kriechen werden bleibende Formänderungen von Baustoffen bezeichnet, die durch Dauerlasteinfluss verursacht werden. Diese Formänderungen entstehen bei Druckbelastung durch eine Gefügeumwandlung und Volumenreduzierung. Die äußere Belastung führt zu einer Verlagerung von Wassermolekülen im Zementstein. Chemisch nicht gebundenes Wasser wird dabei aus dem Porenraum in die Kapillaren gepresst und verdunstet. Die Zunahme von Kriechverformungen kann mehrere Jahre anhalten.

Die Kriechverformung hängt ebenso wie das Schwinden maßgeblich vom Zementsteinvolumen des Baustoffs ab. Daher kommt es bei Betonen mit Anteilen von rezyklierten Gesteinskörnungen - und damit mit einem höheren Zementsteingehalt - auch zu größeren Formveränderungen durch Kriechvorgänge [67, 130].

2.3 Technik der Bauschutttaufbereitung

Die meisten der in der Aufbereitung von Bauschutt eingesetzten Technologien haben ihren Ursprung in der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen. Ziel der Bauschutttaufbereitung ist die Gewinnung eines möglichst sortenreinen Recycling-Produktes, das außerdem die für den Wiedereinsatz erforderlichen Korngrößenverteilungen aufweist. Die Bauschutttaufbereitung kann im Wesentlichen in drei Hauptverfahrensstufen unterteilt werden:

- Zerkleinerung und Aufschluss,
- Klassierung sowie
- Sortierung

Der Aufbereitung des Bauschutts geht üblicherweise eine Vorsortierungsstufe voraus, in der Fremd- und Störstoffe aus dem eigentlichen Bauschutt entfernt werden. Hierzu

gehört beispielsweise das Klauben, unter dem die Entfernung von Fremdstoffen wie z.B. Holzstücken oder Kunststofffolien per Hand zu verstehen ist.

Vor der ersten Hauptverfahrensstufe, der Zerkleinerung durch Brechen, wird der auf der Baustelle vorzerkleinerte Bauschutt in der Regel abgesiebt. Das bei diesem Siebvorgang gewonnene Vorabsiebmaterial beinhaltet außer Bauschuttbruchstücken auch Erd- bzw. Bodenpartikel, die durch die Aufnahme des Materials auf der Baustelle in den Bauschutt gelangen und die z.B. im Betonbruch nicht erwünscht sind. Gleichzeitig wird durch die Absiebung vor dem Brechvorgang die Kapazität des Brechers besser genutzt, da die Aufgabemenge an Grobgut um die Menge an abgesiebttem Material erhöht werden kann.

Die bei der Aufbereitung eingesetzten Techniken und die Verfahrensführung richten sich nach den Möglichkeiten in den jeweiligen Aufbereitungsanlagen und nach den Anforderungen an die zu produzierende RC-Gesteinskörnung. Da das Preisniveau von Gesteinskörnungen für die Baustoffherstellung vergleichsweise niedrig ist, müssen die gewählten Verfahren möglichst kostengünstig zu betreiben sein. Deshalb werden ein niedriger Energieverbrauch, ein geringer Wartungsaufwand und vor allem eine einfache und robuste Betriebsweise, die einen möglichst geringen Personalaufwand erfordert, angestrebt.

Im ersten Schritt wird der Bauschutt in einem Brecher zerkleinert. Anschließend wird das Material sortiert und klassiert. Hauptziel der Zerkleinerung ist die Gewinnung einer möglichst optimalen Korngrößenverteilung und – in Abhängigkeit vom vorgesehenen Verwendungszweck – einer günstigen Kornform sowie gegebenenfalls der Aufschluss von Fremd- oder Störstoffen für eine anschließende Sortierung. Ein weiteres Ziel des Brechvorgangs kann das Lösen der Zuschlagskörnung aus ihrem Verbund mit dem Zementstein sein, das über den Aufschlussgrad beschrieben wird [131, 132]. Zu diesem Zweck werden neben den herkömmlichen Zerkleinerungstechniken auch andere Verfahren untersucht [132, 133] (siehe Kapitel 2.3.2).

Im Aufbereitungsprozess wird der zerkleinerte Bauschutt in einer Siebklassierung in die als Aufbereitungsprodukte vorgesehenen Kornklassen fraktioniert. Vorhandenes Überkorn wird abgetrennt und kann dem Brecher erneut zugeführt werden. In stationären Anlagen werden Zerkleinerung und Klassierung oftmals durch Sortierverfahren ergänzt. Kleinere oder mobile Bauschuttaufbereitungsanlagen werden zum Teil auch als einfache Siebstationen für das beim Abbruch vorzerkleinerte Material betrieben.

Die Prozessstufe Sortierung dient der Entfernung von Fremd- oder Störstoffen und ist für die Herstellung möglichst sortenreiner RC-Materialien von besonderer Bedeutung. Wichtig ist dieser Verfahrensschritt vor allem für die Gewinnung von RC-Baustoffen aus nicht durch selektiven Rückbau gewonnenem Bauschutt. Es wird unterschieden

zwischen der Vorsortierung des Ausgangsmaterials zur Entfernung von groben Störstoffen und z. B. Bewehrungsstahl sowie der eigentlichen Sortierung, die nach der Zerkleinerungsstufe der Entfernung von Fremdstoffen dient [6].

Gesteinskörnungen, die für eine Verwertung auf einem niedrigen Niveau vorgesehen sind und für die deshalb auch nur geringere Erlöse erzielt werden können, werden entsprechend weniger aufwendig aufbereitet als beispielsweise Gesteinskörnungen für die Baustoffherstellung. Die Aufbereitung kann in mobilen Anlagen oder in stationären Anlagen erfolgen. Die Qualität der aufbereiteten Gesteinskörnung ist dabei sowohl von dem aufzubereitenden Material als auch von der eingesetzten Technik abhängig. Abbildung 2.2 zeigt das Beispiel eines Verfahrensschemas für eine mehrstufige Bau-schutttaufbereitung in einer stationären Anlage.

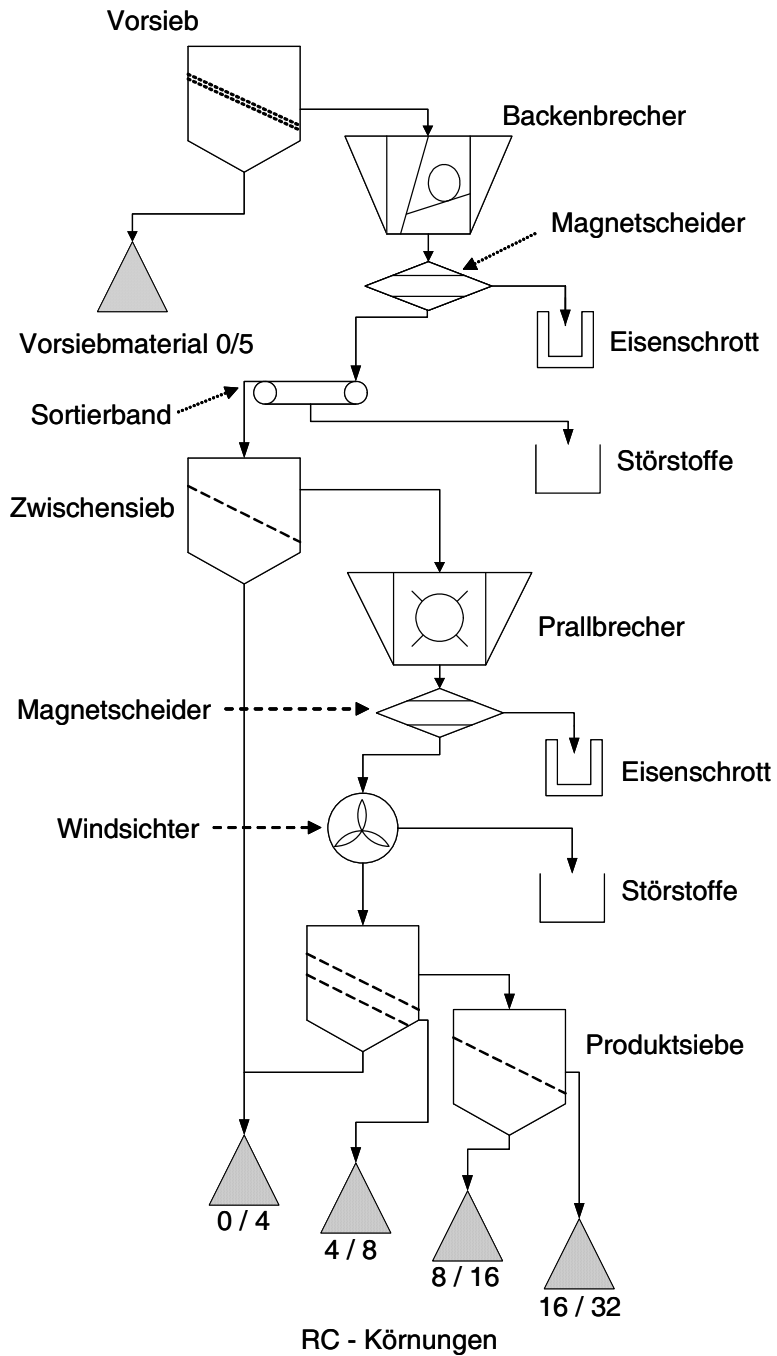


Abbildung 2.2: Verfahrensschema für die mehrstufige Bauschutttaufbereitung in einer stationären Aufbereitungsanlage

2.3.1 Zerkleinerung und Klassierung

Eigenschaften und Qualität der aufbereiteten Fraktionen sind maßgeblich von den Materialeigenschaften des Ausgangsmaterials und von den eingesetzten Aufbereitungstechniken abhängig. Hierbei beeinflusst bereits die Wahl des Zerkleinerungsaggregates bzw. der –aggregate sowohl die Korngrößen und ihre Verteilung [134], als auch die Porosität und damit verbunden die Wasseraufnahme der Körnungen [6] sowie die Kornform und das Gefüge der erzeugten Partikel [80, 135].

Über die Wahl des Brechertyps und über den Betrieb des Brechers ist es möglich, Kornform und Feinstkornanteil respektive Brechsandanfall zu beeinflussen. Gewünscht sind für die Betonherstellung eine möglichst kubische Kornform und aufgrund der schlechteren Verwertungsmöglichkeiten ein möglichst geringer Brechsandanfall [127].

Die in der Praxis am häufigsten verwendeten Zerkleinerungsaggregate sind Backenbrecher und Prallbrecher. Backenbrecher sind als robuste Aggregate für den Durchsatz von großen Massen mit Anteilen von Störstoffen, wie z.B. Bewehrungsseisen, geeignet. Mit Backenbrechern wird ein vergleichsweise geringer Zerkleinerungsgrad erreicht. Dementsprechend ist der Brechsandanfall gering. Prallbrecher erreichen einen hohen Zerkleinerungsgrad, mit ihrem Einsatz ist damit auch ein höherer Brechsandanfall verbunden. Ein Vorteil von Prallbrechern ist der hohe Anteil von Körnern mit kubischen Kornformen im Austragsgut. Dieser Brechertyp ist jedoch vergleichsweise störanfällig, daher sollten die Größe des Aufgabegutes und der Anteil an Störstoffen wie Bewehrungsseisen begrenzt werden.

In mobilen Anlagen werden in der Regel Prallbrecher eingesetzt, die infolge des hohen Zerkleinerungsgrads eine direkt einsetzbare Körnung erzeugen können. In stationären Anlagen erfolgt die Zerkleinerung in der Regel mehrstufig [29, 127]. Als günstig hat sich der aufeinanderfolgende Einsatz von Backenbrechern und Prallbrechern erwiesen. So wird zum Beispiel eine Vorzerkleinerung von Bauschutt mit einem Backenbrecher durchgeführt, danach erfolgt ein weiterer Brechvorgang in Prallbrechern [136]. Untersuchungen haben gezeigt, dass durch diese zweistufige Verfahrensweise die durch anhaftende Zementmatrix induzierte Wasseraufnahme des Brechgutes im Vergleich zu einstufigem Brechen in Prall- oder Backenbrecher reduziert werden kann [6].

Mit der Reduzierung des Brechsandanfalls beschäftigte sich ein Forschungsprojekt zur Optimierung der Zerkleinerung von Beton in Prallbrechern. Ziel der Arbeiten von Jeschke et al. [137] war es, durch geeignete Anlageneinstellung und Verfahrensführung außer der Reduzierung des Brechsandanfalls auch eine Verbesserung der Produktqualität des Betonsplitts zu erreichen. Ein weiterer wichtiger Gesichtspunkt war die Erhöhung der Verfügbarkeit der Brecheranlage durch geringeren Verschleiß der Rotoren. Es wurde festgestellt, dass sich sowohl Brechsandanfall als auch Energie-

verbrauch durch optimierte Rotoreinstellung und geeigneten Brecherfüllstand verringern lassen [81].

Ein weiteres Prozessziel der angewandten Zerkleinerungsverfahren kann das Aufschließen der Betonpartikel sein, indem durch eine abrasive Beanspruchung eine Ablösung von Anteilen der Zementmatrix vom Natursteinkorn erfolgt. Der abgeriebene Zementstein reichert sich in der Brechsandfraktion an und kann durch eine Siebklassierung abgetrennt werden. In der Bauschuttzubereitung werden in Abhängigkeit vom aufzubereitenden Material unterschiedliche Siebtypen wie beispielsweise Spannwellensiebe oder Schwingsiebe eingesetzt. Durch die Auswahl der Maschenweite der einzelnen Siebeläge wird der gebrochene Bauschutt in die gewünschten Korngrößenklassen getrennt. Üblich ist die Klassierung in die Korngruppen 0/4, 4/8, 8/16, 16/32 und 32/45 mm. Der Anteil > 45 mm kann wieder der Zerkleinerungsstufe zugeführt werden.

2.3.2 Aufschlussverfahren

Nach der Zerkleinerung liegen die im Beton enthaltenen Natursteinkörner teilweise noch vollständig bzw. großflächig von Zementstein umhüllt vor. Daher gibt es ergänzend zu den Zerkleinerungsverfahren noch weitere Ansätze, um die Trennung des Materialverbundes von Natursteinkörnern und Zementsteinmatrix durch spezielle Aufschlussverfahren zu verbessern. Ziel dieser Aufschlussverfahren ist es, eine zementsteinarme, möglichst zementsteinfreie RC-Gesteinskörnung zu erhalten. In Abbildung 2.3 sind verschiedene Stufen von Zerkleinerung und Aufschluss dargestellt. Im Idealfall sind Natursteinkörner nach dem Aufschlussverfahren vollständig vom Zementstein befreit.

Ein mechanisches Aufschlussverfahren von Altbeton durch Abrasion wird bereits seit einigen Jahren in Japan großtechnisch praktiziert. Die Zementsteinmatrix an den vorzerkleinerten Altbetonkörnungen wird durch die Bewegung zwischen einer exzentrisch gelagerten und vibrierenden Rotoreinheit und der äußeren starren Ummantelung vom Natursteinkorn abgerieben. Die aufbereitete Altbetonkörnung > 5 mm weist eine Kornrohddichte von 2,52 g/cm³ und eine Wasseraufnahme von 3 % auf. Der abgeriebene Zementstein wird mit Absiebung der Fraktion < 5 mm entfernt [96, 97].

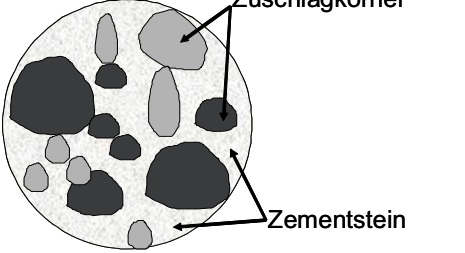
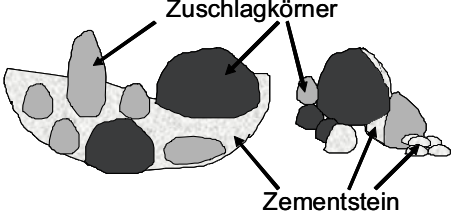
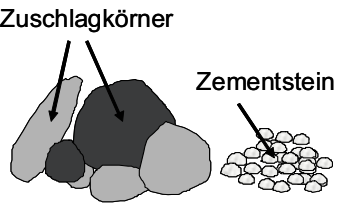
| | |
|---|--|
|  | <p>Vor der Zerkleinerung: Schnitt durch einen ungebrochenen Betonzylinder, in dem die Zuschlagkörner vollständig in die Zementsteinmatrix eingebettet sind.</p> |
|  | <p>Nach der Zerkleinerung: Betonbruchstück mit teilweise freiliegenden Zuschlagkörnern sowie vollständig freiliegende Zuschlagkörner mit Restzementsteinanhaftungen.</p> |
|  | <p>Vollständiger Aufschluss: Im Idealfall ist die Natursteinkörnung vollständig von der Zementsteinmatrix befreit.</p> |

Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der verschiedenen Stufen von Aufschluss und Zerkleinerung von Beton

Die elektrohydraulische Zerkleinerung von Altbeton wurde in einem deutschen Forschungsprojekt untersucht. Ziel der Arbeiten war die Gewinnung einer möglichst natursteinähnlichen Fraktion > 2 mm. Die Energie eines Leistungsschallimpulses diente in diesem Projekt als Zerkleinerungsinstrument. Im Gegensatz zu mechanischen Aufschlussverfahren kann die Energie des Impulses flächig statt punktuell eingesetzt werden, so dass es zu einer Trennung von Zementstein und Natursteinkorn kommen kann ohne die vergleichsweise starke mechanische Beanspruchung des Natursteinkorns bei Abrasionsverfahren [138]. In den Versuchen konnten Fraktionen > 2 mm mit einem Anteil von 70 % zementsteinfreien Partikeln gewonnen werden [133, 138]. Trotz der hohen erreichten Aufschlussgrade bei gleichzeitig geringer Beanspruchung des Natursteinkorns ist die Umsetzung dieses Verfahrens in die Praxis aufgrund des für die Baustoffproduktion vergleichsweise hohen Aufwandes bisher nicht erfolgt.

Die Verwertung von durch Feinmahlung aufbereiteten Betonbrechsanden als Beton-zusatzstoff wurde in einem Verbundvorhaben untersucht. Obwohl es in den Versuchen nicht zu einer Reaktivierung des in den Betonbrechsanden vermuteten restlichen Hydratationspotentials kam, ließen sich mit dem zu einem feinen Betonzusatzstoff aufbereiteten Material dauerhafte Betone herstellen [139].

Als weitere Möglichkeit zum Aufschluss von Altbeton können thermische Verfahren eingesetzt werden. In diesen Verfahren wird die unterschiedliche thermische Stabilität von Zementstein und Natursteinkörnung genutzt, um den Kornverbund zu trennen. Durch die Dehydratation der verschiedenen Zementsteinbestandteile bei Erhitzung von Mörtel oder Beton verliert der Zementstein seine Festigkeit [140].

Die Erhitzung von Altbetonkörnungen in einem Drehrohrofen wurde von Mulder et al. untersucht [141]. Ziel der Temperaturbehandlung bei 700°C war die Trennung von Natursteinkorn und anhaftendem Zementstein, da dieser durch die Dehydratation brüchig wird und seine Haftung verliert. Durch die anschließenden Verfahrensschritte Klassierung mittels Vibrationssieb und Windsichtung konnten eine Grob- und eine Sandfraktion sowie ein Feinstgut < 150 µm gewonnen werden. Die Grobfraktion wies maximale Zementsteinanhaftungen von 2 % an der Natursteinkörnung auf. Das Feinstgut bestand fast vollständig aus Zementstein und wäre nach Einschätzung der Autoren gut in der Zementproduktion einsetzbar.

Die thermische Reaktivierung der Bindemittleigenschaften der Zementsteinmatrix mit dem Ziel einer Wiederverwertung als Sekundärbindemittel wurde bereits 1983 von Hansen und Narud durch Erhitzung im Autoklaven untersucht [142]. Spätere Arbeiten hatten vor allem die thermische Behandlung der zementsteinreichen Brechsande zum Untersuchungsgegenstand [17, 143-146]. Im Rahmen eines EU-Projektes wurden in einem industriellen Großversuch Zementklinker unter Verwendung von gemahlenem Bauschutt bzw. Betonbruch hergestellt [42, 68]. Eine industrielle Umsetzung ist bisher noch nicht erfolgt.

2.3.3 Sortierung

Ergänzt werden die Aufbereitungsverfahren durch Sortierverfahren. Die Sortierung wird als Trennung nach Stoffart unter Nutzung physikalischer Merkmale definiert [131]. In Bezug auf die Aufbereitung von Bauschutt bzw. Altbeton hat eine Sortierung vor allem die Entfernung von Störstoffen wie z.B. Ziegel-, Eisen- oder Holzanteilen zum Ziel. Bei bereits aufgeschlossenem Altbeton kann ein Sortierverfahren auch zur Trennung der Aufschlussprodukte Altbetonstein und natürliche Gesteinskörnung eingesetzt werden.

Trockene Sortierverfahren

Bei den in der industriellen Bauschuttaufbereitung eingesetzten Sortierstufen werden in der Regel trocken arbeitende Technologien angewandt, da die für den Betrieb einer

Nassaufbereitung erforderliche Führung eines Wasserkreislaufes vielen Betreibern von Recyclinganlagen als zu aufwendig gilt [147, 148].

Zu den trockenen Sortierverfahren in der Bauschutttaufbereitung gehört neben dem händischen Aussortieren (Klauben) von größeren Fremdkörpern bzw. Fremdstoffen als zurzeit wichtigstes Verfahren die Aussortierung von Bewehrungsstahl mit Magnetabscheidern [149]. Neben der Entfernung des Fremdstoffes Eisen aus dem Bauschutt lässt sich über den Schrottverkauf auch eine zusätzliche Einnahme erzielen.

Die weiteren trockenen Sortierverfahren dienen in der Regel der Entfernung von leichten Störstoffen wie z.B. Holz, Styropor oder Kunststofffasern. Die eingesetzten Verfahren sind Aerosortierungen und basieren auf dem Einsatz von Luft als Fluid für die Trennung. Üblich sind Windsichter in verschiedenen Ausführungen [8, 113]. Nachteil dieser Verfahren ist, dass für eine Aussortierung von Fremdstoffen ein ausreichender Dichteunterschied zwischen dem Bauschutt und dem Störstoff bestehen muss. Daher können mittels Windsichtung nur sehr leichte Störstoffe entfernt werden. Außerdem ist es notwendig, dass das Sortiergut eng klassiert ist, da sonst Klassierungseffekte die Dichtesortierung überlagern können. Feine Fraktionen wie z.B. Betonbrechsand können nicht durch trockene Verfahren sortiert werden.

Als Sonderverfahren kann die optische Sortierung angesehen werden. Versuche zur Aufbereitung von gemischtem Bauschutt erfolgten mit einer optischen Sortiereinheit, die mit einer sensorgestützten Hochgeschwindigkeitskamera zur Farbidentifizierung ausgerüstet war. Gute Ergebnisse wurden für die Aussortierung von Holz erzielt [147]. Die optische Sortierung von mineralischen Rohstoffen wie beispielsweise Quarzit und Feldspat ist bei Korngrößen im Bereich 3 bis 250 mm ebenfalls möglich. Voraussetzung ist, dass die zu trennenden Mineralien sich in Farbe oder Helligkeit erkennbar unterscheiden. In Abhängigkeit von den zu sortierenden Korngrößen und der Menge auszusortierender Anteile können Durchsätze von über 100 t/h sortiert werden [150].

Zur Sortierung einer Mischung aus Ziegel- und Betonbruch könnte ebenfalls eine Trennung nach den Farbunterschieden erfolgen. Für eine scharfe Trennung müssten die einzelnen Körner jedoch relativ sauber bzw. staubfrei vorliegen, was bei einer trockenen Aufbereitung oft nicht der Fall ist. Grundsätzlich ist die optische Sortierung ein vergleichsweise teures Verfahren und stößt in Bezug auf die Produktion von Sekundärbaustoffen bisher eher auf Vorbehalte [151].

Nasse Sortierverfahren

Die Mehrzahl der Nassverfahren zur Bauschuttsortierung stammt ebenso wie die meisten trocken arbeitenden Verfahren aus der traditionellen Aufbereitung mineralischer Rohstoffe. Ein großer Vorteil von Nassaufbereitungsverfahren zur Sortierung ist die gleichzeitige Entfernung von auswaschbaren Schad- oder Störstoffen [109] und die

vergleichsweise geringe Staubentwicklung während des Aufbereitungsprozesses. Weiterhin ist keine so enge Klassierung des Ausgangsmaterials erforderlich und auch Sandfraktionen können mit einem Nassverfahren aufbereitet werden [148].

Die Wirkprinzipien der meisten Nasssortierungsverfahren basieren auf der unterschiedlichen Dichte der zu trennenden Materialien. Die als Wertstoff auszubringenden mineralischen Sekundärrohstoffe haben eine höhere Dichte als die auszusortierenden Fremdstoffe wie Holz, Styropor oder Leichtbaustoffe. Nassverfahren zur Dichtentrennung weisen gegenüber trockenen Sortierverfahren eine weitaus höhere Trenndichte und Trennschärfe auf, so dass qualitativ höherwertige Produkte hergestellt werden können [148]. Die Effektivität der jeweiligen Verfahren ist dabei abhängig von der Korngrößenverteilung und der Dichte des zu trennenden Körnerkollektivs.

Zur Schwerkraftsortierung im Feinkornbereich können Hydrorinnen, ausgebildet als Wendelscheider oder Sortierspiralen, eingesetzt werden. Sortierspiralen sind Rinnen in spiralförmiger Ausbildung, auf denen Feststoffe mit unterschiedlichen Dichten nach ihrer Relativbewegung im Verhältnis zur Schwerkraft im flüssigen Medium, in der Regel Wasser, sortiert werden [152]. Auf die Partikel wirken neben der Schwerkraft kombinierte Einflüsse aus Zentrifugalkraft, Absetzgeschwindigkeit sowie quergerichteter Transversalströmungen. Die Partikeltrennung wird bei dieser Sortierung auch von Klassierungseffekten beeinflusst. Sortierspiralen werden großtechnisch in der Bodensanierung und in der Kiesaufbereitung verwendet [153]. Sie sind für den Einsatz bei Korngemischen mit einem hohen Leichtgutanteil und großen Dichteunterschieden geeignet [154]. Eine Anwendung in der industriellen Brechsandaufbereitung findet nicht statt.

In Sortierzentrifugen für die Partikeltrennung wirkt die Zentrifugalkraft auf das Einzelkorn. Vorteilhaft bei diesem Verfahren ist, dass die Klassierung den Trennprozess kaum beeinflusst und auch Materialien mit geringen Dichtedifferenzen getrennt werden können. Sortierzentrifugen werden überwiegend in der Kunststoffaufbereitung eingesetzt. Aufgrund der durch den Energieverbrauch vergleichsweise hohen Betriebskosten erscheint ein Einsatz in der Bauschuttaufbereitung nicht sinnvoll.

Bei der Schwimm-Sink-Scheidung wird das zu trennende Gut in ein Trennmedium gegeben, dessen Dichte zwischen den leichtesten und den schwersten Bestandteilen des Aufgabematerials liegt. Die Dichte des Trennfluids, bei der Aufbereitung mineralischer Rohstoffe in der Regel eine wässrige Schwerstoffsuspension, wird in Abhängigkeit vom Aufbereitungsziel festgelegt. Nach Buntenbach [148] sollten bei der Trennung von Bauschutt Trenndichten von $1,4 \text{ g/cm}^3$ und höher realisiert werden.

Entsprechend der eingestellten Dichte des Trennmediums sinken die spezifisch schwereren Körner nach unten, spezifisch leichtere Körner schwimmen auf dem Trennme-

dium. Auf diese Weise können Schwer- und Leichtgut separiert werden. Aufgeschlämmte Feinstpartikel können bei diesem Verfahren mit dem Prozesswasser eine autogene Schwertrübe bilden, deren Dichte mit 1,2 bis 1,4 g/cm³ angegeben wird [148]. Anwendungsbeispiele für Trennaggregate sind Schrägradscheider und Beyer-Leichtstoffscheider [29].

Nach dem Prinzip der Filmschichtsortierung arbeiten Hydrobandabscheider. Hier werden aus Korngemischen Körner mit größerer Dichte durch den Einfluss von Fluidströmungen über eine geneigte Fläche angereichert. Bei Partikeln gleicher Korngröße, jedoch unterschiedlicher Dichte, herrschen zwischen den Partikeln und der Festkörperfläche unterschiedliche Reibungskräfte, die der Schleppkraft der Fluidströmung entgegenwirken. Daraus resultieren unterschiedliche Transportgeschwindigkeiten, die für die Sortierung genutzt werden können.

Neben der Dichte sind auch Korngrößenspektrum, Kornform sowie Oberflächenbeschaffenheit der Körner und der Festkörperfläche sowie die Eigenschaften der Fluidströmung wichtige Einflussfaktoren für den Erfolg der Sortierung. In der Bauschutt-aufbereitung wird mit dem Aquamator das Verfahren der Filmschichtsortierung bereits seit einigen Jahren großtechnisch zur Entfernung von Leichtstoffen umgesetzt [29, 118, 148, 155].

Bei der Aufstromsortierung wird die unterschiedliche Endfallgeschwindigkeit von Partikeln unterschiedlicher Dichte, jedoch mit gleicher Größe in einem kontinuierlich aufsteigendem Fluidstrom genutzt. Da die Endfallgeschwindigkeit korngrößenabhängig ist, sollte die Sortierung innerhalb eines engen Kornspektrums erfolgen, um eine saubere Trennung zu erreichen. Umgesetzt wurde dieses Sortierprinzip beispielsweise im Schnecken-Aufstromklassierer [118, 148]. Petit entwickelte ein Verfahren mit einem schräggerichteten Aufstrom zur Aufbereitung von Bauschutt [29]. Dieses Verfahren wurde auch großtechnisch umgesetzt [156].

Eine Sonderstellung bei den Nassverfahren nimmt die Flotation ein, die ebenfalls aus der Rohstoffaufbereitung stammt. Die Flotation als Sortierverfahren basiert auf den unterschiedlichen Oberflächeneigenschaften der zu trennenden Partikel, ihrer Benetzbarkeit. Für das Aufbereiten der Körnerkollektive ist das selektive Ankoppeln der Körner an eingeleitete Gasblasen, in der Regel Luftblasen, von Bedeutung. Durch die Zugabe entsprechender Hilfsstoffe werden die Kornoberflächen zunächst selektiv hydrophobiert, es bilden sich Korn-Blase-Aggregate, die zur Trübeoberfläche aufsteigen und als feststoffbeladener Schaum getrennt abgezogen werden können [131]. In der Aufbereitung von Bauschutt ist die Flotation aufgrund der mit diesem Verfahren verbundenen Kosten nicht von Bedeutung [151].

Ein vielfach angewendetes Sortierverfahren ist die Dichtentrennung von körnigen Stoffgemischen mittels Setztechnik. Dieses Sortierverfahren wird im nachfolgenden Kapitel 2.4 näher erläutert.

2.4 Setzmaschinenteknik

2.4.1 Grundlagen der Setztechnik

Die Setztechnik ist das älteste bekannte Verfahren zur Trennung von körnigen Stoffgemischen nach ihrer Dichte. Sie wurde erstmals 1556 von Agricola als Verfahren zur Erzgewinnung beschrieben und ist seitdem fester Bestandteil der Aufbereitungstechnik von mineralischen Rohstoffen [157, 158]. Heutzutage werden Setzmaschinen in der industriellen Aufbereitung von Kohle, Eisenerz und anderen Rohstoffen und zunehmend auch im Recycling von Wertstoffen eingesetzt [159-162]. In den letzten Jahren hat die Setztechnik wieder an Bedeutung gewonnen. Ursache hierfür sind zum einen die steigenden Kosten für andere Aufbereitungsverfahren wie die Flotation, die auf den Einsatz von Reagenzien angewiesen ist. Zudem ist die Nutzung der Setztechnik vergleichsweise unkompliziert und mit relativ geringen Umweltbelastungen verbunden [163].

Als Verfahren zur Dichtentrennung von Korngemischen basiert die Setztechnik auf der unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeit von Körnern unterschiedlicher Dichte in einem Fluid. Im Setzprozess wird ein Körnergemisch durch das von unten pulsierend strömende Fluid aufgelockert. Mit dem aufströmenden Fluid werden die Reibungskräfte zwischen den einzelnen Körnern weitgehend aufgehoben, die Körner heben sich mit dem Fluid und befinden sich in der Schwebe. Diese aufgelockerte Partikelschicht bezeichnet man als Setzbett. Mit dem Abstrom sinken die Körner wieder ab. Entsprechend der Schwerkraft steigen Körner mit spezifisch höherer Dichte dabei langsamer auf und sinken rascher wieder nach unten als gleichgroße Körner mit einer geringeren Dichte. Eine Schichtung des Körnergemisches nach der Dichte ist die Folge.

Obwohl Nasssetzmaschinen seit mehreren Jahrhunderten bei der Aufbereitung von mineralischen Rohstoffen eingesetzt werden, begann man erst Mitte des 20. Jahrhunderts die theoretischen Grundlagen dieser Sortiertechnik näher zu untersuchen [131, 164]. Aufgrund der Vielschichtigkeit der Einflussfaktoren auf den Sortiervorgang sind die einzelnen Vorgänge innerhalb des Setzprozesses noch nicht eindeutig geklärt [29, 131].



Abbildung 2.4: Handsetzarbeit mit Stauchsieben in der Erzaufbereitung im 16. Jahrhundert [157]

Mayer fand 1950 mit der Theorie der unterschiedlichen Energiepotentiale zwischen aufbereitetem und unaufbereitetem Zustand eine anschauliche Erklärung für den Schichtungsvorgang [164]. Durch Zuführung einer externen Energie, in einem Setzbett durch den Impuls von aufströmendem Wasser, werden die Reibungskräfte innerhalb eines Gemisches von Körnern unterschiedlicher Dichte aufgehoben. Auf der Basis des unterschiedlichen Schwerkraftpotentials der einzelnen Körner sinken die dichteren Körner schneller nach unten, die leichteren Körner weichen nach oben aus. Die (Hub-)Energie, die zuvor notwendig war, um die schwereren Körner innerhalb des Körnergemisches nach oben zu heben, wird frei. Hierdurch wird das Energiepotential der Körnermischung verringert und der Gesamtschwerpunkt des Gemisches verlagert sich nach unten. Durch die Wiederholung dieses Vorgangs verschiebt sich der Gesamtschwerpunkt weiter nach unten, seine potenzielle Energie wird weiter verringert. Die Trennschärfe erhöht sich. Dieses natürliche Bestreben von Stoffen, einen energetisch günstigeren Zustand zu erreichen, wird während der Anwendung der Setztechnik zur Sortierung genutzt.

Das Verhalten einzelner Körner unterschiedlicher Dichte und Größe im Setzbett kann näherungsweise auch über die Berechnung ihrer Sinkgeschwindigkeit beschrieben werden. Als Voraussetzungen werden die Kornformen der Partikel als ideale Kugeln und Wasser als Fluid angenommen. Weiterhin wird – in Anlehnung an Betonbrechsand – von Dichten zwischen $1,6 \text{ g/cm}^3$ (Zementstein) und $2,65 \text{ g/cm}^3$ (Quarz oder Granit)

ausgegangen. Schon bei der Sedimentation im ruhenden Fluid würden nach dem Gleichfälligkeitsprinzip vollständig aufgeschlossene Natursteinkörner einer Größe von 2,0 mm und einer Dichte von 2,65 g/cm³ ebenso schnell sedimentieren wie noch nicht aufgeschlossene Betonkörner mit einem Durchmesser von 2,7 mm und einer Dichte von 2,2 g/cm³. Eine Kugel aus Zementstein müsste demgegenüber einen Durchmesser von > 4,0 mm aufweisen um die gleiche Sinkgeschwindigkeit zu erreichen. In der Regel sind Zementsteinpartikel jedoch kleiner als Körner, die vollständig oder überwiegend aus Naturstein bestehen. Daher käme es schon bei der Sedimentation im ruhenden Fluid zu einer Schichtung des Materials nach der Dichte (siehe Anhang 1). Durch die Pulsation des Fluids werden diese Trenneffekte noch verstärkt, da der Sedimentationsvorgang mit der Wiederholung des Impulses vervielfacht und die Schichtung des Materials nach der Dichte intensiviert wird.

2.4.2 Setzmaschinenaufbau

Setzmaschinen bestehen aus einem Setzfass, in dem sich ein geeigneter Setzgutträger befindet, einer Einrichtung zur Pulsation des Fluids sowie Austragsvorrichtungen für die Produkte Schwergut und Leichtgut und gegebenenfalls das Fassgut. Der Grundaufbau einer Nass- oder Hydrosetzmaschine ist in Abbildung 2.5 dargestellt.

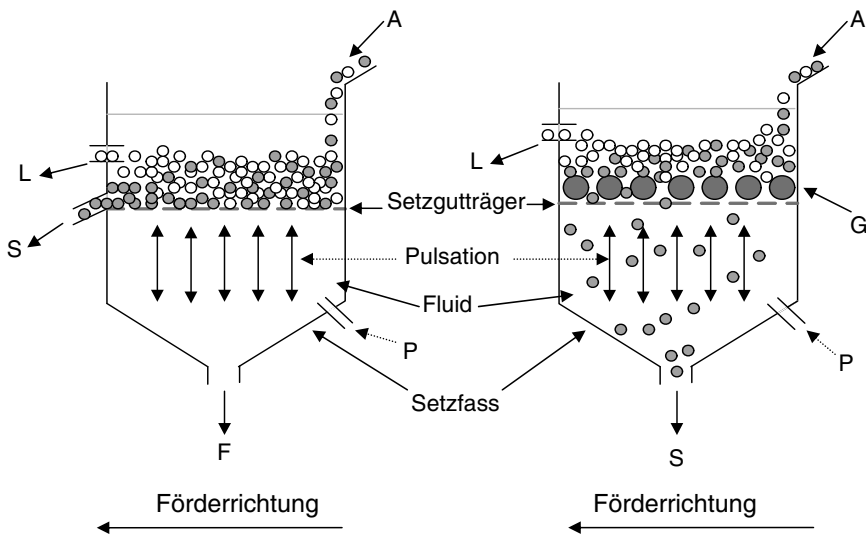


Abbildung 2.5: Grundaufbau einer Setzmaschine ohne Graupenbett (links) und mit Graupenbett (rechts)

A: Aufgabematerial
L: Leichtgut
S: Schwergut

F: Fassgut
P: Prozesswasser
G: Graupenbett

Das zu sortierende Gut (A) wird auf einen Setzgutträger aufgegeben, der sich in einem Setzfass befindet. Der Setzgutträger ist wie ein Sieb mit Öffnungen versehen, durch die ein Fluid pulsierend auf und ab strömt. Diese Bewegung des Fluids kann durch die Bewegung des Setzgutträgers oder durch die mechanische oder pneumatische Bewegung des Fluids erzeugt werden. Das Körnergemisch, das sich durch die Pulsation während des Anlagendurchlaufs geschichtet hat, tritt nach Durchlaufen der Setzmaschine durch die dafür vorgesehenen Austragsvorrichtungen aus der Anlage aus. Infolge seiner geringeren Dichte ist für den Austrag des in der oberen Schicht des Setzbettes angereicherten Leichtgutes (L) oftmals eine Überlaufeinrichtung, z.B. ein Wehr, vorgesehen. Für den Austrag des Produkts Schwergut (S) können verschiedene Austragsvorrichtungen eingesetzt werden. In Abhängigkeit von der Korngröße kann die Austragsvorrichtung als Schwenkbett, Bodenschieberaustrag oder für feine Körnungen auch als Zellenradschleuse ausgelegt werden.

Für das Setzen von feinkörnigen Gemischen können auch Setzmaschinen mit einem sogenannten Graupenbett (siehe Abbildung 2.5) eingesetzt werden. In diesen Setzmaschinen liegt auf dem Setzgutträger eine Schicht aus grobkörnigem Schwergut, das Graupenbett. Durch die Pulsation gelangt das feinkörnige Schwergut durch das Graupenbett in das Setzfass und kann von dort durch eine entsprechende Auslassvorrichtung ausgetragen werden. Dieser Vorgang wird als „Durchsetzen“ bezeichnet.

Neben der Nasssetzsortierung wurden auch Luftsetzmaschinen entwickelt, die mit Luft als Fluid arbeiten. Aufgrund der wesentlich geringeren Dichte von Luft gegenüber Wasser ist für die Funktionsfähigkeit einer Luftsetzmaschine ein wesentlich höherer Dichteunterschied der zu trennenden Komponenten notwendig als bei Hydrosetzmaschinen (siehe Gl.2.1, Punkt 2.4.5). Zusätzlich ist für die Aufbereitung von Korngemischen durch Luftsetzen ein engeres Kornband erforderlich [165]. Daher sind Luftsetzmaschinen für die bei der Bauschutttaufbereitung durchzuführende Setzarbeit nicht geeignet.

2.4.3 Setzmaschinentypen

Zur Erzeugung des pulsierenden Fluidstroms bestehen zwei grundsätzliche Möglichkeiten:

- die mechanische Bewegung des Setzgutträgers bzw. des Wasserkastens oder
- die Bewegung des Wasserstroms, wobei hier wiederum zwischen den Arten des Antriebs für die Hubbewegungen des Wassers unterschieden wird (mechanisch induzierte oder druckluftgesteuerte Pulsation des Fluids).

In Abhängigkeit vom jeweiligen Einsatzgebiet wurden auf der Grundlage dieser beiden Möglichkeiten zur Erzeugung der Pulsation unterschiedliche Setzmaschinentypen

entwickelt, von denen einige nachfolgend kurz beschrieben werden [131, 157, 159, 160, 166-171]:

- **Stauchsetzmaschinen:** Dieser Setzmaschinentyp ist die älteste beschriebene Variante. Beim Betrieb von Stauchsetzmaschinen entsteht die Pulsation durch die mechanische Bewegung mittels Heben und Senken des Setzgutträgers im ruhenden Wasserbad. Ihre Anwendung finden Stauchsetzmaschinen heute hauptsächlich in der Steinkohleaufbereitung für die Bergevorabscheidung aus der Rohstückkohle. Es sind Aufgaberaten bis zu 400 t/h möglich. Ein Vorteil dieses Setzverfahrens ist der geringere Wasserverbrauch durch den Entfall von Transportwasser.
- **Membransetzmaschinen:** Das Setzfass dieses Setzmaschinentyps besteht aus zwei Teilen. Der obere Teil des Setzfasses, in dem sich der Setzgutträger befindet, ist starr, jedoch durch elastische Membranen mit dem unteren Teil verbunden. Der untere Teil kann durch einen Mechanismus rhythmisch gehoben und gesenkt werden. Diese mechanisch erzeugten Schwingungen werden über die Membran in den oberen Teil des Setzfasses übertragen und bewirken dadurch die pulsierende Durchströmung von Setzgutträger und Setzgut.
- **Schwingsetzmaschinen:** Bei der Schwingsetzmaschine befindet sich unter dem Setzkasten mit dem Setzgutträger ein Schwingkasten mit einem Exzenterantrieb. Dieser versetzt das Fluid im Setzkasten in harmonische Schwingungen. Schwingsetzmaschinen werden in der Aufbereitung von Sanden und Kiesen und mittlerweile auch in der Bauschuttauflbereitung eingesetzt. Dieser Setzmaschinentyp kann als Membran-Schwingsetzmaschine oder als Kompensator-Schwingsetzmaschine ausgeführt werden.

Membran-Schwingsetzmaschinen können für Durchsätze bis ca. 225 t/h eingesetzt werden, der Prozesswasserbedarf beträgt bei dieser Aufgabemenge ca. 400 m³/h. Kompensator-Schwingsetzmaschinen sind eine Weiterentwicklung der Membran-Schwingsetzmaschinen. Wesentliches Unterscheidungsmerkmal ist der Einsatz von Kompensatoren statt Membranen zur Setzhubkompensation. Dies ermöglicht eine Steigerung der Hubhöhen und damit auch höhere Durchsatzraten von bis zu 270 t/h.

- **Luftgepulste Setzmaschinen** werden grundsätzlich in seitengepulste und unterbettgepulste Setzmaschinen unterschieden.

Zu den unterbettgepulsten Setzmaschinen zählen auch die BATAc-Setzmaschinen. Bei diesem Setzmaschinentyp wird die Pulsation des Fluids durch unter dem Setzgutträger angebrachte Luftkammern erzeugt. BATAc-Setzmaschinen werden vor allem in der Steinkohleaufbereitung eingesetzt. Sie können mit Aufgaberaten bis zu 700 t/h beschickt werden.

Seitengepulste Setzmaschinen gehören zu den nach ihrem Entwickler benannten Baum'schen Setzmaschinen. Neben dem Setzfass, in dem ein unbeweglicher Setz-

gutträger befestigt ist, befindet sich in Transportrichtung eine Luft- bzw. Puls-kammer, die mit dem Setzfass verbunden ist. Mittels Druckluftzufuhr wird der Wasser-spiegel in der Luftkammer pneumatisch gepulst (siehe Abbildung 2.6). Dieser Setz-maschinentyp wird auch großtechnisch in der Bauschutt-aufbereitung eingesetzt. Bei einem Durchsatz von 100-120 t/h liegt der Prozesswasserbedarf bei ca. 320 m³/h. Mit dieser Anlagentechnik können Durchsätze bis 700 t/h erzielt werden.

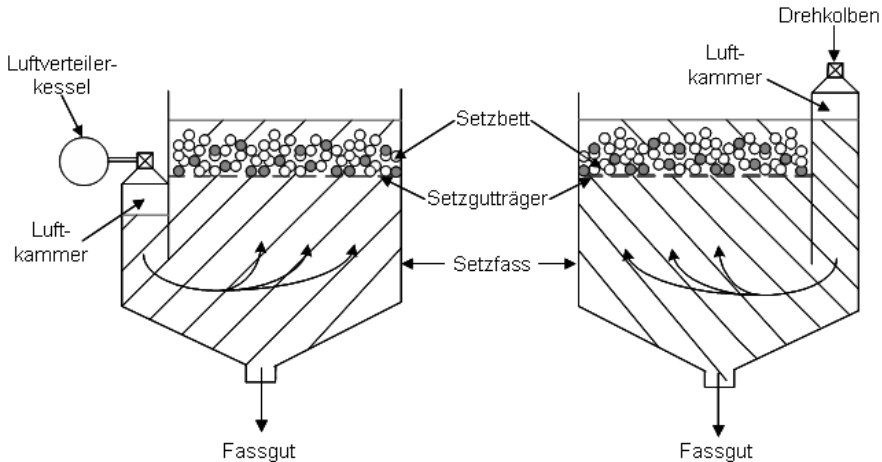


Abbildung 2.6: Luftgepulste Setzmaschinen: unterbettgepulste (links) und seitengepulste Setzmaschine (rechts)

Für verschiedene spezielle Einsatzgebiete sind noch weitere Setzmaschinentypen entwickelt worden. Eine neuere Entwicklung ist die Vertikalsetzmaschine, die für die Aufbereitung von Schlacken geeignet ist. In diesem Setzmaschinentyp wird das Setz-gut im pulsierenden Gegenstromwasser sortiert. Das Leichtgut wird mit dem Gegen-stromwasser ausgetragen. Für die Sortierung von sehr feinkörnigen Rohstoffen bis zu 20 µm wurde die Karussellsetzmaschine entworfen. Bei diesem Typ wird Setz-gut in einem rotierenden Ringtrog mit dem Setzgutträger als Boden über ortsfeste Setz-kammern transportiert und über ein Graupenbett ausgetragen. In den Setzkammern erfolgt die Pulsation über Kolbenantrieb. Aus wirtschaftlichen Gründen wurde das Verfahren nicht weiterverfolgt.

2.4.4 Betriebsparameter von Setzmaschinen

Die Steuerung des Setzprozesses in einer Setzmaschine kann über verschiedene Parameter erfolgen. Welche Steuerungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen, ist vom eingesetzten Setzmaschinentyp und der vom Hersteller installierten Anlagentechnik abhängig. Die Einstellungen für den Betrieb der Setzmaschine müssen dabei auf das jeweilige Setzgut abgestimmt werden. Wichtigste Kenngrößen sind hierbei das Korn-

größenspektrum und die Dichte des aufgegebenen Korngemisches. Einsetzbare Steuerungsparameter für den Setzprozess listet Tabelle 2.1 [131, 170]:

Tabelle 2.1: Betriebsparameter von Setzmaschinen

| Steuerungsparameter | Variationsmöglichkeiten/ Erläuterung |
|-------------------------------------|---|
| Setzbethöhe | abhängig von der Korngrößenverteilung des Aufgabematerials: 4 bis 200 mm (ansteigend mit Zunahme der Korngröße) |
| Setzfrequenz / Hubzahl | abhängig von Korngrößenverteilung und Dichte des Aufgabematerials: 55 bis 350 Hub/min (bei gleicher Dichte und unterschiedlicher Korngröße, ansteigend mit Abnahme der Korngröße) |
| Hubhöhe | abhängig von der Korngrößenverteilung des Aufgabematerials: 10 – 80 mm (ansteigend mit zunehmender Korngröße) |
| Pulsationsverlauf / Setzhubdiagramm | sinusförmige Pulsation, Pulsation mit verlangsamtem Abstrom oder Pulsation mit verzögertem Abstrom |
| Austragsvorrichtung | Bodenschieberaustrag, Schwenkbett, Wehr oder Zellenradschleuse |
| Neigung des Setzbettes | abhängig vom Setzmaschinentyp |
| Verweilzeit | abhängig vom Setzmaschinentyp und dem Durchsatz |

Für den Setzprozess sind auch die physikalischen Eigenschaften des eingesetzten Fluids wie Dichte und Viskosität von Bedeutung. In Nasssetzmaschinen wird aus Kostengründen überwiegend Wasser als Fluid eingesetzt, der Setzvorgang ist jedoch auch mit anderen Fluiden möglich. Die unter Punkt 2.3.3 beschriebene Ausbildung einer autogenen Schwertrübe ist auch beim Betrieb von Setzmaschinen möglich. Die durch die Anreicherung von aufgeschlämmten Feinstpartikeln bewirkte Erhöhung der Dichte des Fluids ist dabei abhängig von der Führung und der Aufbereitung des Prozesswassers.

2.4.5 Beeinflussung des Setzvorgangs durch das Aufgabegut

Der Setzprozess wird maßgeblich von den Eigenschaften der zu trennenden Komponenten des Setzgutes bestimmt. Einen entscheidenden Einfluss auf den Sortiererfolg haben die Dichtedifferenzen des zu trennenden Gemisches. Es gilt: je größer die Dichtedifferenz der Komponenten, desto größer ist der Sortiererfolg [109]. Übersichtlich kann nach A. F. Taggart, zitiert nach Schubert [131], folgender Quotient q für eine Bewertung der Sortierbarkeit herangezogen werden:

$$q = \frac{\rho_S - \rho_F}{\rho_L - \rho_F} \quad \text{Gl. 2.1}$$

- mit q = Quotient als Kenngröße für die Sortierbarkeit
 ρ_S = Dichte der spezifisch schweren Komponente
 ρ_L = Dichte der spezifisch leichten Komponente
 ρ_F = Dichte des Fluids

Für das Setzen in Wasser wird dort folgende Bewertung vorgenommen:

- $q > 2,5$: Trennung bis zu Korngrößen von etwa 100 μm herab möglich
- $q > 1,75$: Trennung bis zu 200 μm herab möglich
- $q > 1,5$: Trennung bis zu 1,5 mm herab möglich, aber schwierig
- $q > 1,25$: Trennung bei noch größerem Gut mit mäßigem Erfolg möglich
- $q < 1,25$: durch Setzen keine Trennung möglich

Das Verhalten der einzelnen Körner wird jedoch nicht nur von der Dichte, sondern auch von anderen Faktoren beeinflusst. Wichtige Einflussfaktoren sind Korngrößenverteilung und mittlere Korngröße [131]. Diese bestimmen die Lockerungsgeschwindigkeit des Setzvorganges. Je feinkörniger das Aufgabegut ist, desto geringer ist die Auflockerungsfähigkeit des Setzbettes bzw. desto niedriger ist die Lockerungsgeschwindigkeit.

Der Dichtetrennung sind – in Abhängigkeit von den zu trennenden Stoffen – durch zu weite Korngrößenbereiche Grenzen gesetzt. Es bestehen darüber, wie breit der gemeinsam zu bearbeitende Korngrößenbereich sein darf, keine einheitlichen Auffassungen [131]. Unstrittig ist hingegen, dass die Trennung von monodispersen Gemischen am erfolgreichsten verläuft. Grundsätzlich gilt, dass der Trennerfolg sich dann verbessert, wenn Korngröße und -form der zu trennenden Partikel dicht beieinander liegen [109]. Sicher ist weiterhin, dass das Verhältnis Größtkorn/Untere Korngröße beim Nasssetzen größer sein darf als beim Setzvorgang mit Luft als Fluid (siehe Gleichung 2.1).

Neben den Dichtedifferenzen und den Korngrößenspektren haben noch andere Parameter des Trenngutes Einfluss auf den Setzprozess. Die Kornform kann den Setzprozess ebenfalls signifikant beeinflussen. Plattige Körner setzen sich infolge des Auftriebswiderstandes langsamer als rundliche Körner [131]. Porosität und Rauigkeit der Kornoberfläche erhöhen den Auftriebswiderstand und haben daher ebenfalls einen maßgeblichen Einfluss auf das Setzverhalten der einzelnen Körner [164].

Infolge der zuvor aufgeführten Eigenschaften der aufzubereitenden Korngemische kann es in Abhängigkeit vom Aufgabegut (und den Einstellungen der Setzmaschine) zu

Klassiereffekten während des Setzprozesses kommen. Ungünstigstenfalls können diese Klassiereffekte auch die Sortierung überlagern.

Bei der Aufbereitung von Altbeton hat der Einsatz der Setztechnik zusätzlich zur Sortierung des Aufgabematerials in Schwergut und Leichtgut noch weitere positive Effekte. Mit den Bewegungen des Setzbettes kommt es auch zu Reibungseffekten zwischen den einzelnen Körnern. Durch die dadurch hervorgerufene Abrasion kann zusätzlich Zementstein abgerieben und mit dem Fassgut oder dem Leichtgut aus dem Materialhauptstrom abgetrennt werden [168]. Ein weiterer Aspekt der Bauschutttaufbereitung in Setzmaschinen ist – ebenso wie bei anderen Nassaufbereitungsverfahren – die Möglichkeit zur Auswaschung von schädlichen Stoffen aus den Gesteinskörnungen. Eine Stoffstromanalyse eines Bauschutttaufbereitungsprozesses mittels Setzmaschinenteknik ergab, dass sich die Spurenelemente – und damit auch die analysierten Schwermetalle – in der Fraktion 0/4 mm anreicherten [28]. Damit wurde der Schadstoffgehalt in den für die Betonherstellung produzierten Körnungen > 4 mm reduziert.

2.4.6 Setztechnik in der Bauschutttaufbereitung

Die Setztechnik wird großtechnisch schon seit Jahren in der Aufbereitung von Bauschutt eingesetzt [27, 28, 109, 118]. Hauptsächlich werden Splitte > 4 mm aus gemischtem Bauschutt aufbereitet, wobei ausschließlich mit Wasser als Fluid gearbeitet wird. Ziel ist in erster Linie die Abtrennung leichter Störstoffe, die eine deutlich geringere Dichte haben als Beton oder Natursteinkörnung.

In Österreich wird seit mehr als 10 Jahren eine Aufbereitungsanlage mit Setzmaschinenteknik betrieben. Diese Anlage ist für einen Durchsatz von 300.000 t/a bzw. 150 t/h ausgelegt und wird sowohl für die Reinigung von Natursteinmaterialien (ca. 75 % des Aufgabematerials) als auch von Bauschutt (ca. 25 % des Aufgabematerials) eingesetzt. Der gebrochene Bauschutt bzw. Altbeton wird dabei in verschiedenen Verfahrensschritten aufbereitet und mit der Setztechnik in einer seitengepulsten Setzmaschine vor allem von Störstoffen wie Holzurückständen, Dämm- und Dichtungsmaterialien und anderen Leichtstoffen befreit [47, 172]. Die Sandfraktion < 4 mm aus der Bauschutttaufbereitung wird zusammen mit dem Fassgut erfasst und ausgelesen. Im Rahmen dieser Arbeit wurden Sandfraktionen aus dieser Anlage in zwei Versuchen als Versuchsmaterial eingesetzt. Eine Gesamtansicht der Aufbereitungsanlage in Österreich zeigt Abbildung 2.7.



Abbildung 2.7: Aufbereitungsanlage für mineralische Rohstoffe und Bauschutt in Hallein, Österreich

Sowohl die aufbereitete Natursteinkörnung als auch der aufbereitete Bauschutt > 4 mm werden als Gesteinskörnung im angrenzenden Betonwerk eingesetzt. In einer Studie wurde gezeigt, dass Betone mit einem Anteil von 40 % rezyklierter Gesteinskörnung aus dieser Anlage und 60 % Natursteinkörnung gute Baustoffprüfungsergebnisse erzielten und in die Festigkeitsklasse C 20/25 eingestuft werden konnten. Diese RC-Betone konnten als Sohlbeton großtechnisch im Tunnelbau eingesetzt werden [173].

Auch in den Niederlanden wird die Bauschuttaufbereitung unter Nutzung der Setzmaschinentechnik großtechnisch betrieben. In einer Anlage in Wilp wird vorgebrochener Bauschutt der Körnung 0/32 mm in einer seitengepulsten Setzmaschine mit einem Durchsatz von rund 120 t/h aufbereitet. Diese Anlage wird ebenfalls vor allem unter dem Gesichtspunkt der Entfernung von leichten Störstoffen betrieben. Ein zusätzlicher Aspekt ist hier die Möglichkeit zur Abtrennung von Ziegelsplitten aus Altbetonkörnungen [174].

In Deutschland wurde in einer Studie die Nassaufbereitung von Bauschutt > 4 mm mittels Setztechnik im großtechnischen Maßstab untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass durch die Aufbereitung durch Dichtentrennung mit der Setzmaschinentechnik eine deutliche Verbesserung der Baustoffeigenschaften der untersuchten Körnungen möglich war. Dies wurde vor allem auf die Entfernung leichter Störstoffe und die damit verbundene Erhöhung der Dichte des Materials zurückgeführt. Als weiterer Vorteil des Aufbereitungsverfahrens wurde die Homogenisierung der

Körnungen genannt. Die Versuche ergaben weiterhin, dass eine Differenzierung des Korngemischs in die Körnungen 4/10 mm und 10/32 mm sinnvoll ist, um zwei homogenere (beton- und ziegelangereicherte) RC-Baustoffe zu erhalten [175].

2.5 Grundlagen der Bilanzierung von Prozessen und Produkten

Um ein Unternehmen, einen Prozess oder ein Produkt im Umweltbereich in Hinblick auf eine spätere Realisierung zu bewerten, müssen drei Hauptkriterien untersucht und bewertet werden:

- die Möglichkeiten zur technischen Umsetzung,
- die ökologischen Auswirkungen der Realisierung und
- der wirtschaftliche Nutzen der Realisierung.

Bei der Entscheidung für oder gegen die Realisierung eines Produktsystems wird in der Regel versucht, ein Optimum im jeweiligen Entscheidungsdreieck Technik-Kosten-Umwelt zu finden [176, 177]. In Abhängigkeit vom jeweiligen Einzelfall können diese Punkte dabei unterschiedlich gewichtet werden. In der vorliegenden Arbeit wurde der Schwerpunkt der Untersuchung auf die technische Umsetzung der Nassaufbereitung von Betonbrechsand in Hinblick auf die Gewinnung einer in der Baustoffproduktion einsetzbaren Gesteinskörnung gelegt (Kapitel 3 und 4). Ergänzend wurden eine ökobilanzielle Bewertung und eine ökonomische Bewertung des Aufbereitungsverfahrens durchgeführt.

2.5.1 Ökobilanzielle Bewertung

Für Recyclingprodukte, deren Herstellung letztendlich dem Umweltschutz dienen soll, ist die möglichst vollständige Untersuchung und Bewertung der ökologischen Auswirkungen ihrer Lebenszyklen von besonderer Bedeutung [177]. Zur Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und ihren Herstellungsprozessen wurden in den vergangenen Jahren verschiedene Modelle entwickelt [28, 57, 176, 178, 179]. So wurden in vereinfachten Ansätzen z.B. Stoffstromanalysen zur Abschätzung von Schadstoffakkumulationen im Verlauf von Aufbereitungsprozessen herangezogen [28]. Umfangreichere Ansätze bezogen auch sozial relevante Auswirkungen in die Bewertung mit ein [179]. Zur gleichzeitigen bzw. kombinierten Beurteilung von ökologischen und ökonomischen Aspekten von Produktionsprozessen wurde die Ökoeffizienzanalyse entwickelt [180].

Als wichtigstes Instrument für die Bewertung ökologischer Auswirkungen von Produkten und Prozessen gilt die Ökobilanzierung. Diese soll mittels einer wissenschaftlich und methodisch nachvollziehbaren Analyse die ökologischen Auswirkungen eines Produktes oder Prozesses darstellen. Dadurch wird eine vergleichende Bewertung von Verfahren und Produkten, die in diesem Zusammenhang als funktionelle Einheiten bezeichnet werden, ermöglicht. Der Begriff Ökobilanz wurde 1978 in einer Studie der

Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt St. Gallen (EMPA) eingeführt. In dieser Ökobilanz wurden erstmals neben dem Energie- und Rohstoffverbrauch auch anfallende Reststoffe und Schadstoffemissionen berücksichtigt [176, 181].

Die methodische Untersuchung der Lebenszyklen von Produkten im Rahmen einer Ökobilanzierung umfasst die ganzheitliche Betrachtung von Umweltauswirkungen in der gesamten Kette der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes [182]. Als Grundlage für eine Bewertung können daher neben dem Energieverbrauch und den damit verbundenen Emissionen in Abhängigkeit vom jeweiligen Produkt oder Prozess auch die Toxizität der Inhaltsstoffe, der Wasserverbrauch bzw. die Abwasserentstehung, Ressourcen- und Landschaftsverbrauch etc. dienen.

Seit dem Jahr 1997 sind die Prinzipien und allgemeinen Anforderungen an Ökobilanzen in Bezug auf eine funktionelle Einheit (Produkt oder Service) mit einer Europäischen Norm und ergänzenden deutschen Normen, die in den Jahren 1998 bis 2000 veröffentlicht wurden, festgelegt [183-185]. Der Rahmen einer Ökobilanz umfasst nach diesen Vorgaben die Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen (EN ISO 14040), die Erstellung einer Sachbilanz (EN ISO 14041), die Wirkungsabschätzung (EN ISO 14042) und die Auswertung der Ergebnisse (EN ISO 14043). Die jeweiligen Bearbeitungsschritte können dabei nicht separat durchgeführt werden, sondern beeinflussen sich gegenseitig. Die Wechselwirkungen zwischen den Teilen einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 sind nachfolgend schematisch dargestellt (Abbildung 2.8).

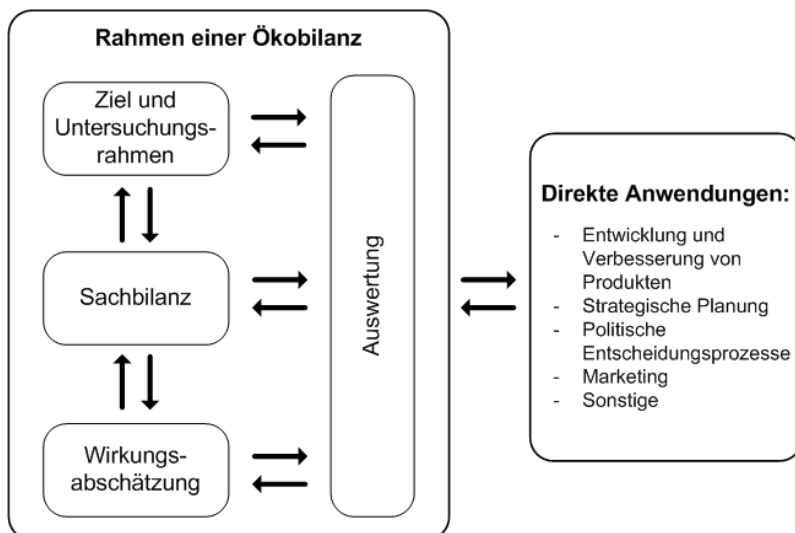


Abbildung 2.8: Bestandteile einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 [176, 186]

Ziel- und Untersuchungsrahmen

Zur Erstellung einer Ökobilanz nach EN ISO 14040 müssen zunächst Ziel- und Untersuchungsrahmen des zu bewertenden Produktes oder Prozesses explizit festgelegt werden, um so den Geltungs- und Wirkungsbereich der ökologischen Bewertung eindeutig abzugrenzen. Die räumlichen und zeitlichen Systemgrenzen müssen hierzu festgelegt werden. Auf diese Weise kann die funktionelle Einheit definiert werden.

Die Systemgrenzen sind wiederum abhängig vom Ziel der Untersuchung, von der Verfügbarkeit der Daten, vom zeitlichen Rahmen und auch von den für die Erstellung der Ökobilanz zur Verfügung stehenden finanziellen Ressourcen. In Zusammenhang mit der Festlegung des Ziel- und Untersuchungsrahmens ist auch die Qualität der verwendeten Daten in Bezug auf Plausibilität und Vollständigkeit zu überprüfen. Dies ist vor allem für die Nachvollziehbarkeit und die Interpretation der Daten im Rahmen der späteren Auswertung von Bedeutung [186].

Sachbilanzierung

Sachbilanzen umfassen Datensammlungen und Berechnungsverfahren zur Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems [176, 186]. Zu den Inputflüssen zählen beispielsweise der Verbrauch von Ressourcen, Energie und sonstigen Betriebsmitteln. Outputflüsse sind das produzierte Gut sowie entstehende Reststoffe und Emissionen.

Für die Erstellung einer Sachbilanz ist es von besonderer Bedeutung, dass der jeweilige Ziel- und Untersuchungsrahmen genau abgesteckt wurde. Sämtliche Stoffströme, die sich innerhalb dieser Systemgrenze bewegen, müssen im Rahmen der Sachbilanzierung erfasst werden. Diese Daten bilden wiederum die Grundlage für die Wirkungsabschätzung [183-185].

Im Rahmen einer Sachbilanzierung sollten Daten nach Möglichkeit nicht aus unterschiedlichen Quellen verwendet werden, da die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Datenquelle variieren können [187, 188]. Falls sich die Nutzung verschiedener Quellen nicht vermeiden lässt, so muss die Bilanz schlüssig und durch genaue Quellenangaben auch zu einem späteren Zeitpunkt nachvollziehbar sein.

Wirkungsabschätzung und Wirkungskategorien

Das Ziel der Wirkungsabschätzung in einer Ökobilanz ist die Beurteilung und Bewertung der mit der Sachbilanz festgestellten Umweltwirkungen eines Produktsystems [176, 186]. Hierfür werden einzelne Sachbilanzgrößen mit gleicher Umweltwirkung in Wirkungskategorien zusammengefasst. Bei der Erstellung einer Wirkungsabschätzung wird die in der Regel relativ umfangreiche Datenmenge des Sachbilanzergebnisses auf einige wenige Daten konzentriert [188].

Wichtig für die Auswahl der zu berücksichtigenden Wirkungskategorien ist die Anpassung an das Ziel und den Untersuchungsrahmen der ökobilanziellen Betrachtung [181]. In vielen Studien ist der Energieaufwand von entscheidender Bedeutung. Neben dem Verbrauch zumeist nicht erneuerbarer Energieressourcen liegt hier auch die Quelle für die Entstehung eines Großteils der Emissionen.

In den einzelnen Wirkungskategorien gibt es eine Leitgröße, auf die die einzelnen Parameter umgerechnet und zu einem Wirkungsindikator zusammengefasst werden. Auf diese Weise können einzelne potenzielle Wirkungen auf die Umwelt beschrieben werden. Einzelne Parameter, die auf verschiedene Weise die Umwelt beeinflussen können, werden dabei mehreren Wirkungskategorien zugeordnet. Ein Beispiel hierfür ist Methan (CH_4), das sowohl Auswirkungen auf den Treibhauseffekt als auch auf die Bildung von Sommersmog hat. Tabelle 2.2 zeigt eine Auswahl von Wirkungskategorien und den zugehörigen Leitgrößen, die für die ökologische Bewertung von Baustoffen eingesetzt werden können [181, 189].

Tabelle 2.2: Wirkungskategorien und Leitgrößen für eine ökologische Bewertung

| Wirkungskategorie | Beschreibung | Leitgröße |
|--|---|------------------------|
| Energieverbrauch | Kumulation aller für die Entstehung oder Produktion der funktionellen Einheit aufzuwendenden Energien | KEA/KEV |
| Treibhauswirkung (GWP global warming potential) | Emissionen, die den Wärmehaushalt der Atmosphäre beeinflussen, Treibhauseffekt | CO_2 |
| Versauerungspotential (AP acidification potential) | Emissionen, die eine Versauerung von Böden und Gewässern verursachen | SO_2 |
| Ozonvorläuferpotential (TOPP tropospheric ozone precursor potential) | Emissionen, die die Bildung von Ozon in den unteren Luftschichten bewirken können, Sommersmog | NMVOG* |
| Eutrophierungspotential (NP eutrophication pot.) | Emissionen, die eine Überdüngung von Gewässern bewirken können | PO_4^{3-} |
| Naturraumbeanspruchung | Verbrauch von natürlichen Flächen | m^2 Fläche |

*Non-methane volatile organic compounds = flüchtige organische Kohlenstoffverbindungen ohne Methan

Auf Basis der Berechnung der ökologischen Auswirkungen des Prozesses und deren Zusammenfassung in den einzelnen Wirkungskategorien erfolgt eine Auswertung der

Ergebnisse. Bei der Bewertung von Baustoffen ist das Ziel der ökobilanziellen Bewertungen oftmals der Vergleich der Umweltwirkungen von Baustoffen untereinander oder mit Baustoffen, die aus Sekundärrohstoffen hergestellt wurden. Ein weiteres Ziel des Verfahrens kann das Erkennen von Produkt- oder Prozessschwachstellen sein.

Ökobilanzielle Bewertungen des Baustoffrecycling

Lauritzen stellte bereits 1994 fest, dass das Bauschuttrecycling den Verbrauch von Energie, natürlichen Rohstoffen und Flächen reduziert und auch ökonomisch von Vorteil ist, schlüsselte jedoch die Berechnungen, auf denen seine Erkenntnisse beruhten, nicht weiter auf [190].

Im Rahmen eines EU-Life-Projektes untersuchen Sára et al. 1999 in einem ersten Ansatz ebenfalls die Wiederverwertung von Bauschutt mittels ökobilanzieller Bewertung. Neben der Reduzierung der Naturraumbeanspruchung durch die Verringerung des benötigten Deponievolumens wurde auch eine deutliche Verminderung von Emissionen durch den Wiedereinsatz von händisch aussortierten, intakten Ziegeln berechnet [191].

In den Jahren 1996 bis 1999 wurden in einem weiteren EU-Projekt unter anderem die ökologischen Aspekte des Einsatzes der Sandfraktion aus dem Bauschuttrecycling für die Herstellung von Zementklinker untersucht. Für den Einsatz der zementsteinreichen Sandfraktionen als Substitut für natürliche Rohstoffe konnten eine Verringerung von Emissionen und die Einsparung von Landschaftsverbrauch aufgezeigt werden [68].

Die detaillierten Untersuchungsergebnisse von Craighill und Powell [179, 192] wurden 1999 veröffentlicht. In ihren Analysen kamen die beiden Autorinnen u. a. zu dem Schluss, dass die Verwendung von aufbereitetem Bauschutt ökologisch vorteilhafter ist als der Einsatz der untersuchten mineralischen Primärrohstoffe. Zu einem eventuellen Qualitätsverlust des aufbereiteten Baustoffs wurde jedoch nicht Stellung genommen.

Gallenkemper et al. bewerteten 2004 den Ersatz von Kalkstein durch einen aufbereiteten RC-Baustoff in Anlehnung an die DIN EN-ISO Normen 14040-14043 ökobilanziell [187, 188]. Als funktionelle Einheit wurde 1 m³ verdichtetes Material einer Tragschicht ohne Bindemittel festgelegt. In verschiedenen Szenarien wurde ausschließlich trocken aufbereiteter RC-Baustoff im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen bewertet. Auf der Basis der Grundlagendatenbank des Globalen Emissionsmodells Integrierter Systeme (Gemis), stellte sich das RC-Baustoff-Szenario als ökologisch vorteilhafter dar. Die Nutzung der Datenbank der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) führte zu dem Ergebnis, dass die Verwertung der natürlichen Ressource Kalkstein zu einer geringeren Erhöhung des Treibhauseffektes führte. Als Haupteinflussgröße wurden neben der Materialbereitstellung vor allem auch die Transportstrecken identifiziert.

Weil et al. führten die ökobilanzielle Bewertung von RC-Beton im Vergleich zu Referenzbetonen durch. Als funktionelle Einheit wurde 1 m³ Beton mit und ohne rezyklierte Gesteinskörnung bewertet. Neben der Reduzierung des Verbrauchs an mineralischen Primärrohstoffen wurden als Leitindikatoren der kumulierte Energieaufwand (KEA) und das Treibhauspotential (GWP) bewertet. Bei Berücksichtigung eines höheren Zementverbrauchs aufgrund geringerer Festigkeiten beim Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen wurden Erhöhungen von KEA und GWP ermittelt. Als entscheidende Größen wurden wiederum die einzubeziehenden Transportentfernungen sowie der für die Zementherstellung erforderliche Energieaufwand identifiziert [193-195].

2.5.2 Ökonomische Bewertung

Die Umsetzung eines technisch machbaren und ökologisch sinnvollen Recyclingprozesses in eine industriell betriebene Aufbereitungsanlage wird nur dann erfolgen, wenn dies auch wirtschaftlich erfolgversprechend ist. Hierzu muss eine ökonomische Bewertung des untersuchten Verfahrens oder Produktes durchgeführt werden. Bei der Bewertung eines RC-Baustoffes im Sinne einer Kostenrechnung wird der monetäre Herstellungsaufwand abgeschätzt. Ökobilanzielle und ökonomische Bewertung sollten dabei systematisch aufeinander abgestimmt sein [196].

Die ökonomische Bewertung der Herstellung eines Produktes sollte anhand des Entwurfs einer Produktionsanlage erfolgen. Hierzu muss diese Anlage, die für den vorgesehenen Durchsatz geeignet ist, zunächst konzipiert und die Investitionskosten kalkuliert werden. Auf der Basis des Anlagenentwurfs können die Betriebskosten für die Herstellung des Recyclingproduktes abgeschätzt werden. Über den sich aus den Kosten ergebenden Preis für die Aufbereitung einer Tonne Betonbrechsand als RC-Gesteinskörnung für die Betonproduktion kann unter Berücksichtigung sonstiger Kosten und Erlöse – wie z.B. Entsorgungskosten oder Annahmgebühren und gegebenenfalls eingesparte Transportkosten – die ökonomische Bewertung des Recyclingprozesses erfolgen.

Parallel zur Kostenrechnung sind Untersuchungen zur Marktfähigkeit des Produkts notwendig. In einer Marktanalyse ist zu ermitteln, ob und zu welchem Preis das Produkt mit den dazugehörigen technischen Eigenschaften am vorgesehenen Standort verkauft werden kann [197]. Nur wenn dieser Preis die Kosten der Aufbereitung übersteigt, können Produkt oder Verfahren wirtschaftlich erfolgversprechend sein. Als weiterer entscheidender Faktor ist in diesem Zusammenhang die notwendige Akzeptanz für RC-Produkte zu nennen. Auch gute, preislich vorteilhafte RC-Produkte können nur dann auf dem Markt bestehen, wenn die Vorbehalte gegenüber wiederverwerteten Materialien weiter abgebaut werden.

3. Material und Methoden

3.1 Versuchsserien - Ausgangsmaterialien

Alle untersuchten Betonbrechsande entstammten aus selektiv gewonnenem Abbruchmaterial. Insgesamt wurden fünf Versuchsserien durchgeführt. Die Versuchsserie mit dem Betonbrechsand BS umfasste die meisten Versuchsfahrten. Als Vergleichsmaterialien wurden drei weitere Betonbrechsande unterschiedlicher Herkunft, REM, SAL und HAL sowie ein Vorabsiebmaterial, VS, untersucht. Das Vorabsiebmaterial wurde im Rahmen der trockenen Aufbereitung des Materials BS gewonnen und entstammt damit ebenfalls einem selektiven Rückbau.

Die Charakterisierung des Ausgangsmaterials erfolgte in Hinblick auf die wesentlichen bautechnischen Parameter und hinsichtlich der für Bauschutt relevanten Schad- und Störstoffe. Da die Gehalte an Schad- und Störstoffen für die vorliegende Arbeit nicht von vorrangiger Bedeutung sind, wurde ihre Bestimmung an Mischproben der Ausgangsmaterialien vorgenommen. Aufgrund ihrer Gewinnung durch selektiven Rückbau konnte davon ausgegangen werden, dass es sich um vergleichsweise unbelastete Ausgangsmaterialien handelte. Die bautechnischen Parameter wurden dagegen an den Einzelproben ermittelt, die vor jedem einzelnen Versuch dem jeweiligen Ausgangsmaterial entnommen wurden.

Die Analysen der Mischproben bestätigten, dass alle eingesetzten Versuchsmaterialien nur gering belastet waren. Die Ergebnisse erlaubten für alle untersuchten Ausgangsmaterialien eine Zuordnung in die Einbauklasse Z 1.2 (eingeschränkter offener Einbau) oder besser gemäß den Zuordnungswerten der LAGA-Liste für mineralische Abfälle [56]: Lediglich die Leitfähigkeit des Materials HAL A war geringfügig erhöht. Nachfolgend ist in Tabelle 3.1 ein Auszug der Analysenergebnisse der Feststoffuntersuchungen dargestellt. Die Ergebnisse der Eluatanalysen befinden sich im Anhang (Tabelle A 1).

Tabelle 3.1: Ergebnisse der Schadstoffanalysen der Ausgangsmaterialien

| Brech-sand | As | Pb | Cd | Cr _(ges.) | Cu | Hg | Zn | MKW | PAK (EPA) |
|------------|---------|------|------|----------------------|------|------|------|------|--------------|
| | [mg/kg] | | | | | | | | |
| BS A | 28,1 | 11,1 | 0,98 | 32,0 | 15,3 | 0,00 | 40,0 | 15,6 | 2,01 |
| REM A | 6,22 | 12,6 | 1,33 | 18,4 | 22,0 | 0,00 | 80,7 | 64,2 | 1,57 |
| SAL A | 1,11 | 3,82 | 0,76 | 13,7 | 4,99 | 0,00 | 20,6 | 3,88 | 1,06 |
| HAL A | 2,12 | 4,85 | 0,79 | 11,6 | 8,55 | 0,00 | 55,2 | 20,2 | 0,57 |
| Z 1.1 | 30,0 | 200 | 1,00 | 100 | 100 | 1,00 | 300 | 300 | 5,00 |
| Z 1.2 | 50,0 | 300 | 3,00 | 200 | 200 | 3,00 | 500 | 500 | 15,0 |

Eine Übersicht über die für die Herstellung der Brechsande verwendeten Brechertypen sowie ausgewählte baustofftechnische Kennwerte der untersuchten Ausgangskörnungen finden sich in Tabelle 3.2. Die Kennwerte, die als Grundlage für die baustofftechnischen Bewertungen und die Massenbilanzen dienen, wurden als Mittelwerte der Untersuchungen an den vor jedem Versuch genommenen Einzelproben ermittelt. Als Maß für den Zementsteinanteil der nicht kalkstein- oder dolomithaltigen Körnungen wurde der Gehalt an salzsäurelöslichen Bestandteilen (SLB) herangezogen. Entsprechend wurden die salzsäureunlöslichen Rückstände (SUR) als Maß für den Natursteingehalt gewertet. Eine Bestimmung der Wasseraufnahmen (nach 10 Minuten) erfolgte nur für die Materialien, aus denen Mörtel oder Betone hergestellt wurden.

Tabelle 3.2: Daten zu der Herstellung und zu den Eigenschaften der untersuchten Ausgangsmaterialien

| | BS A | VS A | REM A | SAL A | HAL A |
|--|-------|--------------------------------|--------------------|-------|-------|
| Versuchszahl | 125 | 27 | 27 | 6 | 2 |
| Brechertyp für die Erzeugung der Körnung | PB | PB | PB | BB | BB |
| Parameter des Ausgangsmaterials | | | | | |
| Körnung [mm] | 0/4 | 0/5 | 0/5 | 0/4 | 0/4 |
| Körnungsziffer | 2,05 | 2,57 | 3,08 | 2,55 | 2,81 |
| SLB [%] | 21 | 17 | 17,6 | n.a. | n.a. |
| SUR [%] | 79 | 83 | 82,4 | n.a. | n.a. |
| Wasseraufnahme nach 10 Minuten[%] | 7,5 | 7,4 | 5,4 | 5,6 | 4,0 |
| Einordnung nach DIN 4226-100 [13] | Typ I | entfiel wg. Bodenbestandteilen | Typ I + 5% Asphalt | Typ I | Typ I |

Versuchsserie Betonbrechsand BS

Mit dem Ausgangsmaterial BS A wurden 125 Versuche durchgeführt. Der gebrochene Altbeton entstammte einem in den 50er Jahren in Heidenau bei Dresden errichteten Heizkraftwerk. Dieser Betonbrechsand wurde im Rahmen der Arbeiten für das EU-LIFE-Projekt „Recdemo“ hergestellt. Durch Voruntersuchungen [198] war sichergestellt, dass das Material nicht nur nahezu unbelastet von Schadstoffen war, sondern es wurde ebenso ausgeschlossen, dass Bereiche mit Alkalikieselsäureschädigungen im verwendeten Altbeton vorhanden waren. Die Korngrößenverteilung lag nahezu deckungsgleich auf der für ein Größtkorn von 4 mm interpolierten Regelsieblinie B 16. Korngrößenverteilung und Verteilung der Fraktionsanteile des Brechsandes BS A sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Versuchsserie VS

Das Ausgangsmaterial VS A wurde als Vorabsiebmaterial der Körnung 0/5 mm im Rahmen der trockenen Aufbereitung des Materials BS gewonnen. VS A wies nur geringe Fremdstoffe wie Holz oder Keramikpartikel auf. Durch die Herstellung als Vorabsiebmaterial waren in dem Material jedoch Anteile an aufgenommenen Bodenpartikeln mit humosen Bestandteilen vorhanden. Da die meisten Huminstoffe auch salzsäurelöslich sind, beinhaltet der Gehalt an säurelöslichen Bestandteilen dieses Materials auch gelöste Bodenanteile. Die gemessenen SLB-Gehalte aller VS-Materialarten stellen daher nicht nur die gelöste Zementsteinmatrix, sondern auch gelöste Bodenpartikel dar. Aufgrund des höheren mineralischen Anteils von Bodenpartikeln lagen die gemessenen SLB-Gehalte jedoch unter denen des Brechsandes BS. In Abbildung 3.1 sind Korngrößenverteilung und Fraktionsanteile des Materials VS A dargestellt.

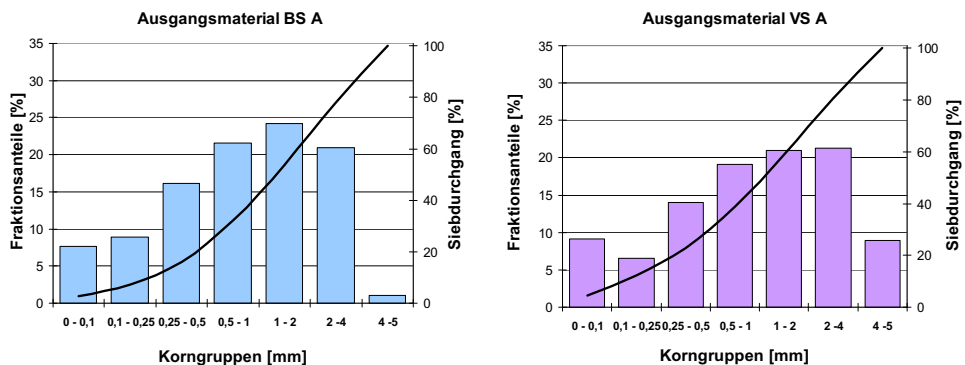


Abbildung 3.1: Korngrößenverteilung und Fraktionsanteile der verschiedenen Korngruppen der Ausgangsmaterialien BS A (links) und VS A (rechts)

Versuchsserie REM

Der Betonbrechsand REM, Körnung 0/5 mm, entstammte dem Rückbau eines Autobahnstückes bei Leipzig. Der Hersteller hatte dem Betonbrechsand einen Anteil von 5 % Asphalt untergemischt. In Abbildung 3.2 sind Korngrößenverteilung und Fraktionsanteile des Betonbrechsandes REM A dargestellt.

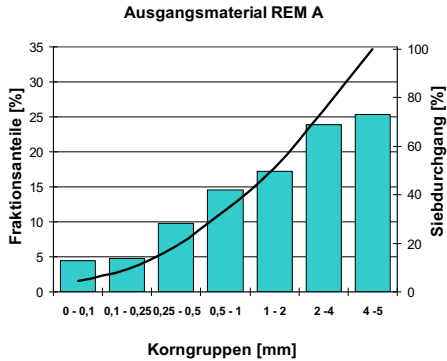


Abbildung 3.2: Korngrößenverteilung und Fraktionsanteile der verschiedenen Korngruppen des Ausgangsmaterials REM A

Versuchsserie SAL

Der Betonbrechsand SAL, Körnung 0/4 mm, stammte aus Österreich. Der Altbeton, aus dem der Brechsand gewonnen wurde, war mit natürlicher Gesteinskörnung aus dem Salzburger Raum hergestellt worden. Diese Region liegt im Bereich der so genannten „Kalkalpen“, einem Gebiet des Jura. Dort gewonnene Gesteinskörnungen enthalten außer Quarz und Feldspat auch Kalkstein sowie typischerweise Dolomit. Da Kalkstein und Dolomit ebenso wie Zementstein salzsäurelöslich sind, konnte die Bestimmung der salzsäurelöslichen Bestandteile nicht als Messgröße für die im Betonbrechsand noch vorhandene Bindemittelmatrix verwendet werden. Die Verteilung der Korngrößenfraktionen ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

Versuchsserie HAL

Auch der Betonbrechsand HAL, Körnung 0/4 mm, stammte aus Österreich. Die im Altbeton verwendete natürliche Gesteinskörnung enthielt ebenfalls salzsäurelösliche Bestandteile, die eine Interpretation des Zementsteinanteils aus den SLB nicht zulassen. Das Material HAL wurde als Fassgut (siehe Kapitel 2.4) nach einer Altbetonaufbereitung mittels Setzmaschinenteknik gewonnen. Entsprechend wurde das Ausgangsmaterial HAL A in den Versuchen für diese Arbeit einer zweiten Dichtentrennung unterzogen. Von dem Material HAL standen nur geringe Mengen zur Verfügung, so dass nur zwei Versuchsfahrten durchgeführt werden konnten. Die Verteilung der Korngrößenfraktionen des Materials HAL A ist in Abbildung 3.3 dargestellt.

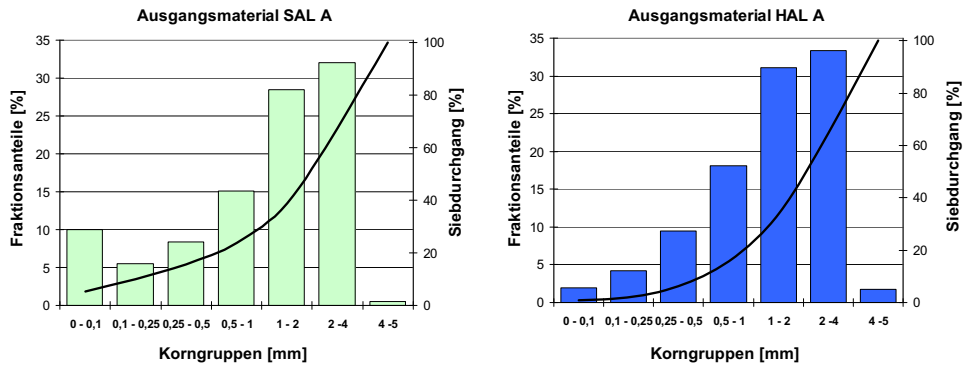


Abbildung 3.3: Korngrößenverteilungen und Fraktionsanteile der verschiedenen Korngruppen der Ausgangsmaterialien SAL A (links) und HAL A (rechts)

3.2 Versuchsanlage zur Mineralstoffaufbereitung

3.2.1 Verfahrenskonzept und Anlagenaufbau

Die Behandlung des Betonbrechsandes erfolgte in der Versuchsanlage zur Nassaufbereitung von Boden und mineralischen Reststoffen der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) in Berlin. Die Anlage im Pilotmaßstab ist für einen Materialdurchsatz von bis zu 1 t/h ausgelegt. Bei den durchgeführten Versuchsserien wurde die Versuchsanlage – in Abhängigkeit von Einsatzmaterial und Anlageneinstellungen – mit einem Durchsatz zwischen 360 und 740 kg Trockensubstanz pro Stunde betrieben.

Ein vereinfachter Ablauf der einzelnen Prozessschritte Aufschluss, Klassierung und Sortierung ist in Abbildung 3.4 dargestellt.

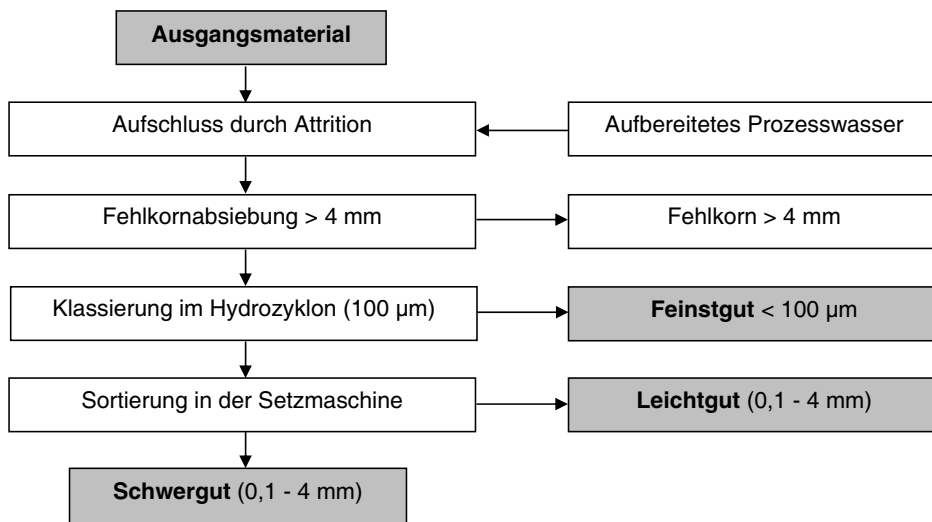


Abbildung 3.4: Verfahrensfliessbild zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand

Das Versuchsmaterial wurde aus einem Silo über ein Becherförderband zum als Aufschlussaggregat eingesetzten Mischer transportiert. Direkt vor der Zugabe in das Aufschlussaggregat wurde Wasser im Verhältnis 3:1 zum Feststoff zugegeben.

3.2.2 Aufschlussaggregat

Im Aufschlussaggregat, einem Mischreaktor R 09 W, Firma Eirich, wurde mechanische Energie eingetragen, um einen Abrieb der anhaftenden Zementmatrix vom Natursteinkorn zu bewirken. In Abbildung 3.7 sind ein Schnitt durch den Eirich-Mischreaktor R09 und der als Rührwerkzeug verwendete Sternwirbler dargestellt.

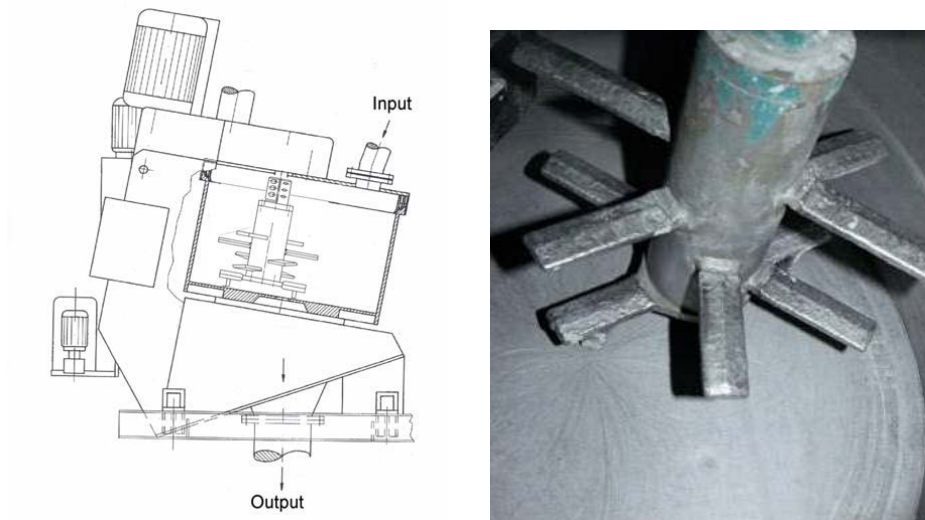


Abbildung 3.5: Schnitt durch den Eirich-Mischreaktor und Detailansicht des Sternwirlers

Der Mischer bestand aus einem drehbaren Mischbehälter, dem sogenannten Teller, und einem rotierenden Mischwerkzeug, dem Wirbler. Der Mischbehälter, bestehend aus einem ebenen Boden und einer zylindrischen Wand, war leicht geneigt angeordnet und rotierte im Uhrzeigersinn wahlweise mit den Geschwindigkeiten $n_T = 20$ oder 40 rpm.

Der eigentliche Aufschluss wurde durch den sich entgegengesetzt zum Teller drehenden, exzentrisch angeordneten Wirbler erzielt. Die Drehzahl des Wirblers konnte stufenlos im Bereich 95 bis 1630 rpm eingestellt werden. Das Fassungsvermögen des Aufschlussaggregates betrug bis zu 150 l. Als Rührwerkzeug wurde in den Versuchsreihen ein Sternwirbler (Abbildung 3.5) eingesetzt. Die Wirkungsweise des Reaktors wurde in unterschiedlichen Einstellungen getestet. Die Intensität des Rührvorgangs durch den Wirbler wurde mit 95, 330, 660 oder 1000 Umdrehungen pro Minute (rpm) eingestellt. Für die gegenläufigen Drehungen des Tellers wurden die beiden möglichen Einstellungsvarianten 20 oder 40 Umdrehungen pro Minute in den Versuchsreihen untersucht.

Der Mischer wurde, in Abhängigkeit vom Füllstand im Mischbehälter, im Batchbetrieb betrieben. Nach Austritt aus dem Aufschlussaggregat wurde verbliebenes Über- bzw. Fehlkorn > 4 mm abgesiebt, der Transport des Materialhauptstroms zum Hydrozyklon erfolgte mittels einer Kreiselpumpe.

3.2.3 Klassierungsstufe

Für die Entfernung von abgeriebener Zementsteinmatrix sowie von bereits im Ausgangsmaterial vorhandenen abschlämmbaren Bestandteilen wurde vor der Dichtentrennung als Klassierungsstufe ein Hydrozyklon, Modell U4BB-90-T233 (Durchsatz max. 6 m³/h mit max. 1m³ Feststoff/h), Fa. Krebs Engineers, in die Anlage integriert. Durch Abscheidung der Partikel < 100 µm wies der Materialhauptstrom ein Kornband von 0,1 bis 4 mm auf.

Zur Abtrennung des im Hydrozyklon erzeugten Feinstgutes aus dem Prozesswasserkreislauf diente eine Entwässerungsstufe. Nach dem Durchgang durch ein Fehlkornsieb (150 µm Maschenweite) wurde das Feinstgut in einem Vorlagebehälter aufgefangen. Aus diesem Behälter wurde kontinuierlich eine Dekanterzentrifuge, Typ DZ 4 ELS (Trommeldurchmesser 420 mm, max. Drehzahl 3.600 rpm), Fa. Siebtechnik, beschickt. Die Abscheidbarkeit der feinen Partikel wurde durch die Zugabe eines nichtionogenen Flockungsmittel auf Basis von Polyacrylamid (P3-ferrocryl[®] 8740, Henkel Surface Technologies, 7 mg/l) und eines kationischen Polyacrylamids (C-494, Cytec Industries Inc., 11 mg/l) erhöht.

Nach der Entwässerung des Feinstgutes in der Dekanterzentrifuge durchlief das abgetrennte Prozesswasser eine Kiesfilteranlage und konnte anschließend dem Prozess wieder zugeführt werden. Der entstandene Schlamm wurde separat aufgefangen und für die Entsorgung bzw. zum Teil für Kompostierungsversuche bereitgestellt.

3.2.4 Setzmaschine

Der Materialhauptstrom (0,1 – 4 mm) gelangte über den Unterlauf des Hydrozyklons zum Eintrittsbereich der Setzmaschine als nächste Verfahrensstufe. Hierzu wurde ein für das EU-LIFE-Projekt „Recdemo“ von der Firma Allmineral entworfener und konstruierter Prototyp einer Sandsetzmaschine, Typ Alljig P400/600 x 800, in die Versuchsanlage integriert. Dieser Setzmaschinentyp ist seitengepulst. Die Energiezufuhr erfolgt durch einen pulsierenden Aufstrom, dessen Hub mittels Druckluft induziert wird. Das Korngemisch bewegt sich dabei pulsierend auf dem Setzgutträger durch das Setzfass und erfährt hierbei – durch das Bestreben, den energetisch günstigsten Zustand zu erreichen – eine Materialsichtung nach der Dichte. Gleichzeitig wird durch die Neigung des Setzgutträgers und durch nachfolgend aufgegebenes Aufgabematerial ein Transport der Körner in Richtung des Austrags bewirkt. Das Verfahrensprinzip dieser Setzmaschine ist in Abbildung 3.6 dargestellt.

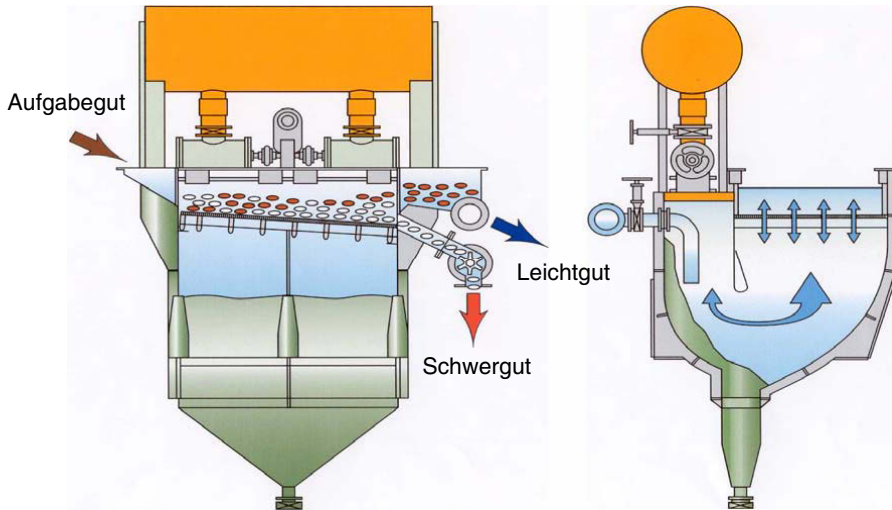


Abbildung 3.6: Schemazeichnung der seitengepulsten Setzmaschine (Typ Alljig), Längs- und Querschnitt

In der Setzmaschine wurde das Material auf einen Setzgutträger im Setzfass aufgegeben. Durch die Öffnungen des Setzgutträgers erfolgte die Pulsation des als Fluid eingesetzten Wassers. Der Verlauf der Pulsation war sinusförmig. Über einen Schieber (K1/K2) war die Zufuhr des pulsierenden Wassers in das Setzfass im Verhältnis 2 zu 1, Anlageneintritt / Setzstrecke zu Anlagenausritt / Beruhigungsstrecke, vom Hersteller voreingestellt. Diese Einstellung wurde im Betrieb überprüft und für die Versuchsfahrten übernommen.

Das Schwergut wurde über einen Bodenschieber aus der sogenannten Trennschicht ausgetragen, der Leichtgutaustrag erfolgte über einen Überlauf, das Wehr. Zum Abtasten der Trennschicht diente ein Schwimmer der Bewegung und Höhe der abzutrennenden Schwergutschicht erfasste. Die Einstellung des Schwimmers erfolgte über die Justierung eines Schwimmergegengewichtes, das manuell in Abständen von jeweils 2 cm auf der Schwimmerhalterung in Richtung zu oder von der Austragsöffnung bewegt werden konnte. Die über den Schwimmer erfassten Daten des Setzbettes wurden elektronisch an die Anlagensteuerung übermittelt. Die Öffnung des Bodenschiebers für den Schwergutaustrag konnte wahlweise über die Anlagensteuerung oder manuell erfolgen. Die Öffnung des Wehrs für den Leichtgutüberlauf konnte im Bereich von wenigen Millimetern variiert und vor Beginn der Versuchsfahrt voreingestellt werden.

Die Steuerung des Setzprozesses erfolgte bei diesem Anlagentyp durch das Zusammenwirken der Parameter Setzfrequenz, Setzbethöhe, Schwimmereinstellung und

Hubhöhe. Die Hubhöhe wurde über die Druckluftzufuhr geregelt, die Einstellung der Druckluftstärke erfolgte dabei per Hand in dimensionslosen Einheiten. Die gemessenen Werte von Druckluftstärke und Hubhöhen sind in Tabelle 3.3 angegeben. Setzbethöhe und Setzfrequenz wurden entsprechend den Voreinstellungen automatisch gesteuert. In Tabelle 3.3 sind die Steuerungsparameter der Setzmaschine als Übersicht dargestellt.

Tabelle 3.3: Variationsmöglichkeiten der Setzmaschineneinstellungen

| Parameter | Einheit | Min | Max |
|---------------------------|---|-------|------|
| Setzbethöhe | [mm] | 80 | 140 |
| Setzfrequenz | [Hubzahl/min] | 40 | 217 |
| Hubhöhe | dimensionslose Einheit der Druckluftzufuhr | 3,5 | 8,3 |
| | gemessene Druckluftstärke [bar] | 0,075 | 0,15 |
| | gemessene Hubhöhe [mm] | 4 | 35 |
| Schwimmer | dimensionslose Einheit zur Justierung des Schwimmergegengewichtes zur Steuerung der Öffnungsfrequenz des Bodenschiebers | 1 | 12 |
| Leichtgutaustrag/ Wehr | Höhe der Austragsöffnung [mm] | 15 | 20 |

Die Verweilzeiten des Materials in der Setzmaschine lagen zwischen 2,0 und 3,5 Minuten, die mittlere Verweilzeit betrug 2,5 Minuten. Die Steuerung des Materialstroms erfolgte über den Austrag aus dem Aufgabesilo bzw. aus dem Anschlussaggregat.

Am Anlagenaustritt wurden die durch Dichtesortierung gewonnenen Materialarten Leichtgut am Überlauf und Schwergut an der Bodenschieberöffnung getrennt erfasst. Die weitere Behandlung geschah wie folgt:

- Das Schwergut wurde nach dem Schwergutaustrag über eine Kreiselpumpe in einen Entwässerungszyklon gepumpt. Durch den Zyklonunterlauf gelangt das Schwergut auf ein Entwässerungssieb mit der Maschenweite 100 µm. Das entwässerte Material wurde anschließend mittels einer Förderschnecke in einen separaten Auffangbehälter gefördert.
- Das Leichtgut wurde analog zum Schwergut behandelt und entwässert.
- Das Prozesswasser, das bei den Entwässerungsvorgängen aufgefangen wurde, gelangte in den Aufnahmebehälter für das im Hydrozyklon abgetrennte Feinstgut (siehe Punkt 3.2.3). Nach der Abtrennung der verbliebenen Feststoffe < 100 µm durch Flockung und Abzentrifugation der Feststoffe im Dekanter wurde das

Prozesswasser nach dem Durchlauf durch eine Kiesfilteranlage dem Prozesswasserkreislauf wieder zugeführt.

3.2.5 Versuchsdurchführung

Die Dauer der eigentlichen Versuche betrug jeweils 40 Minuten. In dieser Zeit konnte in der Regel eine für die nachfolgenden Baustoffuntersuchungen ausreichende Menge der einzelnen ausgetragenen Materialarten aufbereitet werden. Die Erfassung der Austragsgüter Schwergut und Leichtgut erfolgte über einen Behälterwechsel zu Beginn und am Ende des Versuchs. Die im Rahmen von Einfahrphase und Abfahrmodus ausgetragenen Korngemische wurden separat aufgefangen und nicht in die anschließenden Untersuchungen einbezogen.

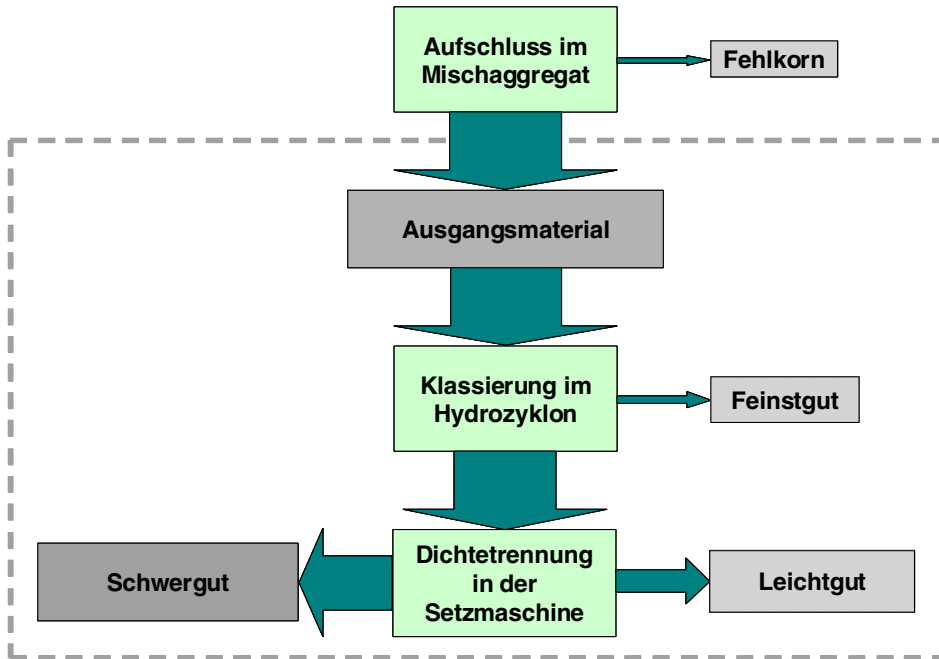
Der Beginn der Versuche erfolgte nach einer Vorlaufzeit von ca. 20 Minuten. Der Messstart richtete sich hierbei nach der Stabilität des Setzbettes in der Setzmaschine, die über die kontinuierliche Messung von Setzbethöhe und Austrag überprüft werden konnte. Nach Beendigung jedes Versuchs erfolgte eine Nachlaufzeit, in deren Verlauf noch in den Fördereinrichtungen verbliebenes Material ausgetragen wurde, um die Sedimentation der Sande in der Anlage zu vermeiden. Zur Verifizierung von Versuchsdauer und Vorlaufzeit wurden Langzeitmessungen über 80 und 120 Minuten durchgeführt. Im Verlauf der Langzeitmessungen wurden Proben entnommen und anschließend untersucht. Weiterhin wurden Wiederholungsversuche von verschiedenen Anlagenkonfigurationen durchgeführt.

Ziel der Versuche war – neben der Untersuchung des Einflusses der einzelnen Steuerungsparameter auf die Eigenschaften von Leicht- und Schwergut – die Optimierung des Aufbereitungsprozesses in Hinblick auf die Gewinnung eines für die Baustoffherstellung möglichst geeigneten Schwergutes in ausreichender Austragsmenge. Da die Ergebnisse der Baustoffprüfungen erst mit Zeitverzögerung vorlagen, war das Hauptkriterium für die Bewertung der Aufbereitung und die Entscheidung über die nachfolgenden Versuchsreihen die Veränderung der Zementsteingehalte (siehe Kapitel 3.4.2).

3.3 Prozessbewertung - Bilanzen und daraus abgeleitete Kenngrößen

Das Erstellen von Massenbilanzen ist Voraussetzung für die Bewertung eines Aufbereitungsprozesses. Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit ist die Massenbilanzierung auch die Basis für die ökobilanzielle und ökonomische Bewertung des untersuchten Verfahrens. Wie in Abbildung 3.7 dargestellt wurden aus dem Ausgangsmaterial durch die Nassaufbereitung die nachfolgend aufgeführten drei Austragsgüter erzeugt:

- Produkt Schwergut: große Masse mit geringem Zementsteingehalt,
- Reststoff Leichtgut: geringe Masse mit hohem Zementsteingehalt,
- Reststoff Feinstgut: geringe Masse mit hohem Zementsteingehalt.



— — — Bilanzrahmen

Abbildung 3.7: Schematische Darstellung der Stoffströme im Aufbereitungsprozess

Der Anteil des Schwergutes als Zielprodukt ist dabei die wichtigste Bezugsgröße. Die Kenngröße Masseausbringen R_m , der prozentuale Anteil der Produktmasse im Verhältnis zur Aufgabemasse, bezieht sich dementsprechend auf den Anteil an produziertem Schwergut.

Für jeden Versuch wurden die Menge des jeweiligen Ausgangsmaterials sowie die gewonnenen Austragsgüter Schwergut, Leichtgut und Feinstgut durch Wägung der Auffangbehälter bestimmt. Über die ermittelten Feuchtegehalte der Materialien wurde auf die entsprechende Trockensubstanz zurückgerechnet. Das bei den Versuchen eingesetzte Aufgabegut wurde über die kontinuierliche Messung der Masse im Aufgabesilo ermittelt.

Das im Ausgangsmaterial nach dem Aufschluss noch enthaltene Überkorn $> 4\text{mm}$ wurde über ein Fehlkornsieb nach dem Aufschlussaggregat aus dem Materialhauptstrom abgetrennt. Aufgrund beschränkter Platzverhältnisse und Auffangbehälteranzahl konnte dieses Überkorn nur für die Dauer des gesamten Aufbereitungsprozesses, bestehend aus Vorlaufphase, eigentlicher Messfahrt und Nachlaufzeit, bestimmt wer-

den. Die im Ergebnisteil unter Kapitel 4.1 aufgeführten Verhältnisse von Schwergut, Leichtgut und Feinstgut beziehen sich deshalb auf das Austragsgut. Sowohl die Masse des während der Vorlaufphase und der Nachlaufzeit durchgesetzten Materials als auch die als Fehl- oder Überkorn nach dem Aufschluss im Eirich-Mischer abgeseibte Fraktion > 4 mm sind in diesen Werten nicht enthalten. Der Überkornanteil durchlief keine weiteren Aufbereitungsschritte und ist daher für die Bewertung des Setzprozesses nicht von Bedeutung.

Die Masse des Austragsmaterials m_A berechnet sich aus der Massenbilanz des Produktes Schwergut m_S und der Sortierreststoffe Leichtgut m_L und Feinstgut m_F wie folgt:

$$m_A = m_S + m_L + m_F \quad \text{Gl. 3.1}$$

Da sich die Massenbilanzen nur über die vollständig erfassten Austragsprodukte berechnen, gibt es keine Fehlbeträge.

Das Masseausbringen R_m kann in Anlehnung an Schubert [135] als Verhältnis zwischen der Masse des Zielproduktes Schwergut m_S und der Masse des gesamten Austragsmaterials m_A berechnet werden:

$$R_m = \frac{m_S}{m_A} 100 \text{ in \%} \quad \text{Gl. 3.2}$$

Der in dieser Arbeit untersuchte Aufbereitungsprozess hatte die Anreicherung von Natursteinkörnung im Schwergut zum Ziel. Die über ein Aufschlussverfahren bestimmten salzsäureunlöslichen Rückstände (SUR) der Materialien BS, REM und VS wurden als Richtgröße für den Natursteingehalt der Ausgangskörnung (c_A), des Produktes Schwergut (c_S) sowie der Reststoffe Leichtgut (c_L) und Feinstgut (c_F) verwendet (siehe 3.4.2). Die Bewertung der Anreicherung von Naturstein im Schwergut der verschiedenen Versuchsfahrten basierte daher auf den Massenbilanzen und den Bestimmungen salzsäurelöslicher und salzsäureunlöslicher Anteile in den einzelnen Materialarten.

Um die Qualität des Salzsäureaufschlussverfahrens und der Massenbilanzierung zu verifizieren, wurde eine Fehlerbetrachtung durchgeführt. Für die Fehlerbetrachtung wurde auch die Masse des aus dem Materialhauptstrom entfernten Überkorns berücksichtigt. Die Masse des entfernten Überkorns m_U wurde als Differenz zwischen der Fraktion > 4 mm des Ausgangsmaterials und der Fraktion > 4 mm des Schwergutes, die in den Siebanalysen ermittelt wurden, berechnet. Für den Wertstoffgehalt des Überkorns wurden die SUR-Gehalte des Schwergutes angenommen. Die so für jede Versuchsfahrt durchgeführte Berechnung des Natursteingehaltes im Ausgangsmaterial ist in Gleichung 3.3 dargestellt:

$$c_A = (m_{SCS} + m_{LCL} + m_{FCF} + m_{ÜCS})/100 \text{ in } \% \quad \text{Gl. 3.3}$$

Die so berechneten Werte für den Natursteingehalt c_A der einzelnen Versuchsfahrten wurden mit den direkt im Ausgangsmaterial gemessenen Werten verglichen.

Zur Bestimmung der Verteilung von Naturstein und Zementstein innerhalb der Korngrößenverteilung der Materialien Schwergut, Leichtgut und Ausgangsmaterial wurden von ausgewählten Versuchsfahrten der Serien BS, REM und VS die SUR-Gehalte der einzelnen Siebfraktionen gemessen. Mit diesen Werten wurde unter Berücksichtigung der Ergebnisse der durchgeführten Siebanalysen und der Massenverhältnisse der Austragsgüter eine Bilanz des Gehaltes an Natur- und Zementstein innerhalb der untersuchten Siebfraktionen erstellt.

Aufgrund der stofflichen Zusammensetzung von Mörteln und Betonen ist der Anteil an natürlicher Gesteinskörnung (SUR) als Wertstoff in Altbetonen (Gehalte durchschnittlich zwischen 80 und 85 Gew.-%) immer deutlich höher als der Gehalt an der durch das Aufbereitungsverfahren zu entfernenden Komponente Zementsteinmatrix (SLB). Wichtig für die Stoffbilanzen war daher vor allem die Betrachtung der Reduzierung des Zementsteingehaltes, da an der Veränderung dieses Parameters die Auswirkungen des Aufbereitungsprozesses deutlicher zu erkennen waren als an den Veränderungen des Gehaltes an Natursteinkörnung.

3.4 Untersuchungen zur Produktbewertung

3.4.1 Siebanalysen

Die Siebanalysen wurden als Trockensiebungen durchgeführt. Entsprechend dem Größtkorn der Ausgangsmaterialien wurden als obere Siebgrößen 4 mm und 8 mm verwendet. Der Grundsiebansatz nach DIN 4226-1 [199] wurde mit Sieben der Lochweite 100 μm und 63 μm als untere Siebgrößen ergänzt. Die Siebungen erfolgten mit einer Siebmaschine der Firma Retsch, Typ VE.

Aus den Auswertungen der Siebanalysen wurde die dimensionslose Körnungsziffer k berechnet. Sie dient als Kennwert für den Wasseranspruch von Zuschlaggemischen für die Herstellung von Mörteln und Betonen in der gewünschten Konsistenzklasse [73] (siehe 3.6.1). Die Körnungsziffer wird als die Summe der Siebrückstände (R_i) in % auf den Sieben des genormten vollständigen Siebsatzes, dividiert durch 100 ermittelt. Die Berechnung erfolgt entsprechend nach der Formel:

$$k = \frac{\sum R_i}{100} \quad \text{Gl. 3.4}$$

Für die Bewertung der Korngrößenverteilungen wurde analog zur Regelsieblinie B 16 eine Sieblinie mit einem Größtkorn von 4 mm generiert. Der Absolutbetrag der Abwei-

chung einer Korngrößenverteilung von dieser Sieblinie (ΔRB_4) diene als Maßstab für die Bewertung von Ausgangsmaterialien, Schwergütern und Leichtgütern sämtlicher Versuchsfahrten. Hierfür wurden anhand der Sieblinien die Abweichungen der Masse der einzelnen Korngruppen von den Werten der generierten Sieblinie als Absolutbeträge summiert (Gleichung 3.5).

$$\Delta RB_4 = \sum |D_{IRC} - D_iRB_4| \quad \text{Gl. 3.5}$$

3.4.2 Bestimmung säurelöslicher und säureunlöslicher Bestandteile

Als ein Hauptkriterium des Aufbereitungserfolges wurde der Aufschluss der behandelten Altbetonkörnung, das Lösen der Gesteinskörnung aus dem Verbund mit Zementstein, verwendet. Als Maß für den Aufschlussgrad konnte in diesem Zusammenhang die Reduzierung des Zementsteingehaltes der Zuschlagkörner verwendet werden. Die Bestimmung der Zementstein- bzw. Natursteingehalte der nicht kalksteinhaltigen Betonbrechsande erfolgte routinemäßig mittels eines für diese Arbeit standardisierten Salzsäureaufschlussverfahrens.

Jeweils 40 g der bei 105°C getrockneten Proben wurden mit 200 ml auf 10 % verdünnter Salzsäure (Merck p.A.) auf einer Heizplatte zwei Stunden bei 98°C gerührt. Nach einer kurzen Abkühlphase wurde der noch warme Überstand in einen Zentrifugenbehälter dekantiert. Der feste Rückstand wurde mit destilliertem Wasser aufgeschlämmt und ebenfalls in einen Zentrifugenbehälter überführt. In einer Zentrifuge der Firma Hereaus, Typ Varifuge F, wurden beide Lösungen 30 Minuten lang bei 3500 rpm zentrifugiert. Das Aufschlämmen und das Zentrifugieren wurden für die verbliebene Rückstände nochmals wiederholt. Die danach verbleibenden Rückstände wurden bis zur Klarheit der überstehenden Lösung gegebenenfalls noch mehrfach mit destilliertem Wasser aufgeschlämmt und sedimentiert.

Anschließend erfolgte die Filtration über Analyseschnellfilter der Firma Schleicher & Schüll, Typ 604. Die Rückstände wurden bei 105°C getrocknet und anschließend ausgewogen. Durch die Differenzwägung zum eingesetzten Probematerial wurden die säureunlöslichen Rückstände (SUR) bestimmt. Die säurelöslichen Bestandteile (SLB) bildeten dabei die Differenz zwischen den nach der Säurebehandlung verbliebenen Rückständen (SUR) und dem eingesetzten Probematerial.

3.4.3 Bestimmung der Wasseraufnahme

Die Wasseraufnahme der Mehrzahl der Proben wurde in Anlehnung an Anhang D der DIN 4226-100 [13] als Wasseraufnahme nach 10 Minuten, WA, bestimmt. Das Probematerial wurde zuvor getrocknet. Durch die in Ausgangsmaterial und Leichtgut enthaltenen Feinanteile war die Bestimmung der Wasseraufnahme im Vergleich zu größeren Körnungen aufwendig. Daher wurden Paralleluntersuchungen zur WA-Bestimmung mittels Widerstandsmessungen mit einer Multiringelektrode (MRE), Typ Proceq LTM

Canin der Firma S & R Sortec, durchgeführt [200]. Aufgrund der Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Messungen nach DIN 4226-100 erfolgte ein Teil der Bestimmungen ausschließlich mit der Multiringelektrode.

3.4.4 Dichtebestimmungen

Die Kornrohddichte wurde nach dem Pyknometerverfahren in Anlehnung an DIN 1097-6, DIN 66137-1 [201] und DIN 52102 bestimmt. Die Dichtebestimmung des Prozesswassers erfolgte ebenfalls nach dem Pyknometerverfahren.

Die Messung der Reindichte der Körnungen erfolgte nach der Standardarbeitsanweisung StAA-IV.31-6 der BAM mit einem Gaspyknometer, Typ AccuPyc 1330 Helium Pyknometer, Firma Micromeritics, aus der getrockneten Probe. Messung und Auswertung erfolgten unter Beachtung der DIN 66137-1 [201] und DIN 66137-2 [202].

3.4.5 Porositätsbestimmungen

Für die Porositätsmessungen wurde das getrocknete Probenmaterial von Einzelproben von Ausgangsmaterial und Schwergut der Betonbrechsande BS und SAL auf den Korngrößenbereich 1,0 – 4,0 mm abgesiebt und nach DIN EN 932-1 [203] geteilt. Die Porengrößenverteilung wurde im Porenradialbereich 3,7 nm – 56 µm mittels Quecksilberintrusionsmessungen nach DIN 66133 [204] ermittelt.

Von Mörteln aus den Materialien BS A und BS L sowie REM A ungesiebt (0-5 mm) und REM A abgesiebt (0-4 mm) sowie aus Referenzmörteln wurden Bruchstücke aus den Festigkeitsprüfungen in einem Backenbrecher gebrochen und auf 4 – 8 mm abgesiebt. An diesen Proben wurde ebenfalls nach DIN 66133 [204] die Porengrößenverteilung im Porenradialbereich 3,7 nm – 56 µm bestimmt. Alle Quecksilberintrusionsmessungen wurden mit einem Porosimeter Pascal 140/240, Firma Porotec GmbH, durchgeführt.

Die Berechnung der Gesamtporosität erfolgte für die Proben, von denen sowohl Roh- als auch auf Reindichte bestimmt wurden, nach DIN 52102:

$$\text{Gesamtporosität} = \left(1 - \frac{\text{Rohdichte}}{\text{Reindichte}}\right) \times 100 \quad \text{Gl. 3.6}$$

3.4.6 Bestimmung von Sulfat und Chlorid

Die Bestimmung von Sulfat und Chlorid erfolgte aus 24-h-Eluaten (Verdünnungsverhältnis 1:10) in Anlehnung an DIN 38414-4. Für die Messungen wurde ein Ionenchromatograph DX 320 (Dionex) verwendet. Die nicht angesäuerten Proben wurden über Spritzenfilter (Roth) mit 45 µm Porenweite filtriert und anschließend analysiert.

Untersucht wurden die Eluate aus Ausgangsmaterial, Schwergut, Leichtgut und Feinstgut der Materialien BS, REM und VS.

3.4.7 Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit

Zur Bewertung der Umweltverträglichkeit wurden Mischproben aus Ausgangsmaterialien, Schwergütern und Leichtgütern der Betonbrechsande sowie jeweils eine Gesamtmischprobe des Vorabsiebmaterials und der Feinstgüter hergestellt. Die Proben wurden auf Schadstoffe der Parameterliste für die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen der LAGA (Länderarbeitsgemeinschaft Abfall, siehe Punkt 2.1.2) analysiert. Es wurden sowohl Feststoffproben als auch Eluate untersucht. Für die Schwermetallbestimmungen wurden die Feststoffproben zunächst gemäß DIN 38414-S7 mittels Königswasseraufschluss aufgeschlossen. Die für die Analysen eingesetzten Verfahren sind in Tabelle 3.4 aufgeführt.

Tabelle 3.4: Analysenverfahren zur Bestimmung von Schadstoffen

| Parameter | Analyseverfahren | Gerät | Verfahrensprinzip |
|---|--|----------------------|-----------------------|
| As, Cd, Cr _(gesamt) , Cu, Ni, Pb, Zn | Atomemissionsspektroskopie mit Atomisierung im induktiv gekoppelten Plasma (ICP-OES) | IRIS Intrepid II XSP | DIN EN ISO 11885 |
| Hg | Atomabsorptionsspektrometrie (AAS) | Thermo | DIN 38406 E12 |
| PAK | High Pressure Liquid Chromatographie (HPLC) | Waters | DIN 38414 Teil 2 |
| KW | Gaschromatographie (GC) | Perkin.Elmer | DIN ISO 16703 : 03.02 |

3.4.8 Röntgendiffraktometrie

Die röntgenographischen Untersuchungen erfolgten an Stichproben der Versuchsserien BS (Schwergut, Leichtgut und Feinstgut) und SAL (Schwergut und Leichtgut). Die Messungen wurden mit einem Bruker-AXS D5000 (Siemens) in Bragg-Brentano Geometrie mit Kobalt-KO_{1,2}-Strahlung, 40kV*30 mA, und sekundärem Graphit-Monochromator durchgeführt.

Von den zu untersuchenden Proben wurden Präparate mit einem Durchmesser von 38 mm und einer Dicke von 2 mm hergestellt, die während der röntgenographischen Messung mit 15 rpm rotierten. Die Diffraktogramme wurden in 0,02°-Schritten zwischen 8° und mindestens 55°, in einigen Fällen bis 80° registriert. Die Messzeit pro Messpunkt betrug 40 Sekunden. Die Datenauswertung erfolgte mit dem Auswerteprogramm DiffracPLUS und der Datenbank Powder Diffraction File (PDF). Die halbquantitative

Phasenanalyse erfolgte nach dem Reference Intensity Ratio (RIR)–Verfahren unter Verwendung der in der PDF-Datenbank angegebenen RIR-Werte.

3.5 Mikroskopische Untersuchungen

Verschiedene Stichproben der Brechsande und der Vorabsiebung wurden hinsichtlich Morphologie und Oberflächenbeschaffenheit lichtmikroskopisch und elektronenmikroskopisch untersucht. Für die lichtmikroskopischen Untersuchungen wurde ein Leica Mikroskop der Baureihe Leitz DM RXP mit den Optionen für Durchlicht- und Auflichtmikroskopie verwendet.

Die elektronenmikroskopischen Untersuchungen erfolgten mit einem im Niedrigvakuum arbeitenden Rasterelektronenmikroskop, Typ ESEM XL 30 (Environmental Scanning Electron Microscope, Philips Electron Optics). Der Druck des Arbeitsvakuum lag für die Messungen im Bereich 0,67 – 1,33 mbar. Durch Einsatz des zugehörigen Detektors für energiedispersive Röntgenstrahlung (EDX, Firma EDAX, konnten parallel zur Oberflächenbetrachtung auch Röntgenmikroanalysen zur qualitativen und semiquantitativen Elementanalyse durchgeführt werden. Dies ermöglichte die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung von Mikrobereichen einzelner Proben. Dabei wurden Punktspektren, Linienspektren und Flächenverteilungsbilder aufgenommen und ausgewertet. Auf Basis dieser Messungen konnten einzelne Mineralarten identifiziert werden. Aufgrund der unregelmäßigen Kornformen und -größen der untersuchten Sande war nur eine semiquantitative Analyse der Proben möglich.

Die Untersuchungen fanden sowohl an einzeln vorliegenden, unverfestigten Gesteinskörnern als auch an in Epoxidharz eingebetteten angeschliffenen Proben statt. Zur Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung sowie zur besseren Erkennung eventuell vorhandener Schädigungen der Gesteinskörner wurden außerdem mit Salzsäure behandelte Rückstände untersucht.

3.6 Baustoffuntersuchungen

Um die Vergleichbarkeit der für die Baustoffuntersuchungen hergestellten Mörtel und Betone untereinander und mit den Referenzmaterialien sicherzustellen, wurden die Materialien nach einheitlichen Rezepturen hergestellt. Die RC-Baustoffe unterschieden sich von Referenzmörteln und Referenzbetonen lediglich durch die erhöhte Wassergabe, die auf der Basis der Ergebnisse der Wasseraufnahme berechnet wurde. Auf die Zugabe von Fließmitteln wurde verzichtet. Die Sicherstellung der Vergleichbarkeit der untersuchten Betone war nicht nur für die baustofftechnische Beurteilung, sondern auch in Hinblick auf die ökobilanzielle und ökonomische Bewertung des Nassaufbereitungsverfahrens wichtig.

3.6.1 Herstellung der Mörtelmischungen

Die überwiegende Zahl der Baustoffuntersuchungen wurde an Mörtelprüfkörpern durchgeführt. Es wurden Versuchsreihen aus den Ausgangsmaterialien und den Aus-

tragsgütern der Versuchsserien BS, REM, SAL und HAL hergestellt. Dabei wurden die Sieblinien der für die Mörtelherstellung verwendeten Materialien nicht verändert. Aus der Vorabsiebung VS wurden Mörtel nur aus Ausgangsmaterial und Schwergut hergestellt. Auf die Herstellung von Mörteln aus dem Leichtgut des Materials VS wurde nach einigen Versuchen verzichtet. Aufgrund in der Gesteinskörnung vorhandener, vermutlich über Bodenpartikel in die Körnung gelangte, erhärtungsstörende Substanzen entwickelten die Mörtelmischungen keine Festigkeit.

Die Rezeptur der Mörtelmischungen sowohl des RC-Materials als auch des Vergleichsmaterials Natursand erfolgte gemäß der volumetrischen Stoffraumrechnung nach Walz bzw. Ebeling et al. [205, 206]. Die Gesteinskörnung der RC-Probekörper bestand vollständig aus rezyklierter Gesteinskörnung. Der Referenzmörtel wurde aus gewaschenem und getrocknetem Sand aus Ottendorf-Okrilla hergestellt. Übersichten mit den Zusammensetzungen der einzelnen Mörtelmischungen sind im Anhang in den Tabellen A 19 – A 22 beigefügt.

Vorgegeben wurden die Kennwerte Regelkonsistenz KR bzw. F3 und ein Wasserzement-Wert $w/z = 0,60$. Mit den aus den Sieblinien berechneten Körnungsziffern k wurde der Wasseranspruch des Zuschlaggemisches für den gewählten Konsistenzbereich anhand von Beton-Kurvenscharen, der Abhängigkeit von Körnungsziffer, Wasseranspruch und Konsistenzbereich [207] für feinkörnige Mörtel extrapoliert.

Es wurde für alle Prüfkörper Zement CEM I 32,5 R, Zementwerk Schwenk, Bernburg, verwendet. Wasseranspruch und gewählter Wasserzementwert bestimmten die erforderliche Zementmenge. Der durch die Bestimmung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten ermittelte WA - Wert des jeweiligen Probematerials wurde als zusätzliche Wasserzugabe bei der Herstellung der Mörtelmischungen berücksichtigt.

Die eingesetzten rezyklierten Gesteinskörnungen wurden ofengetrocknet, da die Feuchtegehalte nach der Nassaufbereitung im Vergleich zum Natursand hoch waren. Pro Versuchsreihe wurden jeweils 10 Liter Mörtel aus den Gesteinskörnungen Ausgangsmaterial und Leichtgut sowie 20 Liter Mörtel aus den Schwergütern gefertigt.

Die Mischung der Mörtelbestandteile erfolgte in einem Zyklusmischer mit einem Fassungsvermögen von 30 l. Zunächst wurde die Gesteinskörnung vorgegeben und mit 2/3 des Gesamtwassers drei Minuten gemischt. Danach wurde zunächst der Zement zugegeben und im Anschluss erfolgte die Restwasserzugabe mit weiterer Mischung über drei Minuten. Acht Minuten nach der Zement- und Restwasserzugabe wurde die Mischung nochmals über 30 Sekunden aufgerührt und im Anschluss daran wurden die Frischmörteluntersuchungen durchgeführt.

3.6.2 Herstellung der Betonmischungen

Aus Ausgangsmaterial und Schwergut von drei Versuchsfahrten BS (BS 27, BS 58, BS 119) wurden Betone hergestellt. Die Sieblinie der Gesteinskörnungen wurde nach der Regelsieblinie B 16 mit der Körnungsziffer 3,66 zusammengestellt. Der Wasserzementwert war mit 0,60, die Konsistenz mit F3 vorgegeben. Im Anhang (Tabellen A 24 bis A 26) sind die Rezepturen der Betone der Versuchsreihe BS 27, BS 58 und BS 119 sowie die Rezepturen der Referenzbetone dargestellt.

Die erste Versuchsreihe wurde mit jeweils 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung A und S am Gesamtzuschlag durchgeführt. In den beiden folgenden Versuchsreihen wurden 10 %, 20 %, 30 %, 40 % und 50 % der gesamten Gesteinskörnung durch rezykliertes Material ersetzt. Als natürliche Gesteinskörnungen wurden gewaschener quarzitischer Kies und Sand aus Ottendorf-Okrilla verwendet. Der eingesetzte Zement, CEM I 32,5 R, wurde im Zementwerk Schwenk, Bernburg, hergestellt. Auf die Zugabe von Fließmitteln wurde verzichtet.

Pro Serie wurden 120 l Beton gefertigt. Die Gesteinskörnung wurde in einen Mischer des Typs Eirich, 60 l, vorgegeben und mit 2/3 des Gesamtwassers über drei Minuten gemischt. Danach erfolgte die Zementzugabe zusammen mit dem Restwasser mit anschließender dreiminütiger Mischung. Nach weiteren fünf Minuten wurde der Frischbeton über 30 Sekunden aufgerührt.

3.6.3 Frischmörtel- und Frischbetonuntersuchungen

Die Herstellung begleitend wurden die folgenden Frischmörtel- und Frischbetonprüfungen durchgeführt:

- Konsistenzmessung am Ausbreittisch nach DIN 1048 (Mörtel und Beton) und nach DIN 18555 (Mörtel)
- Messung des Gesamtluftgehaltes im 8-Liter-Luftporentopf (Mörtel und Beton)
- Rohdichtemessung im Luftporentopf (Mörtel und Beton)

Aus den Frischmörteln wurden 24 Prismen (Schwergut) bzw. 12 Prismen (Ausgangsmaterial und Leichtgut) der Abmessungen 4 cm x 4 cm x 16 cm hergestellt. Aus den Frischbetonmischungen wurden jeweils 9 Würfel mit einer Kantenlänge von 15 cm für die Festigkeitsprüfungen sowie 6 Prismen mit den Abmessungen 10 x 10 x 30 cm³ für die Bestimmungen der Elastizitätsmoduli und der Schwindmaße hergestellt.

Nach der Herstellung wurden die Probekörper mit einer PE-Folie abgedeckt und 24 h gelagert. Nach dem Ausschalen, Beschriften und Vermaßen wurden die Mörtelprobekörper sowie die jeweils drei für die Schwindmessungen vorgesehenen Betonprüfkörper in einen Klimaraum (20° C und 65% relative Feuchte) umgelagert. Die restlichen Betonprüfkörper wurden nach dem Ausschalen ebenfalls beschriftet und vermessen

und kamen in ein Wasserbad (20°C) um Verformungen sowie Rissbildungen aufgrund von Temperaturgradienten durch die Freisetzung der Hydratationswärme vorzubeugen. Da rund 50 bis 75 % der gesamten Wärme innerhalb der ersten 7 Tage freigesetzt werden, wurden die Prüfkörper nach dem 7. Tag in den Klimaraum umgelagert (vgl. DIN 12390-2 [208]). Die bis zum 7. Tag zu prüfenden Prüfkörper verblieben bis zum Zeitpunkt ihrer Prüfung im Wasserbad

3.6.4 Festmörtel- und Festbetonuntersuchungen

Die Untersuchungen der Festmörtel auf Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und dynamischen Elastizitätsmodul erfolgten an Mörtelprismen nach 1, 3, 7 und 28 Tagen. Vor Beginn der Festigkeitsprüfungen wurden von allen Mörtelprüfkörpern Masse und Rohdichte ermittelt.

Die Betonprüfkörper wurden nach 2, 7 und 28 Tagen auf Druckfestigkeit und dynamischen Elastizitätsmodul geprüft. Masse und Rohdichte der Betonprüfkörper wurden vor der Messung des dynamischen E-Moduls und der Druckfestigkeit bestimmt.

Der dynamische E-Modul wurde an den Prismen mit Hilfe der Eigenschwingzeitmessung nach Impulsanregung mittels eines Prüfgerätes des Typs „Grindo-Sonic“ Mk5 „Industrial“, Baujahr 2001, nach DIN 1048 bestimmt.

Druckfestigkeits- und Biegezugfestigkeitsmessungen an den Prüfkörpern wurden mit einer Prüfmaschine der Bauform 2010.010 von Toni Technik, Baujahr 1999, durchgeführt. Die Maximalkraft für die Bestimmung der Druckfestigkeit beträgt 300 kN, für die Bestimmung der Biegezugfestigkeit 10 kN.

Das Schwindmaß der Betonprismen wurde durch die Messung der Längenänderungen der im Klimaraum gelagerten Probekörper über einen Zeitraum von bis zu 365 Tagen bestimmt.

4. Ergebnisse und Auswertung

4.1 Prozessbewertung

4.1.1 Auswertung der Massenbilanzen

Die Auswertung der Massenbilanzen erfolgte auf der Basis des Gesamtaustragsgutes < 4 mm für jede Versuchsfahrt (vgl. 3.3). Die Masse des eingesetzten Ausgangsmaterials (m_A) wurde durch den Aufbereitungsprozess in die Materialarten Schwergut (m_S), Leichtgut (m_L) und Feinstgut (m_F) aufgeteilt. Tabelle 4.1 gibt einen Überblick über die Ergebnisse der Bilanzen für m_S , m_L und m_F der Versuchsserien BS, VS, REM und SAL.

Tabelle 4.1: Zusammenfassung der Ergebnisse der Massenbilanzen (< 4 mm) der Materialarten der Versuchsserien BS, VS, REM und SAL

| Versuchszahl | BS 117 | | | VS 23 | | |
|--------------|-----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | MW | Max | Min | MW | Max | Min |
| m_A [%] | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| m_S [%] | 73,8 | 89,4 | 26,5 | 61,1 | 79,0 | 25,8 |
| m_L [%] | 19,2 | 65,9 | 6,4 | 19,3 | 56,1 | 2,3 |
| m_F [%] | 7,0 | 14,0 | 3,7 | 19,7 | 24,8 | 15,4 |

| Versuchszahl | REM 22 | | | SAL 6 | | |
|--------------|-----------|-------|-------|----------|-------|-------|
| | MW | Max | Min | MW | Max | Min |
| m_A [%] | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| m_S [%] | 61,6 | 85,6 | 25,9 | 66,2 | 71,5 | 53,0 |
| m_L [%] | 28,1 | 63,2 | 2,1 | 22,2 | 33,8 | 15,2 |
| m_F [%] | 10,3 | 15,6 | 4,8 | 11,6 | 13,3 | 9,9 |

Die Einzelergebnisse der Massenbilanzen sind im Anhang in den Tabellen A 10 bis A 14 aufgeführt.

Das Nassaufbereitungsverfahren wurde auch in Hinsicht auf eine mögliche großtechnische Umsetzung untersucht. Ziel war der Austrag einer für eine industrielle Nutzung ausreichend großen Austragsmenge an Schwergut, das für eine Verwendung in der Baustoffherstellung geeignet sein sollte. Daher wurde die Setzmaschine in der überwiegenden Anzahl der Versuche mit dem Hauptuntersuchungsmaterial BS auf einen Schwergutanteil zwischen 65 % und 90 % an der Gesamtaustragsmasse eingestellt.

Die Berechnung der Wertstoffbilanzen für die Versuchsserien BS, REM und VS erfolgte auf der Grundlage der Massenbilanzen und der Ergebnisse der Salzsäureaufschlüsse. Wie in Tabelle 4.2 dargestellt, zeigt der Vergleich der tatsächlich im Ausgangsmaterial als SUR gemessenen Natursteingehalte (c_A) und den auf der Basis von Gleichung 3.3 berechneten Werten nur geringe Abweichungen.

Tabelle 4.2: Vergleich der gemessenen und berechneten Natursteingehalte c_A des Ausgangsmaterials der Versuchsserien BS und REM

| Versuchsanzahl | BS | | REM | |
|--|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| | 115 | | 22 | |
| Natursteingehalt | c_A gemessen in [% TS] | c_A berechnet in [% TS] | c_A gemessen in [% TS] | c_A berechnet in [% TS] |
| Mittelwert c_A | 78,8 | 78,5 | 82,4 | 82,7 |
| mittlere Abweichung ([% c_A], Absolutbetrag) | 2,3 | | 1,0 | |
| maximale Abweichung ([% c_A], Absolutbetrag) | 7,6 | | 2,8 | |

Die Verteilung von SUR und SLB in Abhängigkeit von der Korngröße in den Materialarten Schwergut, Leichtgut und Ausgangsmaterial ist in Kapitel 4.2 detailliert dargestellt. Die Analysen der untersuchten Materialien BS, REM und VS zeigten in allen durchgeführten Versuchsreihen die beabsichtigte Reduzierung des Zementsteingehaltes im Schwergut sowie eine Anreicherung im Leicht- und vor allem im Feinstgut.

Für die Versuchsreihen mit dem Material BS, in denen das Masseausbringen des Schwergutes mehr als 65 % betrug, sind in der nachfolgenden Abbildung 4.1 die Mittelwerte der Massenbilanz und der Bilanz des Zementsteinverbleibs als Sankey-Diagramme dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass obwohl die Reststoffe Leichtgut und Feinstgut zusammen weniger als 25% der Austragsmasse darstellten, mehr als 40% des Zementsteins mit diesen Materialarten ausgetragen wurden.

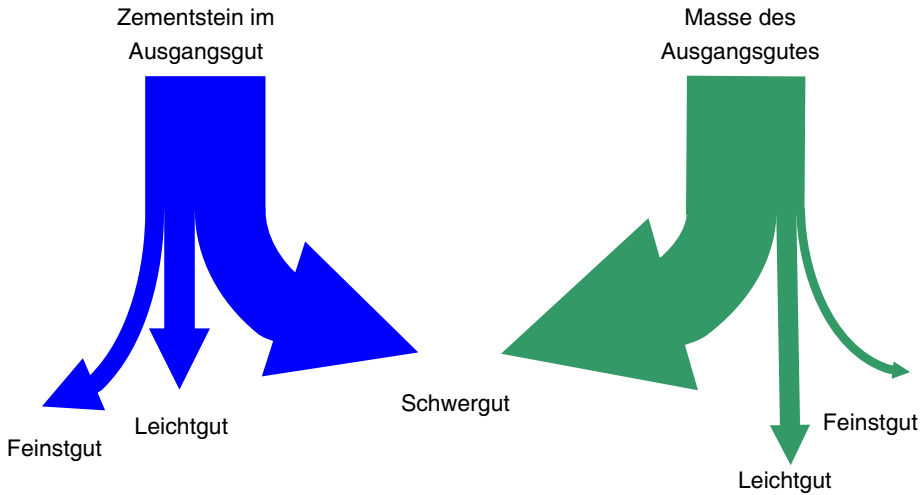


Abbildung 4.1: Bilanz des Zementsteins (links) und Massenbilanz (rechts) des Nassaufbereitungsprozesses, Versuchsserie BS, Mittelwerte der Versuchsfahrten mit einem Schwergutaustrag > 65%

Weiterhin war eine Abhängigkeit des Zementsteingehaltes im Leichtgut vom prozentualen Anteil des Leichtgutaustrages am Gesamtaustrag (siehe Abbildung 4.2) erkennbar. Eine Erhöhung des Leichtgutaustrages führte zu einer Verringerung des Zementsteingehaltes im Leichtgut. In Tabelle 4.3 sind die Mittelwerte der Gehalte an Zementstein (SLB) in Schwergut und Leichtgut sowie die Veränderungen des Zementsteingehaltes im Schwergut im Vergleich zum Ausgangsmaterial in Abhängigkeit vom Masseausbringen des Leichtgutes für die Versuchsserie BS dargestellt. Hierzu wurde der Leichtgutaustrag in die Klassen Masseausbringen < 10 %, 10 % - 20 % und 20 % - 65 % eingeteilt.

Tabelle 4.3: Zementstein in Leichtgut und Schwergut und Veränderung gegenüber dem Ausgangsmaterial in Abhängigkeit vom Masseausbringen des Leichtgutes, Serie BS

| Versuchsanzahl | BS | | |
|--|--------|----------|-----------|
| | 115 | | |
| Masseausbringen Leichtgut | < 10 % | 10 – 20% | 20 – 65 % |
| Mittelwert Zementstein im Leichtgut [% TS] | 38,0 | 31,8 | 26,0 |
| Mittelwert Zementstein im Schwergut [% TS] | 16,9 | 16,1 | 16,1 |
| Reduzierung des Zementsteingehaltes im Schwergut gegenüber dem Ausgangsgut [%] | - 20,8 | - 23,6 | - 23,0 |

Der Zusammenhang zwischen dem Leichtgutaustrag und dem Zementsteingehalt im Leichtgut bzw. dem Schwergutaustrag und dem Zementsteingehalt im Schwergut ist in Abbildung 4.2 dargestellt. Die Abhängigkeit des Zementsteingehaltes im Leichtgut vom Masseausbringen des Leichtgutes ist gut zu erkennen. Der Korrelationskoeffizient betrug für das Leichtgut BS $r = 0,68$ und für die Leichtgüter von REM und VS jeweils $r = 0,78$. Für die Schwergüter konnte keine Abhängigkeit zwischen dem Zementsteingehalt und dem prozentalem Schwergutaustrag festgestellt werden (siehe Abbildung 4.2). Dies zeigt, dass eine Erhöhung des Leichtgutaustrages nicht automatisch zu einer Verbesserung der Schwergutqualität führt.

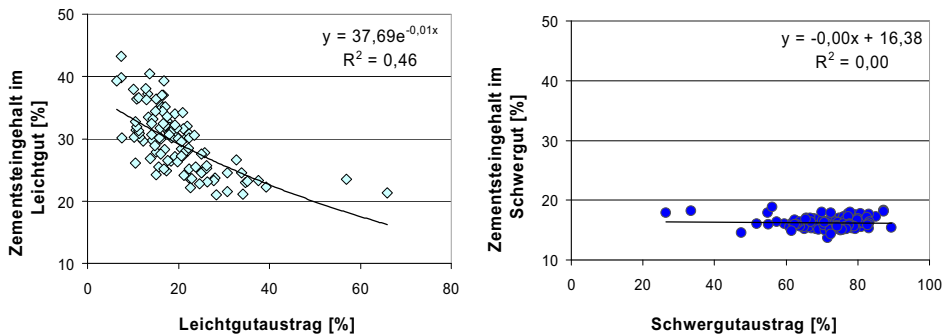


Abbildung 4.2: Zementsteingehalt von Leichtgut (links) und Schwergut (rechts) als Funktion des Leichtgut- bzw. des Schwergutaustrages, Serie BS

Anhand der vorliegenden Auswertung hat sich herausgestellt, dass ein Masseausbringen des Schwergutes zwischen 65 % und 85 % in Bezug auf die Masse des Produktes Schwergut und die Reduzierung des Zementsteingehaltes im Schwergut für diesen Aufbereitungsprozess günstig ist. Bei dieser Bewertung muss jedoch berücksichtigt werden, dass in diesen Daten die Auswirkungen unterschiedlicher Anlageneinstellungen nicht vollständig berücksichtigt sind.

4.1.2 Anlagentechnik – Aufschlusswirkung des Intensivmischers

In dem untersuchten Aufbereitungsverfahren wurde ein Eirichmischer als Misch- und Aufschlussaggregat für die Nassaufbereitung eingesetzt. Der Energieeintrag, der durch die Rührbewegungen des als Sternwirbler ausgelegten Rührwerkzeugs induziert wurde, sollte neben der Durchmischung des Brechsandes mit Wasser auch einen Abrieb von an den Brechsandkörnern anhaftendem Zementstein beim Durchmischungsvorgang bewirken. Daher wurde bei der Bewertung des Eirichmischers als Aufschlussaggregat auch die Menge des Feinstgutanfalls $< 100 \mu\text{m}$ betrachtet.

Der Feinstgutaustrag in Abhängigkeit von der Rührintensität des Eirichmischers ist für die Versuchsserien BS, VS, REM und SAL in der Abbildung 4.3 dargestellt. Wie in der

Grafik zu erkennen ist, war in der überwiegenden Zahl der Versuche mit erhöhter Rührintensität auch ein erhöhter Feinstgutaustrag zu verzeichnen.

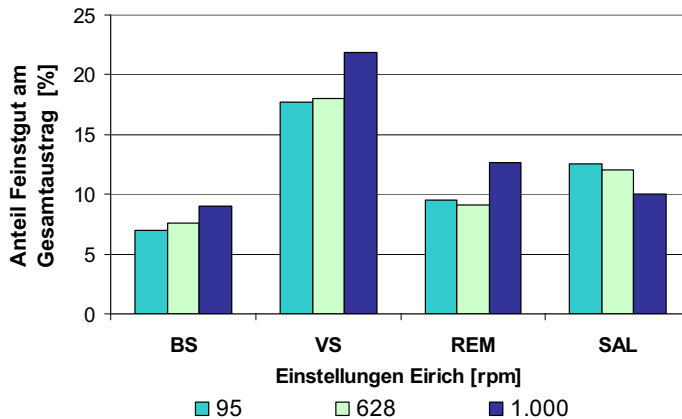


Abbildung 4.3: Anteil des Feinstgutes am Gesamtaustrag in Abhängigkeit von der Rührintensität des Eirichmischers, Mittelwerte der jeweiligen Versuchsserien

Weiterhin wurde zur Bewertung des Aufschlussgrades der Gehalt an säurelöslichen bzw. säureunlöslichen Bestandteilen im Ausgangsmaterial und in den Austragsgütern Schwergut, Leichtgut und Feinstgut der Versuchsserien BS, VS und REM herangezogen. Nachfolgend zeigt Abbildung 4.4 eine Übersicht über die Mittelwerte des Feinstgutaustrages der Versuchsserien BS, VS und REM in Abhängigkeit von der Rührintensität des Wirblers des Misch- und Aufschlussaggregates. Gleichzeitig ist dargestellt, wie sich das Feinstgut aus Zementstein und Zuschlagskörnung zusammensetzte.

In der Abbildung ist zu erkennen, dass mit der Erhöhung der Austragsmenge des Feinstgutes nicht nur mehr Zementsteinanteile, sondern auch mehr Naturstein mit dem Feinstgut ausgetragen wurde. Der relative Anteil des Zementsteins im Feinstgut ist unabhängig von der Rührintensität annähernd gleichbleibend, bzw. beim Material VS sogar tendenziell abnehmend. Eine Korrelation zwischen der Rührintensität des Wirblers im Aufschlussaggregat und Zementsteinanreicherung im Feinstgut konnte nicht festgestellt werden.

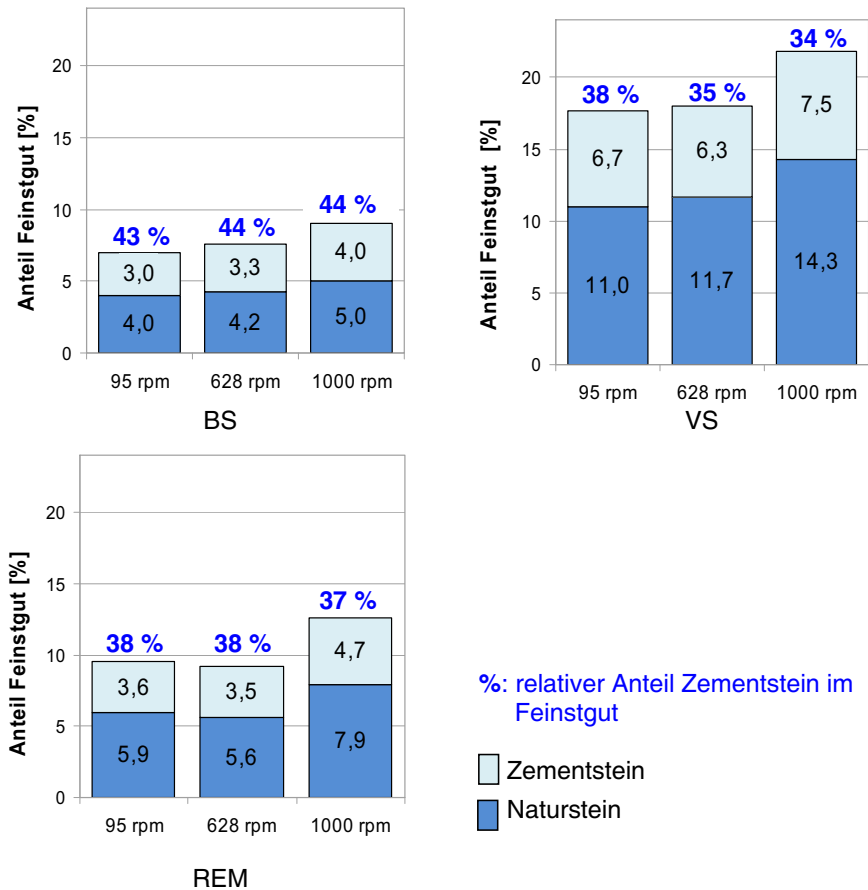


Abbildung 4.4: Zement- und Naturstein im Feinstgut, anteilig am Gesamtaustrag in Abhängigkeit von der Rührintensität des Mixers, Mittelwerte der Versuchsserien BS, VS und REM

Als weiterer Einflussfaktor beim Aufschluss wurde die Auswirkung der Einstellung des zum Wirbler gegenläufigen Drehtellers untersucht. Die Variationsmöglichkeiten waren mit 20 oder 40 Umdrehungen pro Minute vorgegeben. Ein Einfluss der unterschiedlichen Rotationsgeschwindigkeiten des Drehtellers auf die prozentuale Menge und den Zementsteingehalt des Feinstgutes konnte nicht festgestellt werden. In einem ergänzenden Versuch wurden durch die vollständige Öffnung des Mischeraustrags die Verweilzeit des Untersuchungsmaterials und der Energieeintrag des Mischaggregates minimiert. Der Zementsteingehalt des so gewonnenen Schwergutes hatte jedoch die gleiche Größenordnung wie in den Vergleichsmaterialien, die bei ansonsten gleichen Anlageneinstellungen einer deutlich höheren mechanischen Belastung im Mischer ausgesetzt waren.

Durch Veränderungen der Betriebsparameter des Aufschlussaggregates konnte die Abrasion der Bindemittelmatrix von Natursteinkörnern bei den eingesetzten Betonbrechsanden nicht wesentlich beeinflusst werden. Der durch die erhöhte Geschwindigkeit des Rotationswerkzeugs induzierte höhere Feinstgutaustrag korrelierte nicht mit einem erhöhten Anteil an Zementstein in dieser Materialart. Vielmehr konnte teilweise sogar ein nicht beabsichtigter Anstieg des Natursteingehaltes im Feinstgut festgestellt werden. Der erhöhte mechanische Energieeintrag durch das Rotationswerkzeug führte bei einem Teil der Versuche offensichtlich zum verstärkten Bruch von leichter brech- und spaltbaren Natursteinkörnern, wodurch sich das Verhältnis Naturstein zu Zementstein vergrößerte.

Gleichzeitig führte eine Erhöhung der Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers auch zu einer erhöhten Energieaufnahme des Aufschlussaggregates. Der Energieverbrauch der Gesamtanlage während einer Messfahrt mit einer Rotationsgeschwindigkeit des Wirblers im Eirichmischer von 1000 rpm lag im Durchschnitt um 13 % über der Energieaufnahme der Anlage einer vergleichbaren Messfahrt mit einer Wirblergeschwindigkeit von 95 rpm. Die deutliche Erhöhung des Verbrauchs an elektrischer Energie führte nicht zu einer entsprechenden Verbesserung der Qualität des Schwergutes.

Der über die Masse des befüllten Eirichmischers gesteuerte Austrag des Materialstroms aus dem Aufschlussaggregat im Batchbetrieb erfolgte unregelmäßig. Dies hatte zur Folge, dass auch die Beschickung der nachfolgenden Prozessaggregate mit dem Materialstrom Schwankungen unterlag. Dies beeinflusste auch die Ausbildung des Setzbettes negativ. In Abbildung 4.5 ist die Aufzeichnung von Sollsetzbethöhe, tatsächlicher Setzbethöhe und dem Gewicht des Eirichmischers für die Versuche BS 92 und BS 93 dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass es durch die unregelmäßigen Austräge des Eirichmischers mit einer geringfügigen Zeitverzögerung zu deutlichen Schwankungen in der Setzbethöhe kommt.

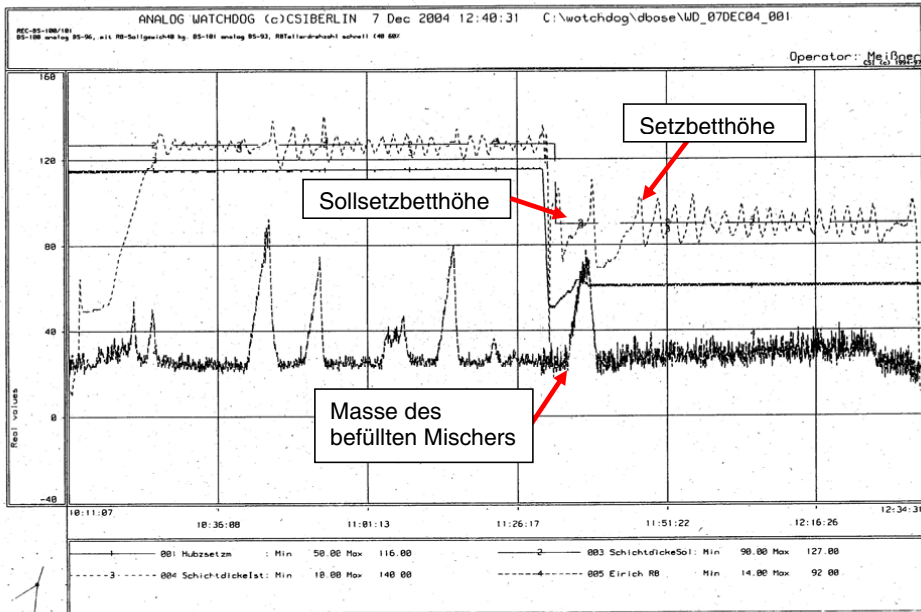


Abbildung 4.5: Protokoll einer Messwerterfassung: obere Linien: Sollsetzbethöhe und tatsächliche Setzbethöhe, untere Linie: Messwerterfassung des Mischers, Serie BS, Versuchsfahrten 92 und 93

4.1.3 Anlagentechnik – Trennwirkung der Setzmaschine

Mit unterschiedlichen Anlageneinstellungen wurde der Einfluss der einzelnen Steuerungsparameter der luftgepulsten Setzmaschine auf die Austragsmengen und die Materialeigenschaften der Austragsgüter untersucht.

Die Austragsmengen wurden über das Zusammenwirken der Steuerungsparameter Setzbethöhe, Setzfrequenz, Druckluftzufuhr bzw. Hubhöhe und Schwimmersteuerung bestimmt. Mit der Einstellung der Schwimmersteuerung durch Justierung des Schwimmergegengewichtes kann das Verhältnis der Austragsgüter grob eingestellt werden. Eine Bewegung des Gegengewichtes um 3 Einheiten (siehe Tabelle 3.3) bzw. 6 cm in Richtung der Austragsöffnungen führte bei ansonsten gleichen Einstellungen zu einer Erhöhung des Leichtgutaustrags um den Faktor 4 bzw. auf über 60 % des Gesamtaustrags. Die Schwergutaustragsmenge wurde entsprechend reduziert. Eine Feineinstellung des Masseausbringens erfolgte über die anderen Parameter.

Einen deutlichen Einfluss auf die Austragsmengen hatte die Einstellung der Setzbethöhe, sie variierte in den Versuchen zwischen 80 und 140 mm. Eine Erhöhung des Leichtgutaustrages und damit entsprechend eine Verringerung der Schwergutaus-

tragsmenge wurde mit einer Erhöhung der Setzbethhöhe – bei ansonsten gleichen Einstellungen – erzielt. Dies ist damit zu erklären, dass der Austrag des Leichtgutes über einen Überlauf am Ausgang der Setzmaschine erfolgt und daher direkt von der Setzbethhöhe abhängt. Schon eine Erhöhung des Setzbettes um 4 mm hatte eine Zunahme der Leichtgutmenge um ca. 10% der Gesamtaustragsmenge zur Folge.

Eine verstärkte Druckluftzufuhr führte zu einer Vergrößerung der Hubhöhe und damit ebenfalls zu einem höheren Setzbett. Dies wiederum führte entsprechend auch zu einer Erhöhung des Leichtgutaustrages. Der Schwergutaustrag wurde analog verringert. Die Erhöhung der Setzfrequenz bei gleichen Einstellungen führte wiederum zu einer leichten Erhöhung des Schwergutaustrages, da das Setzbett durch die schnellere Abfolge der Impulse bei ansonsten unveränderten Einstellungen kompakter aufgebaut wurde.

Die in dieser Arbeit untersuchten Betonbrechsande wiesen nur geringe Stör- oder Fremdstoffanteile auf. Die durch Dichtesortierung zu trennenden Korngemische bestanden nahezu ausschließlich aus Natursteinkörnern sowie Betonpartikeln mit unterschiedlichen Zementsteinanteilen. Im Gegensatz zu den meisten Anwendungen der Setztechnik in der Bauschutttaufbereitung war das Ziel der Dichtentrennung in dieser Arbeit daher auch nicht die Entfernung von leichten Störstoffen, sondern die Separierung eines Schwergutes mit einem möglichst hohen Anteil an Natursteinkörnung.

Die in die Setzmaschine aufgegebenen Körnungen enthielten als natürliche Körnungsbestandteile überwiegend Granite und Quarzite, deren Kornrohichte zwischen $2,60 \text{ g/cm}^3$ und $2,65 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Bei einem vollständigen Aufschluss der Körnungen und einer angenommenen Dichte des Zementsteins von $1,6 \text{ g/cm}^3$ würde der nach Taggart (Gleichung 2.1) berechnete Quotient

$$q = \frac{2,62 - 1}{1,6 - 1} = \frac{1,62}{0,6} = 2,7$$

betragen. Damit wäre das Gemisch aus Natursteinkörnung und Zementstein als sortierbar durch Dichtentrennung mittels Setztechnik für Korngrößen $> 100 \mu\text{m}$ einzustufen (siehe Kapitel 2.4.5).

Das zu trennende Gut bestand jedoch nicht aus einem Zweistoffgemisch, sondern aus einem Mehrstoffgemisch von Betonpartikeln mit unterschiedlich großen Zementsteinrestanhaftungen und entsprechend einer von der Variation der Zementsteingehalte abhängigen Dichteverteilung. Der Mittelwert der Reindichtemessungen des Ausgangsmaterials BS betrug $2,51 \text{ g/cm}^3$. Als durchschnittliche Kornrohichte wurde $2,06 \text{ g/cm}^3$ ermittelt. Im Aufbereitungsprozess wurden mit der Abtrennung des Feinstgutes in der Regel zwischen 15 % und 20 % des gesamten Zementsteins ausgetragen

(Mittelwert BS 16,7 %). Da nahezu alle verbliebenen Körner Restzementanhaftungen aufwiesen, kann die Kornrohichte der Einzelkörner als zwischen 1,8 und 2,4 g/cm³ liegend abgeschätzt werden. Der Quotient q für die Sortierbarkeit eines Korngemisches mit diesen Dichteunterschieden läge entsprechend mit 1,75 in einem Grenzbereich, in dem die Setzsartierung bei Körnungen bis zu 200 μm herab möglich ist. Die Rohdichten der meisten Einzelkörner bewegen sich jedoch vermutlich in einem engeren Dichtespektrum. Schon bei einem Zweistoffgemisch von Körnern mit einer Rohdichte von 1,9 und 2,3 g/cm³ würde der Quotient q nur 1,4 betragen. Dies würde auch bei Körnungen $> 1,5$ mm nur einen mäßigen Trennerfolg bedeuten.

Weiterhin ist aufgrund der offenen Porosität von rezyklierten Gesteinskörnungen davon auszugehen, dass die untersuchten Betonbrechsande im Verlauf der vorangegangenen Nassaufbereitungsschritte Prozesswasser aufgenommen haben. Diese zusätzliche Wasseraufnahme führt zu einer Erhöhung der jeweiligen Kornrohichten und damit entsprechend zu einer Verringerung des Quotienten q . Da dieser Effekt bei Körnern mit einer höheren Porosität (d.h. einer anfänglich niedrigeren Kornrohichte) ausgeprägter ist als bei Körnern mit niedrigerer Porosität (d.h. anfänglich höherer Kornrohichte), würden sich die Dichteunterschiede infolge der Wasseraufnahmen zusätzlich verringern und damit die Trennbarkeit der Korngemische weiter erschweren.

Eine Verbesserung der Sortierbarkeit durch die Entwicklung einer autogenen Schwertrübe mit einer Dichte von 1,2 bis 1,4 g/cm³ [148] infolge der Anreicherung von Feinstpartikeln im Fluid erfolgte im untersuchten Aufbereitungsverfahren nicht. Durch die für die Prozesswasserkreislaufführung notwendige Abtrennung und Entfernung des Feinstgutes < 100 μm kam es nicht zur Ausbildung einer Schwertrübe. Die Dichtebestimmungen des Prozesswassers zeigten auch über den Verlauf von acht Versuchen nur geringe Schwankungen der Dichte des Fluids in der Größenordnung von 10^{-4} g/ml, wobei keine Abhängigkeit von den jeweils eingestellten Parametern einer Versuchsfahrt erkennbar war.

4.2 Chemisch-physikalische Untersuchungen der Körnungen

4.2.1 Auswertung der Siebanalysen

Korngrößenverteilung

Im Verlauf des Setzprozesses kam es neben der Dichtesortierung immer auch zu einer Klassierung der Gesteinskörnungen. Die beim Setzprozess gewonnenen Austragsgüter Schwergut und Leichtgut wiesen zum Teil deutliche Unterschiede in der Korngrößenverteilung auf. Dabei waren in allen Versuchsserien die Schwergüter gröber als die Leichtgüter. Beispielhaft sind in Abbildung 4.6 die gemittelten Ergebnisse der Siebanalysen aller Versuchsfahrten der Serie BS dargestellt.

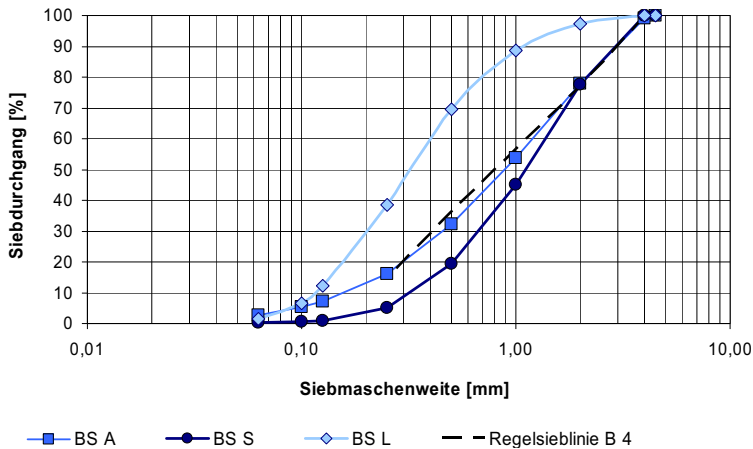


Abbildung 4.6: Korngrößenverteilung von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuchsserie BS, Mittelwerte von 117 Versuchsfahrten

Die Sieblinie des Ausgangsmaterials BS entsprach nahezu der generierten Regelsieblinie B 4. Die Körnung des Schwergutes ist gröber, die des Leichtgutes deutlich feiner. Während der Anteil der Körner $< 0,5$ mm im Ausgangsmaterial über 30 % beträgt, sinkt diese Fraktion im Schwergut auf einen Anteil von 20 %. Demgegenüber ist der Anteil an Körnern $< 0,5$ mm im Leichtgut auf fast 70 % angestiegen. Die Siebanalysen der anderen Versuchsmaterialien bieten ein ähnliches Bild, jedoch sind die Sieblinien der jeweiligen Ausgangsmaterialien weiter von der Regelsieblinie B 4 entfernt. Insgesamt wiesen die Leichtgüter stärkere Veränderungen der Korngrößenverteilungen auf als die jeweiligen Schwergüter. Die Abtrennung der Fraktion < 100 μm führte zu deutlichen Verlusten an Mehlkornanteilen bei den Austragsgütern, so dass eine stetige und gleichmäßige Sand-Siebkurve im Feinkornbereich vor allem bei den Schwergütern aller Versuchsserien nicht mehr gewährleistet war.

Bei allen Versuchsserien wurde eine Verringerung des mittleren Korndurchmessers (d_m) der Austragsgüter gegenüber den Ausgangsmaterialien festgestellt. Dazu wurde für alle Messfahrten ausgehend von den Sieblinien und den Massenanteilen der jeweiligen Austragsgüter S, L und F die Sieblinie und der mittlere Korndurchmesser für ein summiertes Austragsgut errechnet. Die Einzelergebnisse der Versuchsfahrten wurden für die jeweilige Versuchsserie gemittelt. Diese Berechnungen ergaben eine Verringerung des mittleren Korndurchmessers d_m zwischen 5,6 % (HAL) und 23 % (VS). In Tabelle 4.4 sind die Mittelwerte der Veränderungen der Korndurchmesser dargestellt. Für die Berechnungen wurde eine runde Kornform angenommen.

Tabelle 4.4: Mittlerer Korndurchmesser d_m der untersuchten Materialien vor und nach dem Aufbereitungsprozess

| | BS | VS | REM | SAL | HAL |
|----------------------------------|--------|--------|--------|-------|-------|
| Versuchszahl | 117 | 23 | 22 | 6 | 2 |
| d_m vor der Aufbereitung [mm] | 1,3 | 1,4 | 1,6 | 1,6 | 1,7 |
| d_m nach der Aufbereitung [mm] | 1,1 | 1,1 | 1,3 | 1,5 | 1,6 |
| Reduzierung des d_m [%] | - 11,6 | - 23,0 | - 19,6 | - 6,3 | - 5,6 |

In Abbildung 4.7 sind die Veränderungen innerhalb der Korngrößenverteilungen am Beispiel der Mittelwerte der Versuchsserien BS und REM vor und nach dem Aufbereitungsprozess dargestellt. Es ist gut zu erkennen, dass es infolge der Nassaufbereitung zu einer Anreicherung von Material in den Feinstgütern < 100 μm kommt. Aufschluss darüber, ob es sich hierbei um die beabsichtigte Anreicherung von Zementstein im Feinstgut handelt, geben die Bestimmungen der salzsäurelöslichen bzw. salzsäureunlöslichen Anteile in den einzelnen Fraktionen.

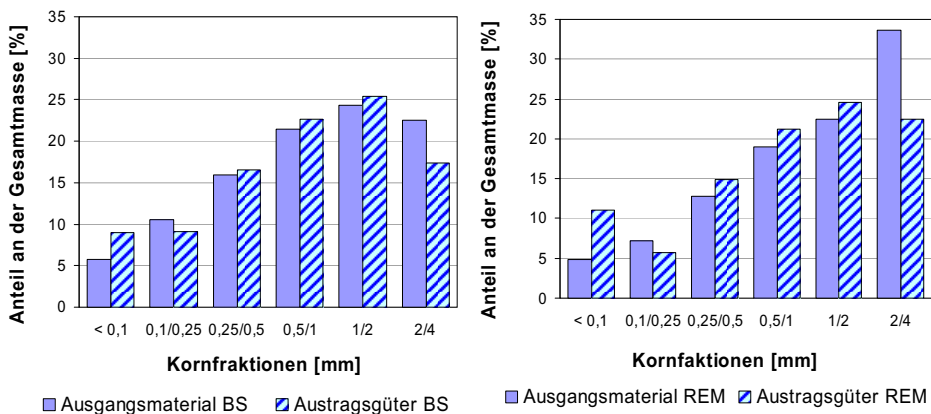


Abbildung 4.7: Massenanteile der Kornfraktionen von Ausgangsmaterialien und summierten Austragsgütern, Mittelwerte der Serien BS und REM

Körnungsziffern

Die Veränderung von Korngrößenverteilungen und mittlerem Korndurchmesser spiegelt sich auch in der Veränderung der Körnungsziffern k wieder. In Tabelle 4.5 sind die Mittelwerte der Körnungsziffern der Versuchsserien vor und nach der Aufbereitung sowie die prozentualen Veränderungen von Schwergut und Leichtgut im Verhältnis zum Aufgabematerial dargestellt.

Tabelle 4.5: Mittelwerte der Körnungsziffern k und prozentuale Veränderung des k-Wertes im Aufbereitungsprozess

| | BS | VS | REM | SAL | HAL |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|
| Versuchsanzahl | 53 | 10 | 14 | 6 | 2 |
| k-Wert Aufgabematerial | 2,05 | 2,57 | 3,08 | 2,54 | 2,81 |
| <i>k-Wert A korrigiert</i> | | 2,23 | 2,55 | | |
| k-Wert Schwergut | 2,49 | 2,54 | 2,62 | 3,07 | 3,07 |
| k-Wert Leichtgut | 1,01 | 1,56 | 1,88 | 1,70 | 2,22 |
| Δ k-Wert S [%] | 21,5 | -1,2 | -14,9 | 20,9 | 9,3 |
| <i>Δ k-Wert S korrigiert [%]</i> | | 13,9 | 2,7 | | |
| Δ k-Wert L [%] | -50,7 | -39,3 | -39,0 | -33,1 | -21,0 |
| <i>Δ k-Wert L korrigiert [%]</i> | | -30,0 | -26,3 | | |

Bei den Materialien VS und REM, deren Lieferkörnungen mit 0/5 mm angegeben wurden, waren die k-Werte der Ausgangsmaterialien größer als die der Schwergüter. Durch die Absiebung der Partikel > 4 mm durch das Fehlkornsieb der Versuchsanlage kam es zu deutlichen Veränderungen der k-Werte der Ausgangsmaterialien VS und REM vor den weiteren Aufbereitungsschritten. Da das Ausgangsmaterial jedoch vor der Mörtelherstellung nicht nochmals abgesiebt wurde, sind in Tabelle 4.5 die unkorrigierten k-Werte enthalten. Die Veränderung der durchschnittlichen Körnungsziffern k der untersuchten Materialien mit korrigierten Ausgangswerten bestätigen die Klassierung der Körnungen VS und REM durch den Setzprozess.

Abweichung von der Regelsieblinie B 4

Um die Veränderungen der Sieblinien zu erfassen, wurde aus der Regelsieblinie B 16 eine Regelsieblinie B 4 mit einem Größtkorn von 4 mm generiert. Die Abweichungen der Sieblinien (als Absolutbetrag der einzelnen Siebdurchgänge) von dieser Regelsieblinie (ΔRB_4) wurden für Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut aller Versuchsfahrten berechnet. Die zuvor beschriebenen Veränderungen der Korngrößenverteilungen der Austragsgüter bestätigten sich auch bei der Betrachtung der Abweichung ΔRB_4 (siehe Tabelle 4.6). Entsprechend waren die Werte der Leichtgüter deutlich höher, als die der Schwergüter. Sowohl die Standardabweichungen (s) als auch die relativen Standardabweichungen (Variationskoeffizienten VK) der Leichtgüter waren größer. Dies ist damit zu erklären, dass das Masseausbringen der Leichtgüter in Abhängigkeit von den Anlageneinstellungen wesentlich größere Schwankungsbereiche aufwies, als die ausgebrachten Massen an Schwergütern, die sich in der Regel zwischen 65 % und 85 % bewegten (vgl. Tabelle 4.1). Daher war für die Leichtgüter auch eine gute Kor-

relation zwischen den ΔRB_4 -Werten und dem Masseausbringen nachzuweisen, jedoch nicht für die Schwergüter.

Tabelle 4.6: Abweichung der Sieblinien der Materialarten Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut von der Regelsieblinie B 4 (ΔRB_4)

| Versuchszahl | BS 117 | | | VS 23 | | | REM 22 | | |
|--------------------------------|-----------|-----|-----|----------|----|-----|-----------|----|-----|
| | A | S | L | A | S | L | A | S | L |
| ΔRB_4 Mittelwert [%] | 12 | 41 | 113 | 21 | 35 | 65 | 69 | 47 | 56 |
| ΔRB_4 Minimum [%] | 9,3 | 15 | 18 | 5,7 | 17 | 8,4 | 49 | 16 | 12 |
| ΔRB_4 Maximum [%] | 21 | 75 | 202 | 34 | 93 | 140 | 121 | 95 | 137 |
| Standard- abweichung [%] | 2,3 | 9,6 | 40 | 7,8 | 15 | 35 | 16 | 17 | 41 |
| Variations- koeffizient [%] | 19,2 | 23 | 35 | 36 | 42 | 53 | 23 | 36 | 74 |

| Versuchszahl | SAL 6 | | | HAL 2 | | |
|--------------------------------|----------|-----|----|----------|-----|----|
| | A | S | L | A | S | L |
| ΔRB_4 Mittelwert [%] | 39 | 89 | 51 | 62 | 89 | 32 |
| ΔRB_4 Minimum [%] | 33 | 71 | 17 | 61 | 89 | 20 |
| ΔRB_4 Maximum [%] | 43 | 100 | 93 | 63 | 89 | 44 |
| Standard- abweichung [%] | 3,3 | 9,6 | 27 | 1,0 | 0,1 | 12 |
| Variations- koeffizient [%] | 8,4 | 11 | 52 | 1,6 | 0,1 | 37 |

4.2.2 Bestimmung säurelöslicher und säureunlöslicher Bestandteile

Die salzsäurelöslichen Bestandteile (SLB) und die salzsäureunlöslichen Rückstände (SUR) aller Versuchsmaterialien wurden als approximatives Maß für den Zementsteingehalt (SLB) und den Natursteingehalt (SUR) der Körnungen analysiert. Eine Auswertung der Versuchsserien BS, VS und REM zeigte in allen durchgeführten Versuchsfahrten die beabsichtigte Reduzierung des Zementsteingehaltes im Schwergut sowie eine Anreicherung im Leicht- und Feinstgut. Eine Übersicht über die Ergebnisse der Analysen ist in Tabelle 4.7 dargestellt.

Tabelle 4.7: Zementsteingehalte (SLB) von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Versuchsserien BS, REM und VS

| Versuchsanzahl | BS 117 | | | | VS 23 | | | | REM 22 | | | |
|---------------------------|-----------|-----|-----|-----|----------|-----|-----|-----|-----------|-----|-----|-----|
| | A | S | L | F | A | S | L | F | A | S | L | F |
| SLB [%] MW | 21 | 16 | 30 | 43 | 17 | 11 | 22 | 34 | 18 | 14 | 25 | 38 |
| SLB [%] Min | 19 | 14 | 21 | 23 | 14 | 10 | 12 | 25 | 16 | 8,6 | 19 | 29 |
| SLB [%] Max | 26 | 19 | 43 | 52 | 19 | 14 | 38 | 41 | 21 | 17 | 37 | 44 |
| Standardabweichung [%] | 1,4 | 1,0 | 4,8 | 4,7 | 1,0 | 1,2 | 6,1 | 3,3 | 1,1 | 1,8 | 6,2 | 4,4 |
| Variationskoeffizient [%] | 6,7 | 5,9 | 15 | 11 | 6,1 | 11 | 28 | 9,8 | 6,3 | 12 | 25 | 12 |

Die Zementsteingehalte in den verschiedenen Austragsgütern schwankten in Abhängigkeit von den Einstellungen der Versuchsanlage und dem Versuchsverlauf. Dies wird deutlich bei der Gegenüberstellung der Standardabweichungen (s) und der Variationskoeffizienten (VK) von Ausgangsmaterialien und den jeweiligen Schwergütern, Leichtgütern und Feinstgütern in Tabelle 4.7. Während die Zementsteingehalte der Ausgangsmaterialien sowie des Schwergutes BS geringe Schwankungen aufweisen, ist die relative Standardabweichung der Schwergüter REM und VS vergleichsweise hoch. Dies ist mit der unterschiedlichen Anzahl der Versuche zu erklären. Da beim Material BS 85 % der Versuche mit einem Schwergutaustrag über 65 % abgeschlossen wurden und zahlreiche Serien an Wiederholungsfahrten mit diesem Material durchgeführt wurden, fallen die Abweichungen geringer aus.

Eine Anreicherung des Zementsteinanteils in den Leichtgütern wurde in sämtlichen Versuchen nachgewiesen. Hier sind die relativen Standardabweichungen bei allen Versuchsserien deutlich höher. Ein Zusammenhang besteht vermutlich mit den stark differierenden Austragsmengen der Leichtgüter (siehe Tabelle 4.1 und Tabelle 4.3).

In Abbildung 4.8 sind die Mittelwerte der prozentualen Veränderungen der Zementsteingehalte in Bezug auf das jeweilige Ausgangsmaterial dargestellt. Es wird deutlich, dass sich der Zementsteingehalt der Feinstgüter bei diesen drei Versuchsserien mehr als verdoppelt hat. Dennoch werden aufgrund der vergleichsweise geringen Feinstgutaustragsmengen von im Mittel 8 % bzw. 10 % der Serien BS und REM nur 16 % bzw. 20 % der säurelöslichen Bestandteile mit dieser Materialart aus dem Prozess ausgetragen (vg. Kapitel 4.1.1). Der Feinstgutaustrag der Vorabsiebung VS von durchschnittlich 20 % führte entsprechend zu einem Austrag von 38 % der säurelöslichen Bestandteile des Ausgangsmaterials. Jedoch beinhaltet der Gehalt an säurelöslichen Bestandteilen dieser Serie nicht nur Zementstein, sondern auch gelöste Bodenanteile (siehe Kapitel 3.1).

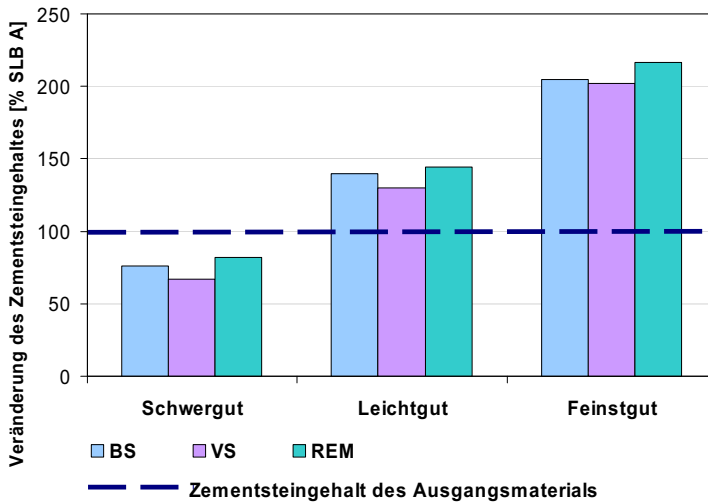


Abbildung 4.8: Prozentuale Veränderung des Zementsteingehaltes der Austragsgüter im Verhältnis zu den Ausgangsmaterialien, Mittelwerte der Serien BS, VS und REM

Für drei Versuchsfahrten des Brechsandes BS (BS 103, BS 117 und BS 119) sowie für eine Versuchsfahrt der Serie REM (REM 11) wurden SLB und SUR von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut zusätzlich auch Korngrößenabhängig bestimmt. Hierzu wurden das Ausgangsmaterial und die Austragsgüter in fünf Korngruppen zwischen 0 – 0,25 mm und > 2 mm unterteilt und analysiert. Auf der Basis der Siebanalysen dieser Versuche wurde mit den Zementsteingehalten der einzelnen Korngruppen der Zementsteingehalt der jeweiligen Materialart berechnet und mit den Direktbestimmungen der SUR und SLB des ungesiebten Materials verglichen. Diese Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung. Die Differenzen betragen maximal 3,25 % als Absolutbetrag des SUR-Gehaltes des ungesiebten Materials.

Eine Darstellung der Verteilung der Zementsteingehalte in den Korngruppen der Ausgangsmaterialien und der Schwer- und Leichtgüter der Materialien BS (Mittelwerte der drei untersuchten Versuche) und REM sowie die Verteilung der Korngruppen in der Materialart findet sich in Abbildung 4.9.

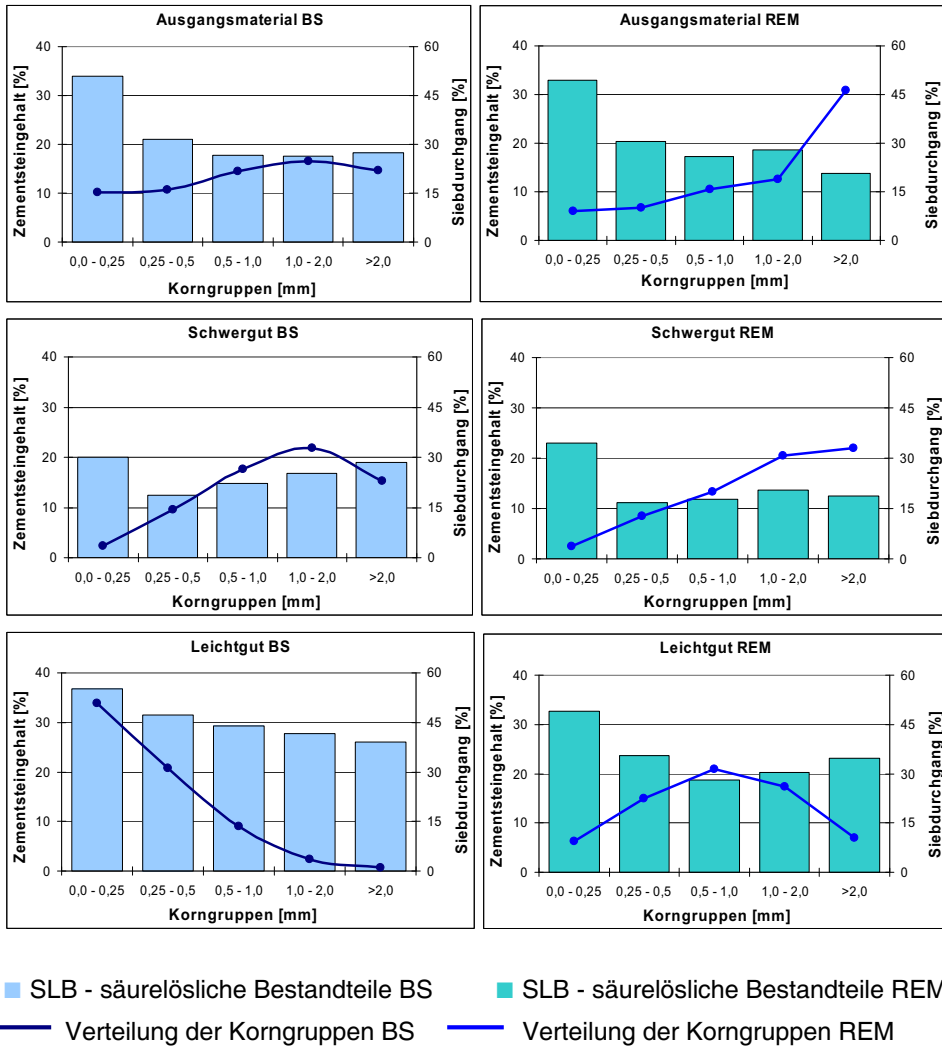


Abbildung 4.9: Verteilung der Zementsteingehalte in den Korngruppen von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serien BS (Mittelwerte der Versuchsfahrten BS 103, BS 117, BS 119) und REM (REM 11) sowie die Siebdurchgangslinien der Materialarten

Die Anreicherung von Zementstein in den Leichtgütern beider Versuchsmaterialien ist gut zu erkennen. Es ist ebenfalls deutlich, dass sich auch innerhalb jeder untersuchten Materialart ein vergleichsweise hoher Anteil an Zementstein in der feinsten Korngruppe, 0 – 0,25 mm, befindet. Mit der zuvor in Kapitel 4.2.1 beschriebenen Anreicherung von feinen Körnern in den Leichtgütern nach der Dichttrennung ist entsprechend auch ein höherer Gehalt an Zementstein im Vergleich zu den Schwergütern verbunden.

Der hohe Zementsteingehalt der Ausgangsmaterialien in der Korngruppe 0 – 0,25 mm ist mit dem noch vorhandenen Anteil an zementsteinreichen Körnern < 100 µm zu erklären, die durch die Klassierung mit dem Hydrozyklon abgetrennt werden.

In Abbildung 4.10 sind Zementsteingehalte von Schwergut und Leichtgut innerhalb der untersuchten Korngruppen der Versuchsserie BS dargestellt.

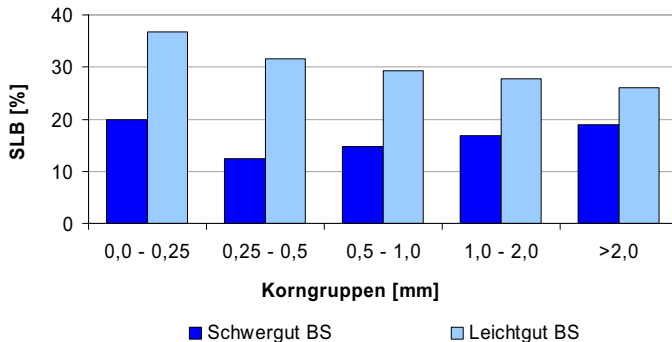


Abbildung 4.10: Zementsteingehalte von Schwergut und Leichtgut innerhalb der Korngruppen der Versuchsserie BS (Mittelwerte aus 3 Versuchen)

Dieser Vergleich der Zementsteingehalte von Schwergut und Leichtgut innerhalb der einzelnen Korngruppen zeigt, dass die Zementsteingehalte der Leichtgüter (26 %- 37 %) in jeder Korngruppe um 40 % bis 150 % über denen des jeweiligen Schwergutes (12 % - 20 %) lagen. Im Durchschnitt betrug die Differenz ca. 80 %.

Die größten Unterschiede waren in allen untersuchten Versuchsreihen in der Korngruppe 0,25 bis 0,5 mm zu verzeichnen. In dieser Korngruppe waren die Zementsteingehalte der Körnungen aus dem Leichtgut mehr als doppelt so hoch wie in den Körnungen der Schwergüter. Unabhängig von den aufgetretenen Klassierungseffekten ist die beabsichtigte Dichtentrennung im Rahmen des Setzprozesses eingetreten.

4.2.3 Wasseraufnahme der Körnungen

In allen untersuchten Austragsmaterialien konnte eine Verringerung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten (W_{A10min}) des Schwergutes sowie eine Erhöhung der W_{A10min} des Leichtgutes in Bezug auf das Ausgangsmaterial festgestellt werden. Die Wasseraufnahme des Leichtgutes VS wurde nicht bestimmt. Die beabsichtigte Verringerung der Wasseraufnahmen der Schwergüter wurde in jedem untersuchten Versuch der Versuchsserien BS, REM, VS und SAL erreicht. Obwohl die verschiedenen Schwergüter mit unterschiedlichen Versuchseinstellungen hergestellt wurden, ist die Streuung der Werte vergleichsweise gering. Eine Übersicht über die Ergebnisse der W_{A10min} -Messungen gibt Tabelle 4.8. Auf die Aufführung der Serien HAL und SAL wurde an

dieser Stelle verzichtet, da mit diesen Betonbrechsanden nur ein bzw. zwei Versuche durchgeführt wurden.

Tabelle 4.8: Wasseraufnahmen von Ausgangsgut, Schwergut und Leichtgut der Versuchsserien BS, REM und VS

| Versuchszahl | BS 53 | | | REM 14 | | | VS 10 | |
|--------------------------------|----------|-----|-----|-----------|-----|------|----------|-----|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| WA MW [%] | 7,5 | 5,4 | 11 | 5,4 | 4,0 | 8,0 | 7,4 | 3,6 |
| WA Min [%] | 4,7 | 2,3 | 5,1 | 3,4 | 3,1 | 5,4 | 5,7 | 2,7 |
| WA Max [%] | 12 | 8,0 | 16 | 6,5 | 4,9 | 13,1 | 8,9 | 4,2 |
| Standard- abweichung [%] | 2,1 | 1,3 | 4,0 | 0,8 | 0,6 | 2,3 | 1,2 | 0,5 |
| Variations- koeffizient [%] | 28 | 24 | 36 | 15 | 15 | 29 | 16 | 13 |

In Abbildung 4.11 sind die Mittelwerte der Wasseraufnahmen aller Versuchsserien im Vergleich dargestellt. Die nur geringe Abnahme der Wasseraufnahme des Schwergutes des Materials HAL im Vergleich zum Ausgangsmaterial ist vermutlich damit zu erklären, dass dieser Betonbrechsand zwei Nassaufbereitungsprozesse durchlaufen hat. Dies wäre auch eine Erklärung für die vergleichsweise geringe Wasseraufnahme des Ausgangsmaterials.

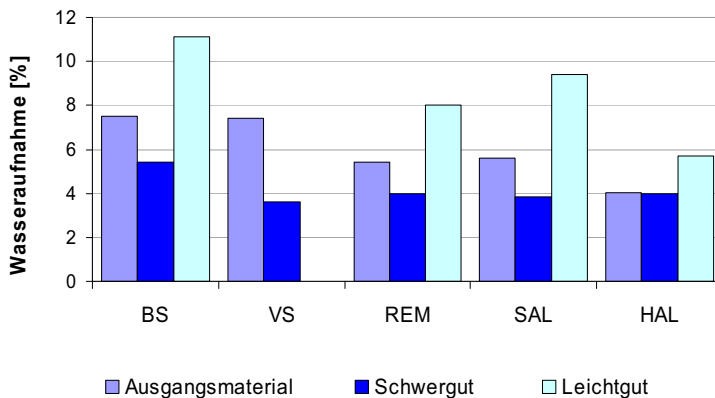


Abbildung 4.11: Wasseraufnahmen von Ausgangsmaterial und Austragsgütern aller Versuchsserien

Die in der Literatur beschriebene Abhängigkeit der Wasseraufnahme vom Zementsteingehalt der untersuchten Gesteinskörnungen konnte durch die Auswertung der SLB / SUR-Analysen der Untersuchungsmaterialien BS, REM und VS tendenziell bestätigt werden. Abbildung 4.12 zeigt den Zusammenhang zwischen der Wasseraufnahme und dem Zementsteingehalt dieser Materialien.

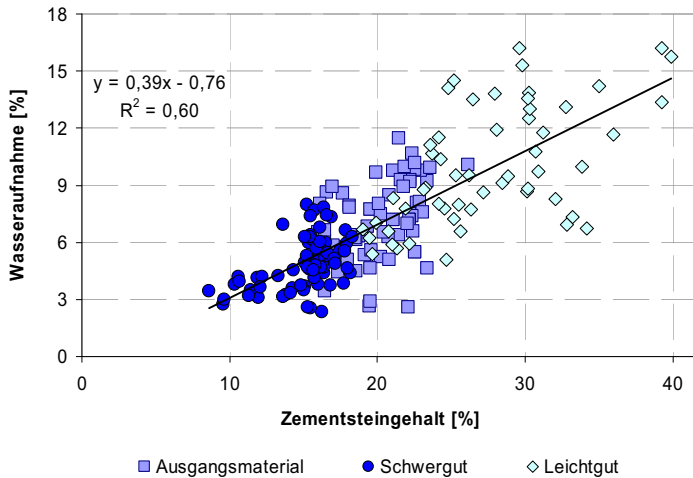


Abbildung 4.12: Wasseraufnahmen von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serien BS, REM und VS als Funktion des Zementsteingehaltes

4.2.4 Dichtebestimmungen

Von ausgewählten Versuchen mit den Materialien BS, REM und VS wurden die Rohdichte und die Reindichte von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut bestimmt. In allen untersuchten Versuchsreihen wurde die beabsichtigte Erhöhung der Reindichte im Schwergut sowie eine Reduzierung der Reindichte im zugehörigen Leichtgut erreicht. Die Mittelwerte der Messungen sowie die Standardabweichungen und die Variationskoeffizienten sind in Tabelle 4.9 aufgeführt. Eine Übersicht über alle Messwerte findet sich im Anhang (Tabelle A 23).

Die Erhöhung der Reindichte der Schwergüter im Vergleich zum jeweiligen Ausgangsmaterial lag bei allen Materialien zwischen 0,5 % und 3,5 %, die Reduzierung der Reindichte im Leichtgut lag im Bereich von 0,2 % bis 4,8 %. In Anbetracht der Veränderungen der Zementsteingehalte in den aufbereiteten Materialarten, ist davon auszugehen, dass die Dichteunterschiede durch Zementsteinanreicherungen im Leichtgut bzw. die Reduzierung der Zementsteingehalte im Schwergut bewirkt wurden. Die Veränderungen der Kornrohdsichten waren stärker ausgeprägt, da diese Werte sowohl von den Dichten der Mineralphasen im Zementstein und in den Natursteinkörnungen als auch von den Porositäten abhängen (Gl. 3.6). Die Streuung der Kornrohdsichten der Leichtgüter ist mit den Schwankungen der Zementsteingehalte und damit auch der

Porositäten im Leichtgut zu erklären. Dies wiederum beruht auf den vergleichsweise großen Unterschieden der Leichtgutaustragsmengen.

Tabelle 4.9: Mittelwerte von Rohdichten und Reindichten von Ausgangsgut, Schwergut und Leichtgut der Serien BS, REM und VS

| Versuchszahl | BS 18 | | | REM 7 | | | VS 2 | |
|---|----------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| Reindichte [g/cm ³] | 2,51 | 2,57 | 2,48 | 2,54 | 2,58 | 2,50 | 2,59 | 2,62 |
| Standardabweichung [g/cm ³] | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,02 | 0,01 | 0,03 | 0,00 | 0,02 |
| Variationskoeffizient [%] | 1,21 | 1,95 | 1,30 | 0,60 | 0,44 | 1,20 | 0,00 | 0,73 |
| Rohdichte [g/cm ³] | 2,06 | 2,25 | 1,94 | 2,13 | 2,29 | 2,07 | 2,05 | 2,36 |
| Standardabweichung [g/cm ³] | 0,03 | 0,03 | 0,10 | 0,04 | 0,04 | 0,12 | 0,01 | 0,00 |
| Variationskoeffizient [%] | 1,39 | 1,26 | 5,27 | 1,70 | 1,70 | 5,81 | 0,35 | 0,00 |

Abbildung 4.13 zeigt Kornrohden und Reindichten der untersuchten Materialarten des Brechsandes BS in Abhängigkeit vom Zementsteingehalt. Die Trendlinien für Kornrohden und Reindichten wurden in dieser Abbildung auf ein Natursteinmaterial ohne Zementstein extrapoliert. Nach dieser Extrapolation beträgt die Kornrohden des Natursteinmaterials 2,59 g/cm³, die Reindichte 2,63 g/cm³.

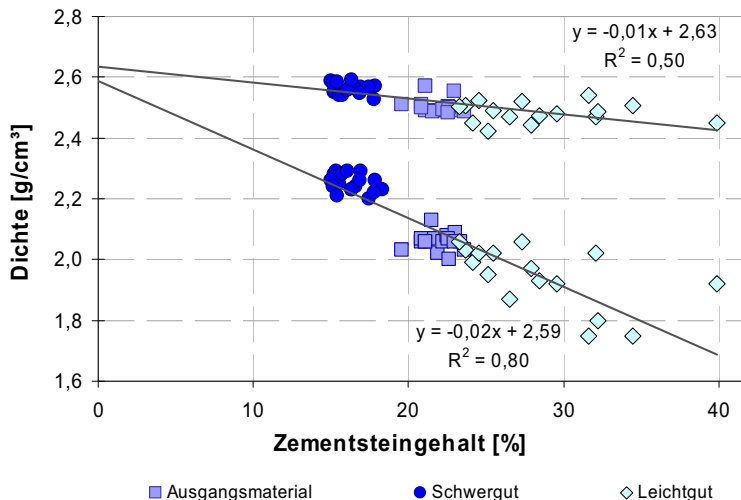


Abbildung 4.13: Reindichten (oben) und Rohdichten (unten) von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serie BS als Funktion des Zementsteingehaltes

Die Erhöhung der Kornrohdsichten der Schwergüter im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien lag zwischen 5 % und 15 %. Die Verringerung der Rohdichte der Leichtgüter der untersuchten Materialien betrug bis zu 15 % und lag bei durchschnittlich 5 %. In 10 % der Versuche war eine leichte Erhöhung der Kornrohdsichte (bis 1,5 %) des Leichtgutes zu verzeichnen. Dies könnte auf den Abrieb der Zementsteinmatrix während des Nassaufbereitungsprozesses zurückzuführen sein. Die Unterschiede der Kornrohdsichten von Schwergut und Leichtgut waren jedoch immer deutlich. Abbildung 4.14 zeigt die Kornrohdsichten der untersuchten Materialarten von BS, REM und VS in Abhängigkeit von den jeweiligen Zementsteingehalten.

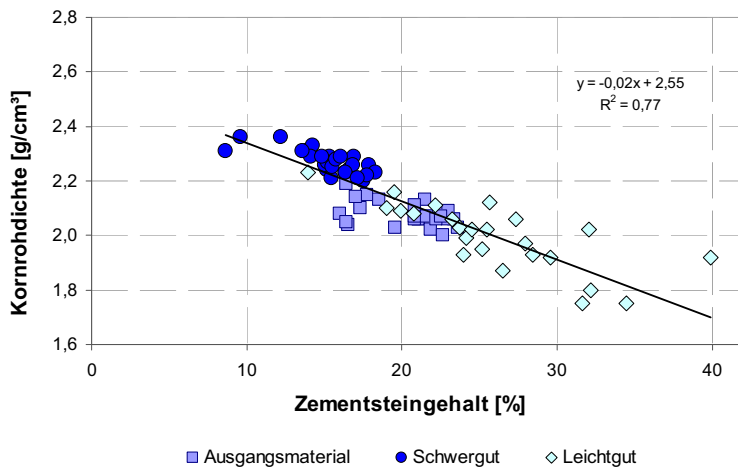


Abbildung 4.14: Kornrohdsichten von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serien BS, REM und VS als Funktion des Zementsteingehaltes

4.2.5 Porositätsbestimmungen

Die Auswertung der Porositätsmessungen an Körnern aus Ausgangsmaterialien und Schwergütern ergab kein einheitliches Bild. Obwohl sich eine Tendenz zur Verringerung von gemessenem Porenvolumen und Gesamtporosität der Schwergüter im Vergleich zu den jeweiligen Ausgangskörnungen abzeichnete, konnte dies nicht durch alle Messungen bestätigt werden. Auch die Verteilung der Porengrößen in den unterschiedlichen Proben bot kein einheitliches Bild. Aufgrund der geringen Anzahl an gemessenen Proben ist eine eindeutige Aussage über die Veränderungen der Porosität der Körnungen durch die Aufbereitung anhand der Quecksilberintrusionsmessungen nicht möglich.

Die Untersuchungen, die an aus gebrochenen RC-Mörteln hergestellten Körnungen durchgeführt wurden, boten ein einheitlicheres Bild. Die Körnungen aus RC-Mörteln wiesen erwartungsgemäß sowohl eine höhere Gesamtporosität als auch ein höheres Gesamtporenvolumen auf als die Körnungen aus den Referenzmörteln. Hierbei waren

die jeweils höchsten Werte den RC-Mörteln aus Leichtgut zuzuordnen. Ferner hatten die bei 4 mm abgeseibten Mörtel aus Ausgangsmaterial REM ein um ca. 30 % höheres Gesamtporenvolumen und eine um rund 12 % höhere Gesamtporosität als die unge-siebten Vergleichsmörtel mit einem Größtkorn von 5 mm. Auch hier ist aufgrund der begrenzten Probenanzahl eine genaue Auswertung der Ergebnisse nicht möglich.

Die Berechnung der Gesamtporosität auf Basis der Rohdichte und der Reindichtebe-stimmungen nach DIN 52102 für Proben der Materialien BS, VS und REM ergab ein eindeutigeres Bild. Während die Gesamtporosität der Schwergüter der untersuchten Versuchsreihen von drei Materialien durch den Aufbereitungsprozess um 30 % bis 54 % reduziert wurde, wiesen die entsprechenden Leichtgüter ein indifferentes Ver-halten auf. Sowohl ein Anstieg als auch eine Abnahme waren festzustellen. Tabelle 4.10 zeigt die Mittelwerte der Ergebnisse der Porositätsberechnungen.

Tabelle 4.10: Gesamtporosität von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut, Serien BS, VS und REM

| | BS | REM | VS |
|-------------------------------------|--------|--------|--------|
| Versuchsanzahl | 18 | 7 | 2 |
| Ausgangsmaterial [%] | 18,2 | 16,1 | 21,1 |
| Schwergut [%] | 12,5 | 11,0 | 9,8 |
| Leichtgut [%] | 21,9 | 17,4 | 18,1 |
| Veränderung S im Vergleich zu A [%] | - 30,0 | - 31,5 | - 53,6 |
| Veränderung L im Vergleich zu A [%] | 23,1 | 7,6 | - 14,1 |

Die Gesamtporosität korrelierte mit dem Gehalt an Zementstein in den Körnungen. In Abbildung 4.15 sind die Gesamtporositäten von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuchserie BS in Abhängigkeit vom Zementsteingehalt dargestellt.

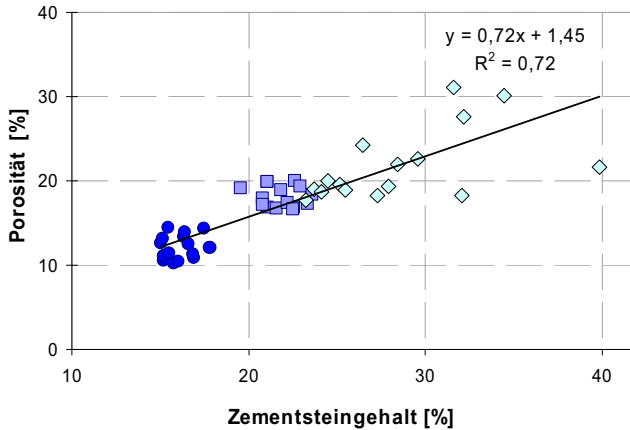


Abbildung 4.15: Gesamtporosität von Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serie BS als Funktion des Zementsteingehaltes

Da die Porosität von rezyklierten Gesteinskörnungen nahezu ausschließlich auf den Altzementsteingehalt zurückzuführen ist, war der mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,85$ deutliche Zusammenhang zwischen diesen beiden Größen zu erwarten.

4.2.6 Bestimmungen von Sulfat und Chlorid

Die Ergebnisse der Anionenbestimmungen aus Eluaten von Ausgangsmaterialien, Schwergütern und Leichtgütern der Materialien BS (38 Versuche), VS (8 Versuche) und REM (20 Versuche) zeigten, dass in den Eluaten nur vergleichsweise geringe Gehalte an wasserlöslichen Sulfaten und Chloriden enthalten waren. Dabei lagen die Gehalte an Chlorid und Sulfat in den Eluaten der untersuchten Leichtgüter in der Regel über denen der Schwergüter der gleichen Versuchsreihe und zumeist auch über den Gehalten der Ausgangsmaterialien.

Da der Austausch des Prozesswassers nicht nach jedem Versuch erfolgte, sind die gemessenen Einzelwerte nur unter Vorbehalt zu betrachten. In Abbildung 4.16 und Abbildung 4.17 sind die Mittelwerte der Sulfat- und Chloridbestimmungen aus den untersuchten 24-h-Eluaten dargestellt.

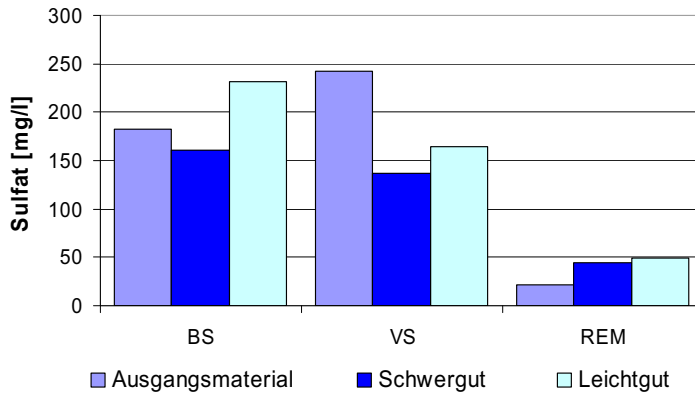


Abbildung 4.16: Mittelwerte der Sulfatgehalte in den 24-h-Eluaten von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Materialien BS (38 Versuche), VS (8 Versuche) und REM (20 Versuche)

Die Sulfatgehalte der untersuchten Leichtgüter des Vorabsiebmaterials VS, aus dem die Herstellung von Festmörtel aufgrund von mangelnder Verfestigung nicht möglich war, lagen im Bereich der Vergleichswerte anderer Materialarten. Sulfate waren daher nicht die Ursache für die unzureichende Festigkeitsausbildung der Mörtel. Es ist daher zu vermuten, dass sich erhärtungsstörende Substanzen wie beispielsweise organische Bodenbestandteile in diesem Material angereichert hatten.

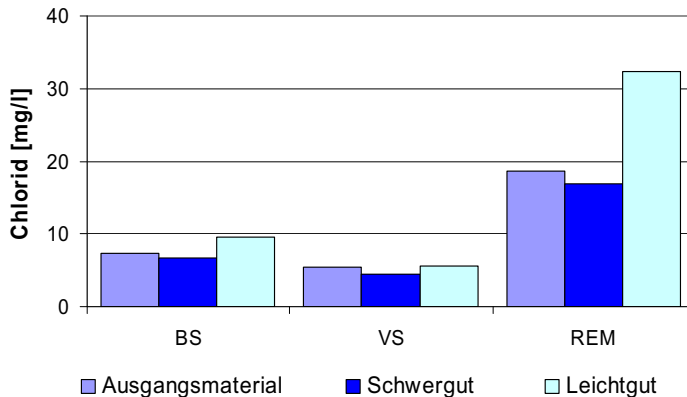


Abbildung 4.17: Mittelwerte der Chloridgehalte in den 24-h-Eluaten von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Materialien BS, REM und VS

Die Chlorid-Gehalte des aus dem Straßenrückbau stammenden Materials REM lagen zwar deutlich über den Werten der anderen untersuchten Sande, jedoch sind auch diese Gehalte in Bezug auf den gültigen Grenzwert von 150 mg/l (nach DIN 4226-100, Anhang G [13]) als niedrig einzustufen. Dies entspricht auch den Ergebnissen anderer Untersuchungen, in denen festgestellt wurde, dass die Sulfat- und Chloridgehalte rezyklierter Gesteinskörnungen aus Betonbruch die vorgegebenen Höchstwerte in der Regel nicht überschreiten [6, 107].

4.2.7 Untersuchungen zur Umweltverträglichkeit

Bei den fünf untersuchten Betonbrechsanden wurde durch die Aufbereitung eine Reduzierung schädlicher Inhaltsstoffe im Schwergut erreicht. Lediglich der Gehalt an Kohlenwasserstoffen und an Quecksilber im Schwergut des Materials SAL hatte sich erhöht. Dennoch liegt die Größenordnung des Kohlenwasserstoffgehaltes in einem Bereich, der als unbelastet einzustufen ist ($< Z 0$). Aufgrund des Quecksilbergehaltes kann die Einstufung des Materials als gering belastet ($< Z 1.1$) erfolgen. Schadstoffanreicherungen fanden wie erwartet im Feinstgut und teilweise im Leichtgut statt. Dies ist damit zu erklären, dass die Schadstoffakkumulation bei Bauschutt oder beispielsweise Boden an der Oberfläche der Körnungen und damit verstärkt in den feinen Fraktionen stattfindet. In der Aufbereitung von schadstoffbelastetem Boden oder Bauschutt kann diese Eigenschaft in günstigen Fällen auch genutzt werden, um durch einfache Absiebung der Sandfraktion die Schadstoffbelastung der Kies- oder Splittfraktion als Materialhauptstrom deutlich zu senken.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Umweltverträglichkeit des Schwergutes aller Versuchsmaterialien erwartungsgemäß – teilweise deutlich – verbessert wurde. Tabelle A 2 im Anhang gibt eine Übersicht über die Analysenergebnisse sowie über die Veränderung der Schadstoffgehalte der Austragsgüter Schwergut und Leichtgut im Verhältnis zum Aufgabegut.

4.2.8 Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie

Die Untersuchungen mittels Röntgendiffraktometrie wurden an Schwergut und Leichtgut der Versuchsserien BS und SAL sowie an einer Mischprobe der Feinstgüter durchgeführt. Die Auswertung der in den Proben röntgenographisch festgestellten Mineralphasen ist in Tabelle 4.11 aufgeführt. Neben Quarz wurde in allen untersuchten Proben auch Calcit, das herstellungsbedingt oder infolge der Karbonatisierung im Zementstein enthalten sein kann, als Hauptkomponente nachgewiesen. In den Proben der Serie SAL wurde zusätzlich noch Dolomit als Hauptkomponente festgestellt. In Abbildung 4.18 sind die Röntgendiffraktogramme von Schwergut und Leichtgut des Materials BS sowie einer Feinstgutmischprobe dargestellt. Alle drei Diffraktogramme wurden unter identischen Aufnahmebedingungen gemessen.

Tabelle 4.11: Auflistung der mineralogischen Phasen die in den Versuchsmaterialien BS und SAL röntgenographisch festgestellt wurden

| Mineralogische Phase | | BS | SAL |
|--------------------------|-----------|-------|-----|
| Quarz | | HK | HK |
| Feldspäte | Albit | + | kA |
| | Mikroclin | + | kA |
| | Orthoklas | m, ns | kA |
| Glimmer und Hydroglimmer | Muskovit | + | kA |
| | Biotit | + | kA |
| | Phlogopit | + | kA |
| Klinopyroxene | | + | kA |
| Tonminerale | Kaolinit | + | kA |
| Karbonate | Calcit | HK | HK |
| | Dolomit | - | HK |

HK = sicher identifizierte Hauptkomponente

+ = enthalten

m, ns = möglich, aber nicht sicher nachgewiesen wegen Reflexüberlagerungen

kA = keine Aussage aufgrund der sehr geringen Intensität der Reflexe dieser möglichen Nebenphase infolge der sehr hohen Masseanteile der beiden Karbonat-Phasen;

- = nicht enthalten

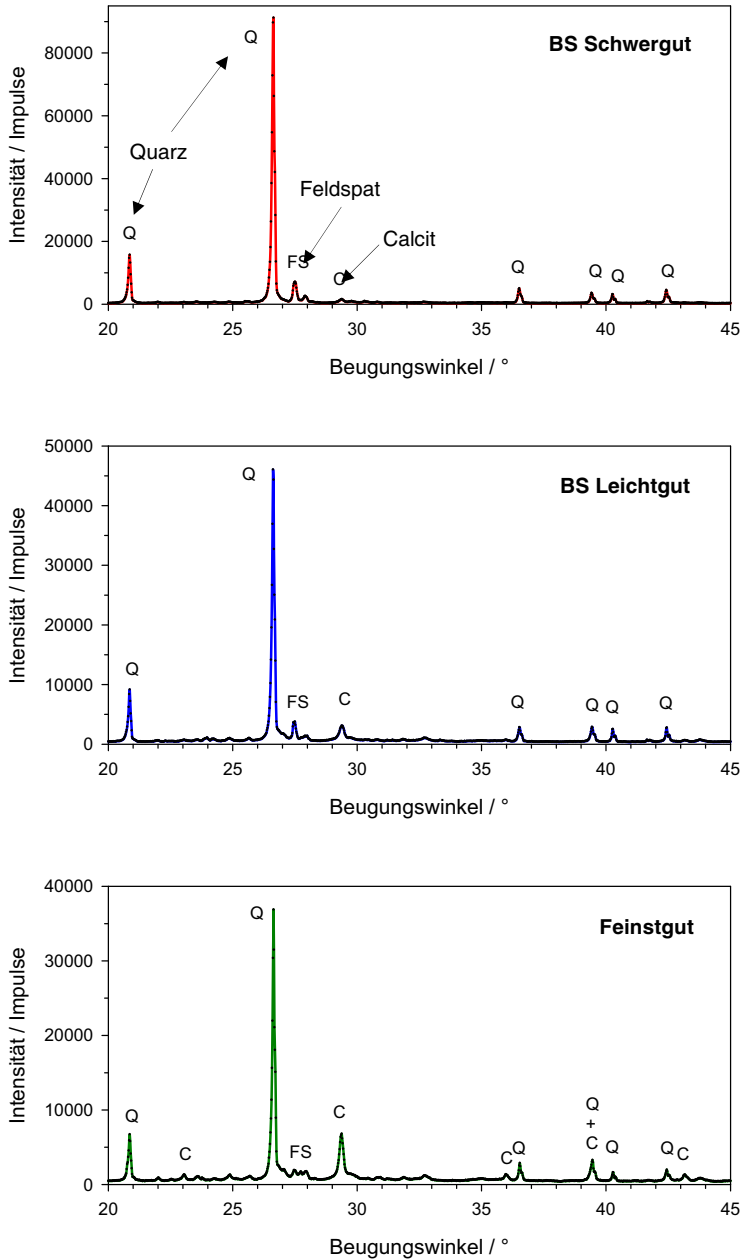


Abbildung 4.18: Ausschnitte aus den Röntgendiffraktogrammen von Schwergut und Leichtgut der Serie BS sowie einer Feinstgutmischprobe

4.3 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen

Von unterschiedlichen Versuchsfahrten der Serien BS, VS, REM und SAL wurden Stichproben aller Materialarten mittels Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenanalyse (ESEM / EDX) untersucht. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bestätigten wesentliche Punkte der zuvor beschriebenen, durch chemisch-physikalische Analysen ermittelten Unterschiede zwischen den Ausgangsmaterialien und den daraus nass aufbereiteten Materialarten. Zusätzlich konnten durch die Bildanalysen weitere Erkenntnisse in Bezug auf mineralogische Zusammensetzung, Kornform und Oberflächenbeschaffenheit der Körnungen gewonnen werden. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zwischen den Materialarten wurden die Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchungen beispielhaft an Proben aus einer Versuchsfahrt, BS 109, dargestellt.

In Tabelle 4.12 ist eine Übersicht über die mikroskopisch festgestellten Unterschiede zwischen den Materialarten dargestellt. Da nur ein geringer Teil der Gesamtproben mikroskopisch untersucht werden konnte, können die Veränderungen der Austrags-güter im Vergleich zum Ausgangsmaterial nur als Tendenzen dargestellt werden.

Tabelle 4.12: Veränderungen der Materialeigenschaften der Austrags-güter im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien

| | Schwergut | Leichtgut | Feinstgut |
|-----------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Zementsteingehalt | - | + | ++ |
| Feldspatgehalt | - | + | + |
| mittlerer Korn-durchmesser | + | - | -- |
| Anteil ungünstig geformter Körner | - | o/+ | + |

-- = deutliche Abnahme

- = leichte Abnahme

o = unverändert

+ = leichte Zunahme

++ = deutliche Zunahme

Zementsteingehalte

Erwartungsgemäß unterschieden sich die unterschiedlichen Materialarten auch bei den mikroskopischen Untersuchungen in Hinblick auf ihre Bindemittelgehalte. Die nass aufbereiteten Schwergüter zeigten im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien geringere Zementsteinanteile. In den untersuchten Leicht- und Feinstgütern waren entsprechend größere Anteile an Zementstein zu erkennen.

Abbildung 4.19 zeigt den Schnitt durch ein in Epoxidharz eingebettetes, unregelmäßig geformtes Betonbruchstück aus dem Ausgangsmaterial BS in 75-facher Vergrößerung. Das abgebildete Betonpartikel enthält ein Natursteinkorn, das nahezu komplett von Zementstein umgeben ist. In die Bindemittelmatrix sind einzelne, sehr feine Natursteinkörner oder -bruchstücke eingebettet. Am rechten Rand des Bruchstücks befindet sich ein weiteres nur teilweise mit Bindemittelmatrix bedecktes Natursteinkorn.

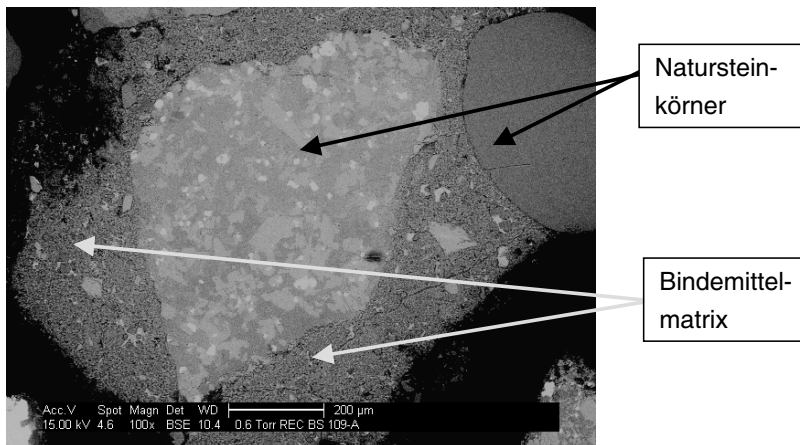


Abbildung 4.19: ESEM-Aufnahme eines Dünnschliffes aus Ausgangsmaterial, Versuch BS 109

Zum Vergleich ist in Abbildung 4.20 die ESEM-Aufnahme eines Dünnschliffes mit Körnern aus dem Schwergut des gleichen Versuchs dargestellt. Während in der rechten Hälfte des Bildes einige kleinere Natursteinkörner vollständig in Zementsteinmatrix eingebettet sind, sind in der linken Bildhälfte zwei Natursteinkörner zu sehen, an denen nur noch geringfügige Zementsteinanhaftungen zu erkennen sind.

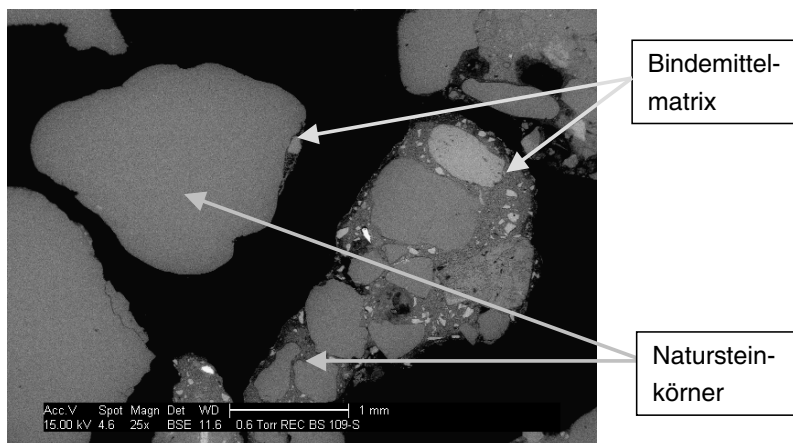


Abbildung 4.20: ESEM-Aufnahme eines Dünnschliffes aus Schwergut, Versuch BS 109

Die Stärke der Zementsteinmatrix auf der Natursteinkörnung war bei den einzelnen Betonpartikeln sehr unterschiedlich ausgeprägt. Eine Anreicherung von Körnern mit geringerem Anteil an Zementsteinmatrix konnte jedoch nur in den Schwergütern beobachtet werden. Neben Körnern, die vollständig von Zementsteinmatrix bedeckt waren, befanden sich in allen Proben auch Partikel, auf deren Oberflächen sich zementsteinfreie Bereiche befanden, die vermutlich durch mechanische Beanspruchung während des Abbruchs und der trockenen und/oder nassen Aufbereitung entstanden waren. Nur in den Schwergütern befanden sich Körner ohne oder nahezu ohne Zementsteinanhaftungen.

Korngröße und Kornform

Ebenso wie die Siebanalysen (vgl. Abbildung 4.6) zeigten auch die mikroskopischen Untersuchungen, dass die aufbereiteten Schwergüter im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien gröbere Körnungen aufwiesen während die Leichtgüter aus feineren Körnungen bestanden. Diese Größenunterschiede waren auch nach der Entfernung von anhaftender Zementsteinmatrix durch die Behandlung mit Salzsäure sichtbar.

Die Untersuchungen zeigten außerdem in allen untersuchten Materialarten Anteile an ungünstig geformten Körnern. Die Betrachtung der Körnungen nach der Behandlung mit Salzsäure ergab, dass die ungünstigen Kornformen nicht nur durch die an Natursteinkörnern anhaftende Zementsteinmatrix bedingt waren. Die nach der Entfernung der Bindemittelmatrix vorliegenden natürlichen Gesteinskörner wiesen in allen Materialarten ungünstig geformte Körner auf, an denen zum Teil auch Bruchkanten zu erkennen waren. Eine Tendenz zur Anreicherung günstig geformter Körner war in den Schwergütern festzustellen.

Mineralogische Zusammensetzung

Die Analyse der mineralischen Zusammensetzung von Betonbrechsanden und Vorabsiebung erfolgte sowohl an den Originalkörnungen als auch an Gesteinskörnern die zuvor mit Salzsäure gelaugt wurden. Da in allen nicht säurebehandelten Proben noch Zementsteinanteile vorhanden waren, erfolgte die Bewertung der Mineralphasen der Natursteinkörnungen überwiegend anhand der säurebehandelten Gesteinskörner. Das in den Materialien SAL und HAL vorhandenen Calcit wurde deshalb in der Auswertung nicht berücksichtigt.

Die in den untersuchten Materialien erfassten Minerale sind in Tabelle 4.13 dargestellt. Als gesteinsbildende Minerale wurden in allen Materialien Quarz und Feldspäte (überwiegend Orthoklas) vorgefunden. Die Materialarten des Betonbrechsandes SAL wiesen zudem noch Gehalte an Dolomit auf. Da die Untersuchungen der Sande nur an Stichproben durchgeführt werden konnten, war nur eine halbquantitative Bestimmung der Mineralzusammensetzungen möglich.

Tabelle 4.13: In den Versuchsmaterialien mittels Röntgenmikroanalyse (EDX) nachgewiesene Minerale

| Versuchsserie | Hauptbestandteile | vereinzelt nachgewiesen |
|---------------|---------------------------|--|
| BS | Quarz, Orthoklas | Plagioklase (Albit), Pyroxene, Tonminerale |
| REM | Quarz, Orthoklas | Plagioklase |
| SAL | Quarz, Orthoklas, Dolomit | Plagioklase |
| VS | Quarz, Orthoklas | Plagioklase, Tonminerale |

Mit zunehmender Feinheit der Körnung konnte in den untersuchten Sanden eine Tendenz zur Anreicherung von Feldspäten, die eine höhere Spaltbarkeit aufweisen, festgestellt werden. Entsprechend waren in den meisten Proben der Leicht- und vor allem der Feinstgüter höhere Anteile an Feldspäten festzustellen als in den vergleichsweise größeren Körnungen der Ausgangsmaterialien und Schwergüter.

Zur weiteren Identifizierung der Mineralphasen wurden EDX-Elementanalysen durchgeführt. Die Abbildungen 4.23 bis 4.25 enthalten beispielhaft die EDX-Elementverteilungsbilder von Proben aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut des Materials BS, Versuch 109. Es handelt sich um Körnungen, die in Epoxidharz eingebettet und anschließend angeschliffen wurden.

Abbildung 4.21 zeigt die EDX-Verteilungsbilder eines Ausschnittes des in Abbildung 4.19 dargestellten Betonbruchstücks. In der Bildmitte befindet sich ein vollständig in die Zementsteinmatrix eingebettetes Natursteinkorn, im rechten oberen Bildbereich ein weiteres teilweise in Zementstein eingebundenes Natursteinkorn. In der Abbildung der Siliziumverteilung, ist aufgrund des hohen Siliziumgehaltes des Natursteinkorns im rechten Bildbereich zu vermuten, dass es sich um ein Quarzkorn (SiO_2) handelt.

Das Natursteinkorn in der Bildmitte enthält neben Silizium auch Aluminium, was auf Minerale der Feldspatgruppe, entweder Orthoklas ($\text{K} [\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) oder Plagioklase ($(\text{Na}, \text{Ca}) [\text{Si}, \text{Al}_2] \text{Si}_3\text{O}_8$), deutet. Die Verteilung des Natriumgehaltes wiederum weist auf Vertreter der Plagioklase, dies wird durch den Calciumgehalt des Kornes bestätigt. Das gleichzeitige Vorhandensein von Natrium und Calcium ist kennzeichnend für Vertreter der Mischkristallreihe zwischen Albit ($\text{Na}[\text{AlSi}_3\text{O}_8]$) und Anorthit ($\text{Ca}[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_8]$).

Die Bindemittelmatrix weist wie erwartet einen hohen Gehalt an Calcium auf. Da die wichtigsten Verbindungen im Zementstein die Hydratphasen des Tricalciumsilicat (Alit, $3 \text{ CaO} \times \text{SiO}_2$), Dicalciumsilicat (Belit, $2 \text{ CaO} \times \text{SiO}_2$), Tricalciumaluminat (Aluminat, $3 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3$) und Tetracalciumaluminatferrit (Aluminatferrit, $4 \text{ CaO} \times \text{Al}_2\text{O}_3 \times \text{Fe}_2\text{O}_3$) sind, werden durch die Verteilungsbilder von Silizium und Aluminium auch diese Elemente nachgewiesen.

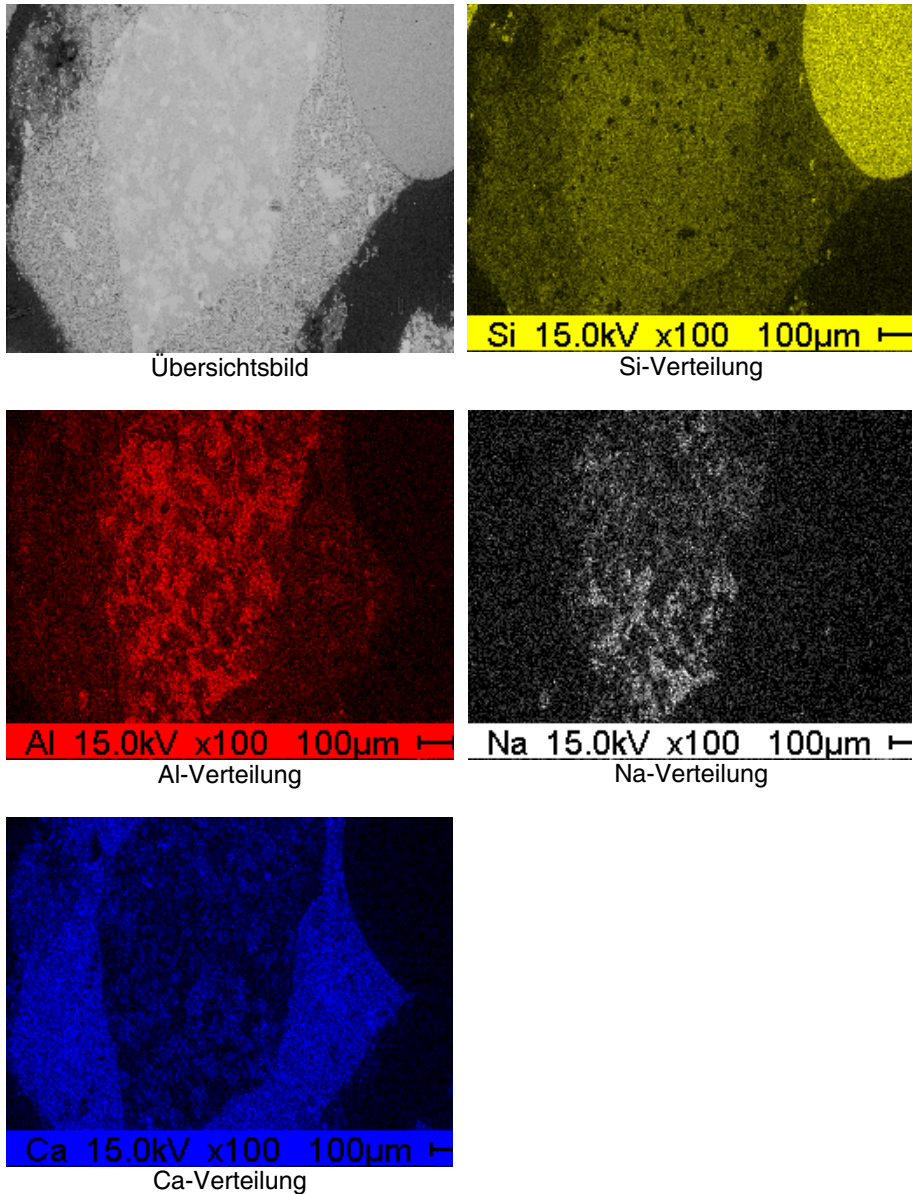


Abbildung 4.21: ESEM-Aufnahme eines Betonbruchstücks in einem Dünnschliff aus Ausgangsmaterial, Versuch BS 109, sowie zugehörige EDX-Elementverteilungsbilder von Si, Al, Na und Ca

Abbildung 4.22 zeigt den Dünnschliff eines Betonbruchstücks aus dem Schwergut BS des gleichen Versuchs 109. Die Abbildung zeigt verschiedene in die Bindemittelmatrix eingebundene Natursteinkörner bzw. eingebundene Bruchstücke von Natursteinkör-

nern. Im EDX-Verteilungsbild für Silizium ist zu erkennen, dass der überwiegende Teil der Körner (1, 2, 5) und der Kornbruchstücke die typisch hohen Siliziumgehalte von Quarz aufweist. Nur zwei Körner, 3 und 4, zeigen deutlich geringere Siliziumgehalte. Das EDX-Verteilungsbild von Aluminium, bestätigt in diesen Körnern wiederum Mineralphasen der Feldspatgruppe. Die Auswertung der Calciumverteilung zeigt, dass in den abgebildeten Natursteinkörnern keine deutlichen Calciumgehalte nachweisbar sind. Es ist daher zu vermuten, dass es sich bei den abgebildeten Feldspatkörnern um Albit oder Orthoklas handelt.

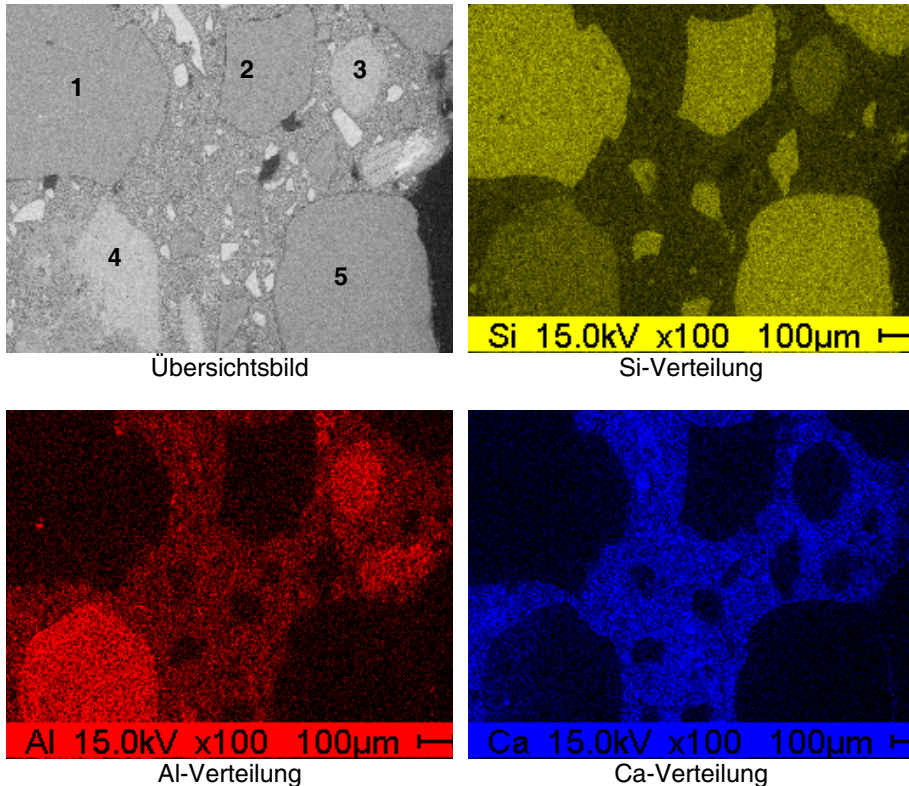


Abbildung 4.22: ESEM-Aufnahme eines Betonbruchstücks in einem Dünnschliff aus Schwergut, Versuch BS 109, sowie zugehörige EDX-Elementverteilungsbilder von Si, Al und Ca

Abbildung 4.23 zeigt eine ESEM-Aufnahme und EDX-Element-Verteilungsbilder von Körnern aus dem Leichtgut des Materials BS, Versuch 109, nach der Behandlung mit Salzsäure. Das Übersichtsbild zeigt mehrere große Körner bzw. Kornbruchstücke sowie flächig verteiltes feinkörniges Material. Anhand der Verteilungsbilder von Silizium, Sauerstoff, Aluminium, Kalium und Natrium ist zu erkennen, dass es sich bei den großen Körnern um Quarz sowie um Feldspäte mit unterschiedlichen Alkali – und Erd-

alkalianteilen handelt. Calcium war in den Körnungen nicht nachweisbar. Das feinkörnige Material zeigt neben einem hohen Siliziumgehalt auch hohe Aluminiumanteile. Dies deutet darauf hin, dass neben feinen Quarz- und Feldspatkörnern auch Tonmineralpartikel enthalten sind.

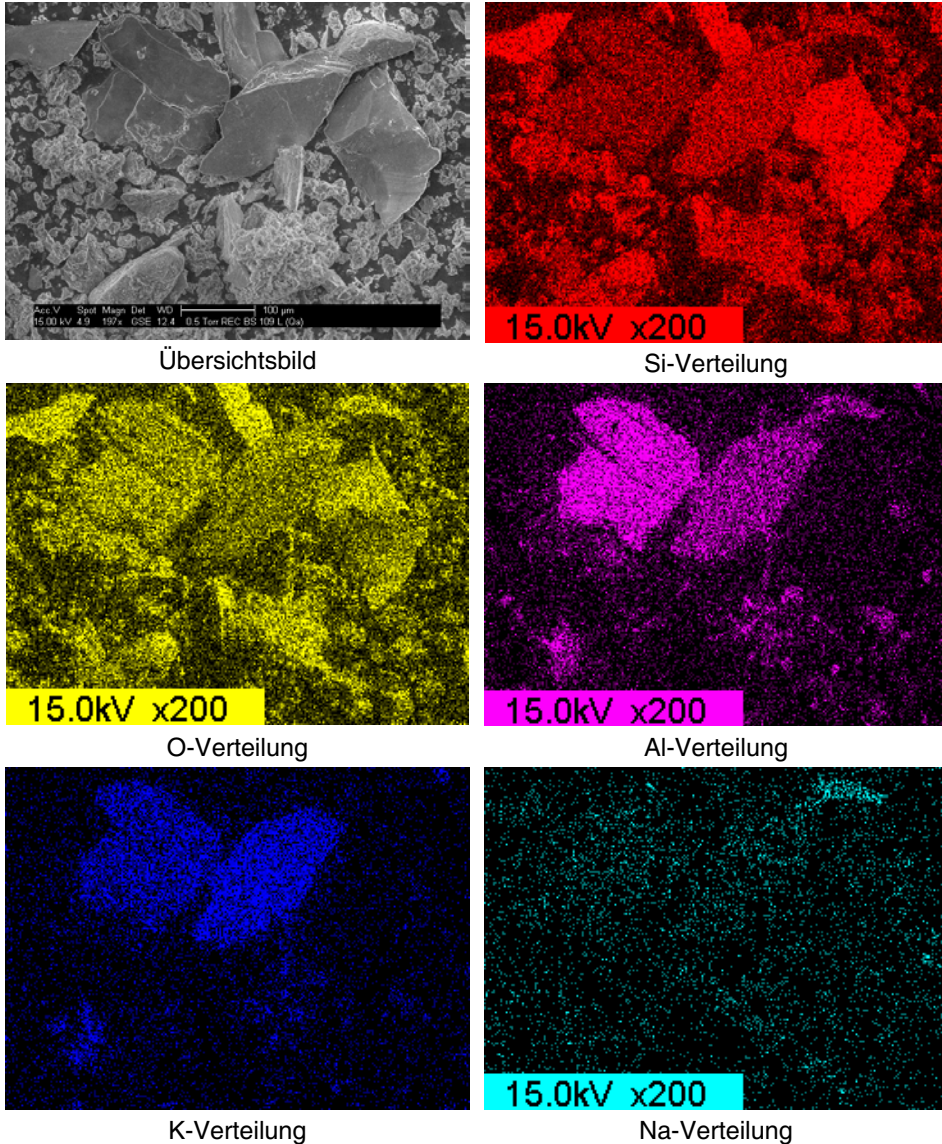


Abbildung 4.23: ESEM-Aufnahme von mit Salzsäure behandelten Körnern aus Leichtgut, Versuch BS 109, sowie zugehörige EDX-Elementverteilungsbilder von Si, O, Al, K und Na

Beschädigungen der Körner und Oberflächenbeschaffenheit

Bei allen untersuchten Proben konnten Beschädigungen und Brüche sowohl der Zementsteinmatrix als auch der Natursteinkörner festgestellt werden. Während bei einigen Betonpartikeln die mechanischen Belastungen während der Aufbereitungsprozesse zu Brüchen durch die Natursteinkörner führten, wurde bei anderen Körnern nur die Bindemittelmatrix beschädigt.

Abbildung 4.24 zeigt die Rissbildung in der Zementsteinmatrix zwischen zwei Natursteinkörnern in 350-facher (links) und in 600-facher Vergrößerung (rechts). Mittels EDX-Linienspektrum wurden die Körner als Quarzkörner identifiziert. Der rote Pfeil markiert einen Riss durch die Zementsteinmatrix, der jedoch nicht zum Bruch des Betonkorns führte. Die Quarzkörner sind noch weitgehend intakt.

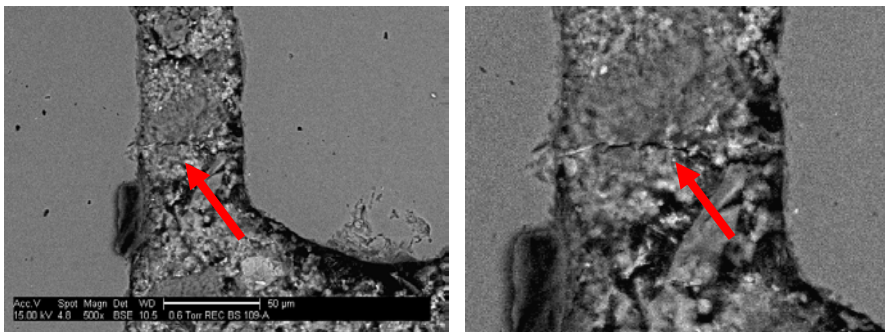


Abbildung 4.24: ESEM-Aufnahme eines Betonbruchstücks in einem Dünnschliff aus Ausgangsmaterial, Versuch BS 109 sowie Detailaufnahme eines Risses im Zementstein

Da die Oberflächenbeschaffenheit und Beschädigungen der Beton- und Natursteinkörner in Abhängigkeit von der mineralogischen Zusammensetzung der Proben verschieden stark ausgeprägt waren, konnten auch in dieser Hinsicht Unterschiede zwischen Ausgangsmaterialien und aufbereiteten Gütern festgestellt werden. Während Quarzkörner und Pyroxene nach der Behandlung mit Säure überwiegend glatte Bruchkanten aufwiesen, zeigten gebrochene Feldspatkörner zum Teil starke Zerklüftungen. Die Abbildung 4.25 zeigt ESEM-Aufnahmen von Körnern des Schwergutes des Materials BS, Versuch 109, nach der Behandlung mit Salzsäure. In der linken Abbildung sind Quarzkörner sowohl mit deutlichen Bruchkanten als auch unbeschädigte, gerundete Quarzkörner zu erkennen. Auf der linken Seite der Abbildung 4.25 befindet sich ein unbeschädigtes Quarzkorn. Die rechte Abbildung 4.25 zeigt ein Orthoklaskorn mit zerklüfteter Oberfläche und Bruchkanten. Das Korn ist erkennbar platt.

Aufgrund der Feinheit der untersuchten Körnungen lagen die Minerale sowohl im Verbund in den Gesteinskörnungen als auch als Körner aus einzelnen Mineralphasen, z.B.

als Feldspat- oder Quarzkörner, vor. Zur Verdeutlichung der Unterschiede zeigen die nachfolgenden Abbildungen überwiegend Körner, die aus einer Mineralphase bestehen.

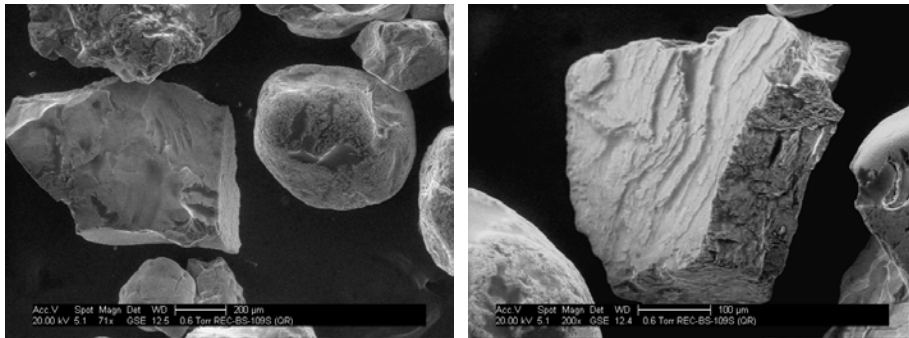
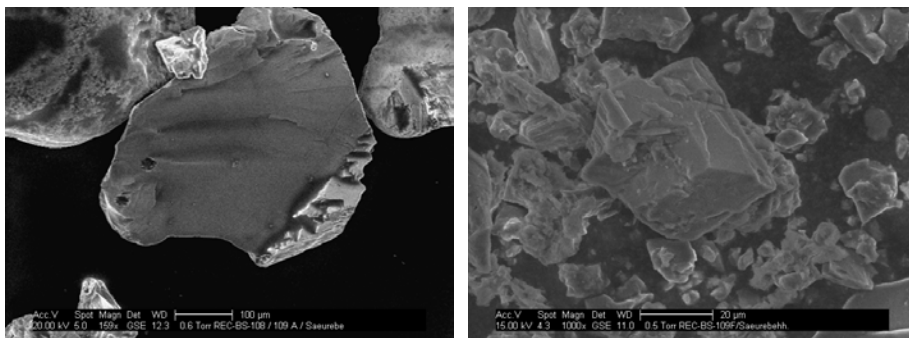


Abbildung 4.25: ESEM-Aufnahmen von mit Salzsäure behandelten Körnern (links Quarzkörner und rechts Feldspatkorn) aus Schwergut, Versuch BS 109

Körner der im Material BS ebenfalls vorgefundenen Pyroxen-Reihe zeigten bei Beschädigungen ebenso wie Quarzkörner glatte Bruchflächen und gedrungene Einzelkörner. In Abbildung 4.26 sind gebrochene Körner im Ausgangsmaterial und im Feinstgut des Materials BS, Versuch 109 dargestellt.



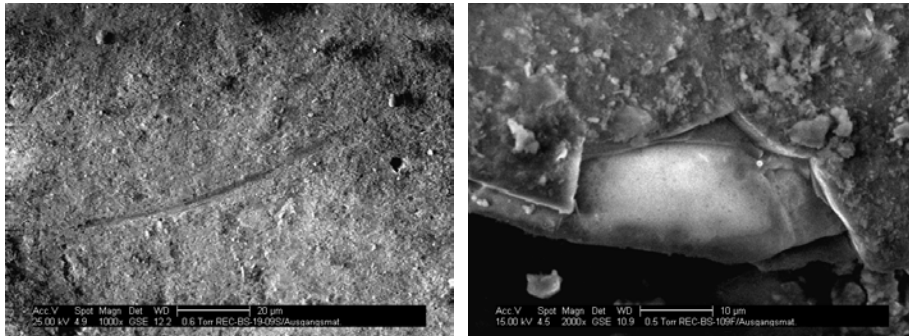
Pyroxenkorn

Klinopyroxenkörner

Abbildung 4.26: ESEM-Aufnahmen von mit Salzsäure behandelten Körnern aus Ausgangsmaterial (links) und Feinstgut (rechts), Versuch BS 109

Auch bei Körnern, bei denen die mechanischen Einwirkungen nicht zum Kornbruch geführt hatten, war die unterschiedliche Stabilität der Mineralphasen gegenüber

mechanischen Belastungen erkennbar. In Abbildung 4.27 sind Details aus nicht mit Salzsäure behandelten Körnungen mit Beschädigungen abgebildet.



Detail Quarzkorn

Detail Feldspatkorn

Abbildung 4.27: ESEM-Aufnahmen von Körnern aus Ausgangsmaterial (links) und Feinstgut (rechts), Versuch BS 109

Abbildung 4.27 zeigt die zerkratzte Oberfläche eines mit Zement bedeckten Quarzkorns des Ausgangsmaterials der Serie BS, Versuchsfahrt 109 (links) und die zerklüftete Kante eines angebrochenen Feldspatkorns aus dem Feinstgut des gleichen Versuchs (rechts). In der rechten Abbildung ist die zementfreie abgesplitterte Fläche des Feldspatkorns deutlich sichtbar.

4.4 Baustoffuntersuchungen

4.4.1 Ergebnisse der Mörteluntersuchungen

Frishmörteluntersuchungen

Die Konsistenz der Frishmörtel wurde anhand der Ausbreitmaße (a) nach 10 Minuten bestimmt. Tabelle 4.14 enthält eine Übersicht der Ergebnisse der Messungen der Ausbreitmaße.

Tabelle 4.14: Ausbreitmaße von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS

| Versuchszahl | BS 53 | | | REM 14 | | | VS 10 | |
|---------------------------|----------|-----|-----|-----------|----|-----|----------|-----|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| MW a [cm] | 44 | 44 | 38 | 45 | 46 | 41 | 39 | 50 |
| Min a [cm] | 26 | 32 | 29 | 32 | 11 | 28 | 30 | 42 |
| Max a [cm] | 70 | 59 | 51 | 56 | 55 | 55 | 49 | 59 |
| Standardabweichung [cm] | 11 | 6,5 | 7,8 | 6,4 | 11 | 6,7 | 6,2 | 5,0 |
| Variationskoeffizient [%] | 25 | 15 | 21 | 14 | 23 | 16 | 16 | 10 |

Die Ausbreitmaße der Mörtel aus Ausgangsmaterialien und Schwergütern lagen überwiegend im Bereich der Ausbreitmaßklasse F3 nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [120, 121], weich (42 – 48 cm), während die Frishmörtel aus Leichtgütern größtenteils der Klasse F2, plastisch (35 – 41 cm), zuzuordnen waren. Das Ausbreitmaß einiger Mörtel aus den Untersuchungsmaterialien konnte nicht bestimmt werden. Es handelte sich dabei überwiegend um Mörtel aus Leichtgut. Beim Betonbrechsand BS waren beispielweise 17 % der Mörtel aus Leichtgut, 10 % der Mörtel aus Ausgangsmaterial und 6 % der Mörtel aus Schwergut nicht auswertbar.

Obwohl eine Korrelation zwischen dem Gehalt an Zementstein in den Versuchsmaterialien, der daraus resultierenden zusätzlichen Wasseraufnahme und dem Ausbreitmaß nahegelegen hätte, war in den in dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen kein deutlicher Zusammenhang nachweisbar. Dennoch zeigte sich eine Tendenz zum stärkeren Ansteifen bei Frishmörteln aus Versuchsmaterialien mit einem höheren Zementsteingehalt, die vermutlich mit den größeren Messungenauigkeiten der Wasseraufnahmen bei Körnungen mit höherer Porosität (vgl. Tabelle 4.8) zu erklären ist.

Die Bestimmung der Luftgehalte der unterschiedlichen Frishmörtel nach zehn Minuten bot kein einheitliches Bild. Die Werte der aufbereiteten Versuchsmaterialien aus den Versuchsserien BS, VS und REM lagen im Mittel höher als die des jeweiligen Aus-

gangmaterials. Die Luftgehalte der Schwergüter der Serien SAL und HAL waren jedoch niedriger. Eine Übersicht über die Luftgehalte der Frischmörtel der Versuchsserien BS, REM und VS gibt Tabelle 4.15.

Tabelle 4.15: Luftgehalte von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS

| Versuchszahl | BS 53 | | | REM 14 | | | VS 10 | |
|---------------------------|----------|-----|-----|-----------|-----|-----|----------|-----|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| MW Luftgehalt [%] | 5,7 | 6,7 | 8,9 | 6,7 | 8,7 | 10 | 4,1 | 4,9 |
| Min Luftgehalt [%] | 1,2 | 2,0 | 1,6 | 2,5 | 5,4 | 6,4 | 3,0 | 2,8 |
| Max Luftgehalt [%] | 9,5 | 13 | 16 | 11 | 13 | 13 | 5,4 | 6,0 |
| Standardabweichung [%] | 2,5 | 2,5 | 2,8 | 2,6 | 2,4 | 1,6 | 0,6 | 1,2 |
| Variationskoeffizient [%] | 44 | 37 | 31 | 39 | 28 | 16 | 15 | 24 |

Im Mittel lagen die gemessenen Luftgehalte der Leichtgüter einheitlich bei allen Materialien über denen der Schwergüter. Eine Darstellung der Mittelwerte der Luftgehalte der Frischmörtel findet sich in Abbildung 4.28.

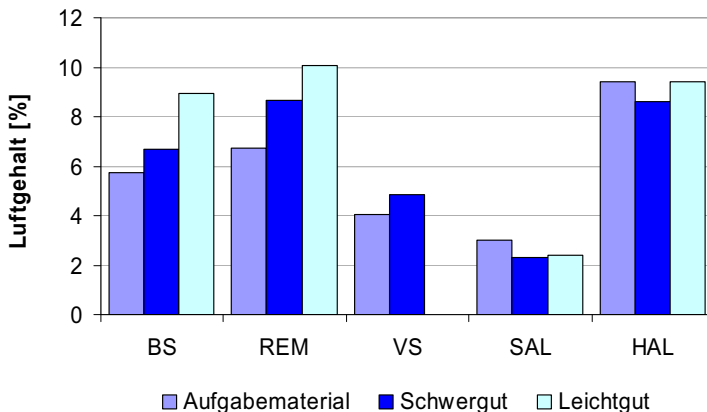


Abbildung 4.28: Vergleich der Mittelwerte der Luftgehalte von Materialarten aller Versuchsserien

Mit Ausnahme der Werte des Versuchsmaterials SAL lagen die Luftgehalte der RC-Mörtel deutlich über den Werten der Mörtelmischungen aus Natursand, die eine Größenordnung von ca. 2 Vol.-% hatten. Ein Einfluss der Zementsteingehalte auf die Höhe der Luftgehalte war naheliegend, da in der porösen Struktur der Bindemittelmatrix auch nach einem Vornässen des Versuchsmaterials vor der Mörtelherstellung noch mit Luft

gefüllte Poren im Material enthalten sein können. Eine Korrelation mit den Zementsteingehalten der untersuchten Materialarten der Versuchsserie BS ergab mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,31$ keinen deutlichen Zusammenhang. Dies ist auch daran zu erkennen, dass die Ausgangsmaterialien, die mehr Zementstein enthielten als die Schwergüter, geringere Luftgehalte aufwiesen. Ein Einfluss der unterschiedlichen Luftgehalte der Frischmörtel auf die Druckfestigkeiten der Festmörtel konnte nicht festgestellt werden.

Festmörteluntersuchungen

Die Festmörteluntersuchungen hinsichtlich der Entwicklung von Druckfestigkeit, Biegezugfestigkeit und dynamischem Elastizitätsmodul erfolgten an Prismen über einen Zeitraum von 28 Tagen. Zusätzlich wurde die 28-Tage-Druckfestigkeit von Würfeln ermittelt. Das Erscheinungsbild der Probekörper war einheitlich. Lediglich in Einzelfällen wiesen Probekörper aus den Leichtgütern leichte Rissbildungen auf.

Druckfestigkeit

Die 28-Tage-Druckfestigkeiten der untersuchten Mörtel aus Schwergut lagen in Abhängigkeit von Ausgangsmaterial und Aufbereitung nur teilweise über den Werten der Vergleichsmörtel aus den jeweiligen Ausgangsmaterialien. In Einzelfällen erreichten die Druckfestigkeiten nach 28 Tagen sowohl vom Ausgangsmaterial als auch vom Schwergut die Festigkeiten der Referenzmörtel aus Natursand. Die Werte der Mörtel aus Leichtgut lagen meist deutlich unter den Werten von Ausgangsmaterial und Schwergut. Tabelle 4.16 gibt einen Überblick über die Druckfestigkeiten von Mörteln der Versuchsserien BS, REM und VS (Versuchsfahrten mit einem Schwergutaustrag > 60 %).

Tabelle 4.16: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS

| Versuchszahl | BS 44 | | | REM 8 | | | VS 6 | |
|------------------------------------|----------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| MW β_D [N/mm ²] | 19,5 | 19,3 | 13,4 | 14,2 | 14,8 | 12,6 | 18,9 | 17,9 |
| Min β_D [N/mm ²] | 13,3 | 12,0 | 6,4 | 11,1 | 12,2 | 9,1 | 15,9 | 13,5 |
| Max β_D [N/mm ²] | 27,5 | 28,2 | 22,2 | 21,0 | 22,0 | 16,9 | 23,6 | 23,3 |
| s [N/mm ²] | 3,3 | 4,0 | 3,5 | 3,1 | 2,1 | 2,7 | 3,4 | 3,8 |
| VK [%] | 17,1 | 20,8 | 26,0 | 21,8 | 14,1 | 21,4 | 17,8 | 21,4 |

Für diese Auswertung wurden Versuchsserien ausgewählt, deren Schwergutausbringen zwischen 60 % und 85 % der Gesamtaustragsmasse betrug. Die Ergebnisse zei-

gen, dass in zahlreichen Versuchsfahrten die Ausgangsmaterialien die höchsten Festigkeitswerte erzielten. Die Festigkeiten der Leichtgüter lagen jedoch immer unter den Werten von Schwergütern und Ausgangsmaterialien. Bei der Bewertung der Mörtelfestigkeiten ist dabei zu berücksichtigen, dass die Mörtel – im Gegensatz zu den Betonen – aufgrund der unterschiedlichen Körnungsziffern auch mit unterschiedlichen Zementzugaben hergestellt wurden (siehe Tabellen A 19 – A 22).

Der Verlauf der Druckfestigkeitsentwicklungen von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut zweier Versuchsreihen der Materialien BS und REM ist im Vergleich zu den Referenzmörteln in Abbildung 4.29 dargestellt. Es wurden für die Darstellung Versuchsfahrten gewählt, deren Schwergüter Druckfestigkeiten oberhalb der Druckfestigkeiten der Ausgangsmaterialien zeigten. Die Abbildungen zeigen, dass die Festigkeitsentwicklung der RC-Mörtel ähnlich verläuft wie die des Referenzmörtels. Jedoch wurde dessen Endfestigkeit nicht erreicht.

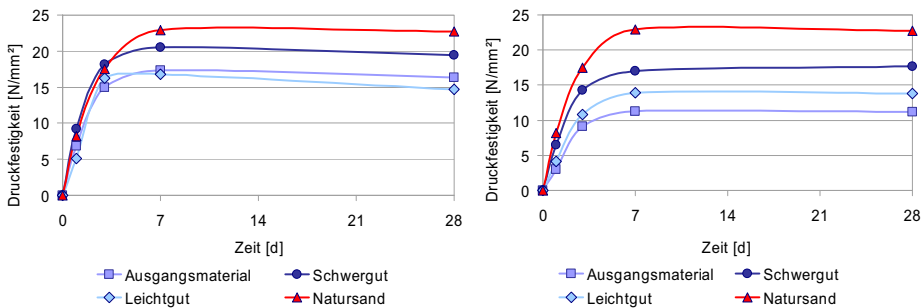


Abbildung 4.29: Entwicklung der Druckfestigkeiten von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuche BS 92 (links) und REM 23 (rechts) im Vergleich zum Referenzmörtel

Biegezugfestigkeit

Auch die 28-Tage-Biegezugfestigkeiten der Schwergüter lagen teilweise unter den Werten der jeweiligen Ausgangsmaterialien. In der Tabelle sind die Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten von Mörteln der Versuchsserien BS, REM und VS dargestellt. Wie in Tabelle 4.16 wurden hier ebenfalls die Versuchsfahrten mit einem Schwergutaustrag > 65% ausgewertet.

Tabelle 4.17: Biegezugfestigkeiten nach 28 Tagen von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS

| Versuchszahl | BS 44 | | | REM 8 | | | VS 6 | |
|--|----------|------|------|----------|------|------|---------|------|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| MW β_{BZ} [N/mm ²] | 3,8 | 3,6 | 2,6 | 2,9 | 3,4 | 2,8 | 3,6 | 3,3 |
| Min β_{BZ} [N/mm ²] | 2,6 | 2,2 | 1,3 | 2,4 | 2,7 | 2,3 | 2,8 | 2,6 |
| Max β_{BZD} [N/mm ²] | 4,9 | 4,8 | 4,3 | 3,9 | 4,5 | 3,9 | 4,8 | 4,2 |
| s [N/mm ²] | 0,6 | 0,7 | 0,7 | 0,5 | 0,6 | 0,5 | 0,7 | 0,7 |
| VK [%] | 15,2 | 19,1 | 26,0 | 16,4 | 18,8 | 18,8 | 19,9 | 21,2 |

Die Ergebnisse der Prüfungen auf Biegezugfestigkeit und Druckfestigkeit der Prismen korrelierten sehr gut. Das Verhältnis Biegezugfestigkeit zu Druckfestigkeit der RC-Mörtel kann dabei mit der nachfolgenden Gleichung 4.1 wiedergegeben werden:

$$\beta_{BZ} = 0,17 \beta_{BD} + 0,27$$

Gl. 4.1

Diese Gleichung galt auch für Referenzmörtel. Ebenso wie beim Vergleich der Ergebnisse der Druckfestigkeiten lagen die Ergebnisse der Biegezugfestigkeiten der untersuchten Mörtel aus Schwergut nur zum Teil über den Werten der Vergleichsmörtel aus den jeweiligen Ausgangsmaterialien. Die Werte der Mörtel aus Leichtgut lagen dagegen meist unter den Werten von Ausgangsmaterial und Schwergut. Eine Verringerung des Verhältnisses Biegezugfestigkeit zu Druckfestigkeit im Vergleich zu Referenzmörteln konnte in diesen Versuchen nicht festgestellt werden.

Festigkeiten in Abhängigkeit vom Zementsteingehalt

Bezieht man die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Mörtelprismen aus den Versuchsserien BS und REM auf den Alzementsteingehalt des Mörtels (berechnet als prozentualer Anteil an der Gesamtfeststoffzugabe (Zuschlag und Zement) der Mörtel, so ergibt sich die in Abbildung 4.30 dargestellte Abhängigkeit. Die Extrapolation der Regressionsgeraden würde bei Alzementsteingehalten von mehr als 40 % auf Druckfestigkeiten von weniger als 1 N/mm² schließen lassen.

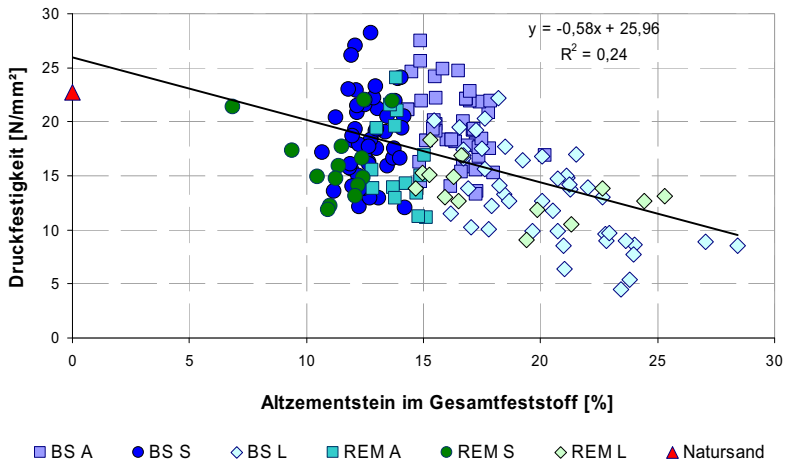


Abbildung 4.30: Druckfestigkeit nach 28 Tagen als Funktion des Altzementsteingehalts für Mörtel der Serien BS und REM im Vergleich zum Referenzmörtel

Die Darstellung der Ergebnisse der Biegezugfestigkeitsprüfungen an Mörtelprismen aus den Materialien BS und REM, ebenfalls bezogen auf den Anteil an Altzementstein an der Feststoffzugabe der Mörtel, ergibt ein ähnliches Bild (Abbildung 4.31).

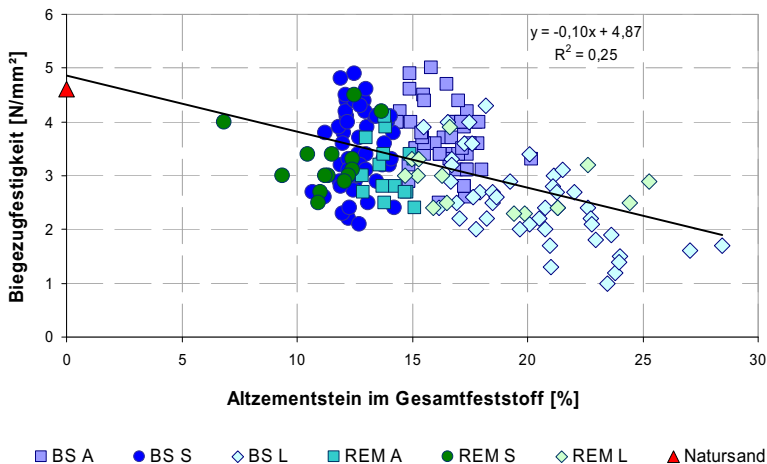


Abbildung 4.31: Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen als Funktion des Altzementsteingehalts für Mörtel der Serien BS und REM im Vergleich zum Referenzmörtel

Für die Betonbrechsande BS und REM ist lediglich eine Abhängigkeit der Festigkeitswerte der Mörtel vom Gehalt an Altzementstein zu erkennen. Mit zunehmendem Anteil an Altzementstein in den Körnungen, wie dies besonders bei den Leichtgütern der Fall ist, verringern sich die Festigkeiten.

Auffallend ist, dass einige Festigkeitswerte von Mörteln aus Schwergut und aus Ausgangsmaterial des Versuchsmaterials BS in der Größenordnung der Ergebnisse des Referenzmörtels aus Natursand liegen. Trotz ihrer Gehalte zwischen 10 % und 20 % Altzementstein an der Gesamtfeststoffzugabe scheinen andere Faktoren, wie beispielsweise eine günstige Korngrößenverteilung, die festigkeitsmindernde Wirkung des Altzementsteins auszugleichen.

Festigkeiten in Abhängigkeit von der Sieblinie

Der Einfluss der durch das Aufbereitungsverfahren bedingten Sieblinienveränderungen auf die Festigkeiten der Mörtel ist klar erkennbar. Abbildung 4.32 zeigt die Druckfestigkeit als Funktion der Siebliniendifferenzen ΔRB_4 , die aus der Abweichung der tatsächlichen Sieblinien von der auf das Größtkorn von 4 mm interpolierten Regelsieblinie B 16 berechnet wurden, für alle Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln aus dem Material BS. Da sich die Sieblinien des Ausgangsmaterials kaum unterschieden, wird in dieser Grafik nur der Mittelwert des Ausgangsmaterials dargestellt.

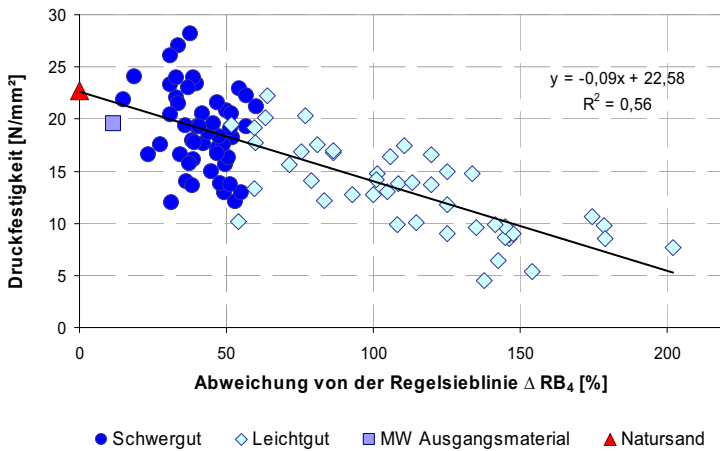


Abbildung 4.32: Druckfestigkeiten nach 28 Tagen als Funktion von ΔRB_4 für Mörtel der Serie BS im Vergleich zum Referenzmörtel

Am Beispiel des Versuchsmaterials BS ist zu erkennen, dass die Festigkeiten der untersuchten Mörtel klar auch von der Korngrößenverteilung beeinflusst wurden. Der Korrelationskoeffizient betrug $r = 0,75$. Anhand der vorliegenden Auswertung ist zu vermuten, dass die meist deutlich unter den Werten von Ausgangsmaterial und

Schwergut liegenden Baustoffprüfungsergebnisse für Mörtel aus Leichtgut nicht nur mit den höheren Altzementsteingehalten, sondern ebenfalls mit ungünstigen Korngrößenverteilungen zu begründen sind. Im Falle der Ausgangsmaterialien werden die im Vergleich zum Schwergut höheren Altzementsteingehalte teilweise durch günstigere Korngrößenverteilungen ausgeglichen. So ist zu erklären, dass die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen von Mörteln aus Ausgangsmaterialien trotz der Abhängigkeit vom Altzementsteingehalt teilweise über denen der Mörtel aus den jeweiligen Schwergüter lagen.

Dynamischer Elastizitätsmodul

Am deutlichsten war die Verbesserung der Materialeigenschaften der aufbereiteten Schwergüter an den Werten des dynamischen Elastizitätsmoduls zu erkennen. Hier konnten in ca. 70 % aller Versuchsreihen Verbesserungen der Ergebnisse der Schwergüter in Bezug auf die jeweiligen Ausgangsmaterialien festgestellt werden. In Tabelle 4.18 ist nachfolgend eine Übersicht der Werte der E-Moduli von Mörteln der Versuchsserien BS, REM und VS (Versuchsfahrten mit einem Schwergutaustrag > 65 %) dargestellt.

Tabelle 4.18: E-Moduli nach 28 Tagen von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Serien BS und REM sowie von Ausgangsmaterial und Schwergut der Serie VS

| Versuchszahl | BS 43 | | | REM 8 | | | VS 6 | |
|----------------------------|----------|--------|--------|----------|--------|--------|---------|--------|
| | A | S | L | A | S | L | A | S |
| MW E [N/mm ²] | 13.076 | 14.369 | 8.188 | 13.405 | 12.886 | 9.697 | 13.209 | 14.328 |
| Min E [N/mm ²] | 10.400 | 10.388 | 5.054 | 11.653 | 11.890 | 7.240 | 11.932 | 12.970 |
| Max E [N/mm ²] | 16.500 | 17.300 | 11.300 | 15.769 | 13.869 | 11.500 | 14.900 | 16.300 |
| s [N/mm ²] | 1.509 | 1.856 | 1.803 | 2.049 | 782 | 2.549 | 1.446 | 1.534 |
| VK [%] | 11,5 | 12,9 | 22,0 | 15,3 | 6,1 | 26,3 | 10,94 | 10,74 |

Nachfolgend sind in Abbildung 4.33 typische Verläufe der Entwicklung der dynamischen E-Moduli der Versuchsmaterialien BS und REM über einen Zeitraum von 28 Tagen dargestellt.

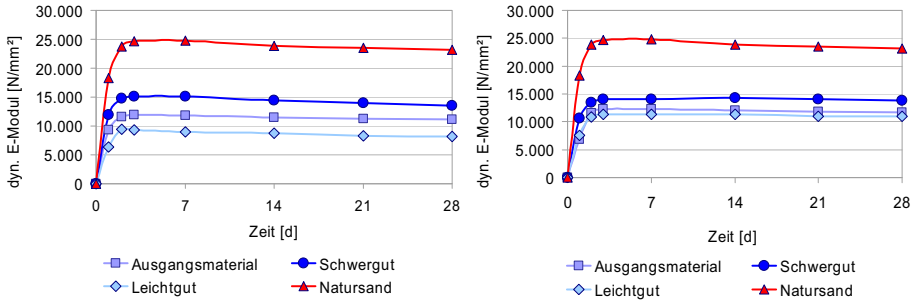


Abbildung 4.33: Entwicklung der dynamischen E-Moduli von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuche BS 92 (links) und REM 23 (rechts) im Vergleich zum Referenzmörtel

Dynamische E-Moduli in Abhängigkeit von Zementsteingehalt und Porosität

Es konnte ein Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Altzementstein in der Gesteinskörnung und den E-Moduli nachgewiesen werden. Mit zunehmendem Gehalt an salzsäurelöslichen Bestandteilen in der Gesteinskörnung wurde eine Verringerung der Werte der dynamischen E-Moduli festgestellt. In Abbildung 4.34 sind die Ergebnisse der E-Modulmessungen von Mörteln der untersuchten Materialarten der Versuchsserien BS und REM nach 28 Tagen im Verhältnis zum Referenzmörtel dargestellt.

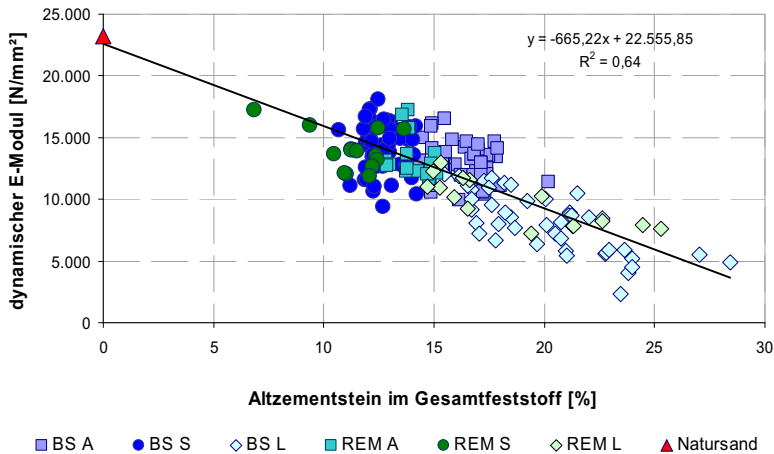


Abbildung 4.34: Dynamischer Elastizitätsmodul nach 28 Tagen als Funktion des Altzementsteingehalts für Mörtel der Serien BS und REM im Vergleich zum Referenzmörtel

In dieser Abbildung ist gut zu erkennen, dass der Alzementsteingehalt der RC-Mörtel den dynamischen Elastizitäts-Modul erheblich beeinflusst. Ein Vergleich der Korrelationskoeffizienten r zeigt, dass die Beeinflussung des E-Moduls durch den Alzementsteingehalt mit $r = 0,8$ deutlich stärker ist als die der Festigkeiten mit jeweils $r = 0,5$. Keiner der untersuchten RC-Mörtel konnte die Werte der Referenzmörtel erreichen. Bereits ein Anteil von 10 % Alzementstein am Gesamtfeststoff führte zu einer Verringerung des dynamischen E-Moduls um rund 30 %, ein Alzementsteingehalt von 20 % würde entsprechend den in dieser Arbeit ausgewerteten Daten zu einer Reduzierung um ca. 60 % führen.

Mit dem Anstieg der durch den Alzementsteingehalt eingetragenen Porosität konnte ein Verlust an Festigkeit und vor allem eine Reduzierung des Elastizitätsmoduls beobachtet werden. Jedoch war die Korrelation mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,58$ nicht so deutlich wie aufgrund der Literaturlauswertung zu erwarten gewesen wäre. Dies ist auch anhand von Abbildung 4.35 zu erkennen, in der die Werte der dynamischen E-Moduli als Funktion der Gesamtporosität aufgetragen sind. Der Zementstein bewirkt anscheinend nicht nur über die Porosität eine Verminderung der Festigkeit, sondern andere Einflussgrößen, z.B. die Struktur der CSH-Phasen, sind zusätzlich wirksam.

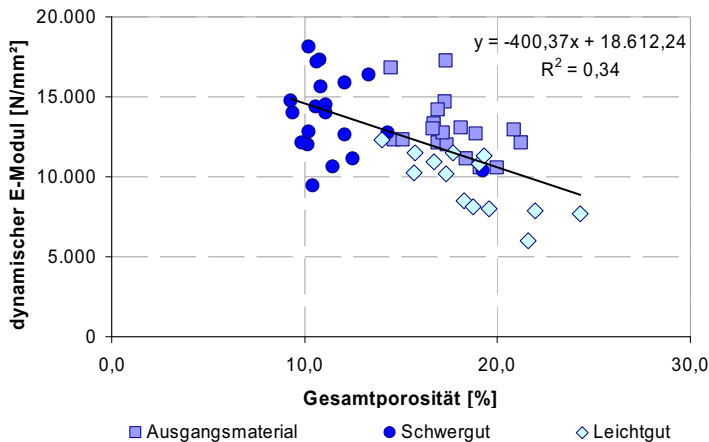


Abbildung 4.35: Dynamischer E-Modul als Funktion der Gesamtporosität von Körnungen der Serien BS, VS und REM

Dynamische E-Moduli in Abhängigkeit von der Sieblinie

Der Einfluss der durch das Aufbereitungsverfahren bedingten Sieblinienveränderungen wurde auch zu den Messwerten des dynamischen Elastizitätsmoduls in Bezug gesetzt. In der nachfolgenden Abbildung ist der dynamische E-Modul als Funktion von ΔRB_4 für alle gemessenen E-Moduli der Mörtel der Serie BS dargestellt. Da sich die Sieblinien

des Ausgangsmaterials kaum unterschieden, wird auch hier nur der Mittelwert des Ausgangsmaterials dargestellt.

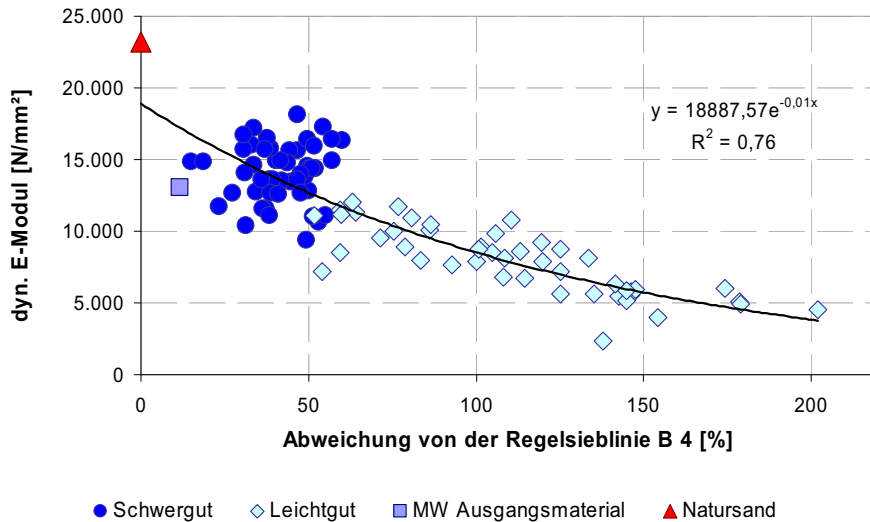


Abbildung 4.36: Dynamische E-Moduli nach 28 Tagen als Funktion Δ RB 4 für Mörtel der Serie BS im Vergleich zum Referenzmörtel

Auch die Werte des dynamischen E-Moduls werden signifikant von der Korngrößenverteilung beeinflusst. Dies lässt sich vor allem an der Auswertung der Ergebnisse von Mörteln mit Leichtgutanteilen erkennen, da deren Abweichungen von der Regelsieblinie B 4 eine größere Streubreite aufwiesen. Der Korrelationskoeffizient r für alle Mörtel der Serie BS betrug 0,87. Der ermittelte Zusammenhang lässt sich jedoch schlechter auf den Referenzmörtel übertragen als dies bei der Druckfestigkeit der Fall ist. Dies bestätigt wiederum den größeren Einfluss des Altzementsteingehaltes auf den dynamischen Elastizitätsmodul.

4.4.2 Ergebnisse der Betonuntersuchungen

Material aus drei Versuchen mit dem Betonbrechsand BS wurde für die Herstellung und die Untersuchung von Beton verwendet. Es wurden jeweils Ausgangsmaterial und Schwergut untersucht. Der Zuschlag der Referenzbetone bestand ausschließlich aus natürlicher Gesteinskörnung.

Frischbetonuntersuchungen

Die Ausbreitmaße der Frischbetone mit einem Anteil von jeweils 10 %, 20 %, 30 %, 40 % und 50 % Ausgangsmaterial bzw. Schwergut an der gesamten Gesteinskörnung unterschieden sich nicht bzw. nur minimal von den Ausbreitmaßen des Referenzbetons

aus Natursteinkörnung. Die Ausbreitmaße entsprachen der angestrebten Konsistenzklasse F3, weich.

Die Luftgehalte der Frischbetone unterschieden sich ebenfalls nur geringfügig von den Luftgehalten des Referenzbetons. Die Einzelwerte der Frischbetonuntersuchungen sind im Anhang, Tabelle A 24 bis A 26 dargestellt.

Festbetonuntersuchungen

Rohdichte

Der Verlauf der Rohdichteentwicklungen der Betone mit Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung über einen Zeitraum von 28 Tagen verlief ähnlich wie die Rohdichteentwicklung des Referenzbetons, jedoch ausgehend von niedrigeren Frischbetonrohdsichten. Die Werte der Rohdsichten der Betone mit Anteilen von 10 % Ausgangsmaterial bzw. Schwergut an der Gesteinskörnung waren über den Verlauf von 28 Tagen fast identisch. Bei einer Substitution von 20 % erreichten die Betone mit Schwergut deutlich höhere Werte als die mit Ausgangsmaterial.

Der positive Einfluss der Nassaufbereitung auf die Baustoffeigenschaften durch die Reduzierung des Zementsteinanteils und damit die Erhöhung der Dichte der rezyklierten Gesteinskörnungen (vgl. 4.2.4) wurde an den Werten der Betonrohdsichte gut sichtbar. In Abbildung 4.37 sind die Rohdsichten nach 28 Tagen von Betonen mit unterschiedlichen Betonbrechsandanteilen dargestellt.

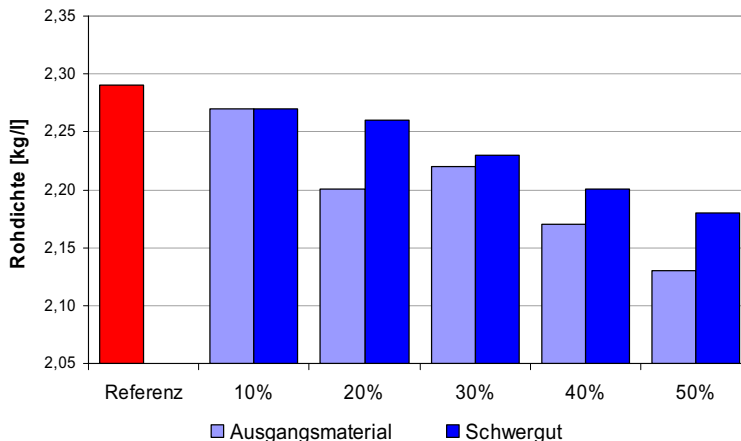


Abbildung 4.37: Rohdsichten nach 28 Tagen von Betonen mit variierten Anteilen von Ausgangsmaterial oder Schwergut, Versuch BS 119, im Vergleich zum Referenzbeton

Druckfestigkeit

Die Entwicklung der Festigkeit der Betone mit Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung über einen Zeitraum von 28 Tagen verlief in gleicher Weise wie die der Referenzbetone, jedoch in Abhängigkeit vom Betonbrechsandanteil auf einem niedrigeren Niveau. Dabei zeigten die Betone mit Anteilen an lediglich trocken aufbereitetem Ausgangsmaterial in jeder Altersstufe schlechtere Werte als die Betone mit Anteilen nass aufbereiteten Schwergutes. In Abbildung 4.38 ist beispielhaft die Entwicklung der Würfel-druckfestigkeiten über 28 Tage von Betonen mit 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung am Gesamtzuschlag im Vergleich zum Referenzbeton aufgeführt. Dargestellt sind die Mittelwerte aus Messungen an jeweils 3 Würfeln.

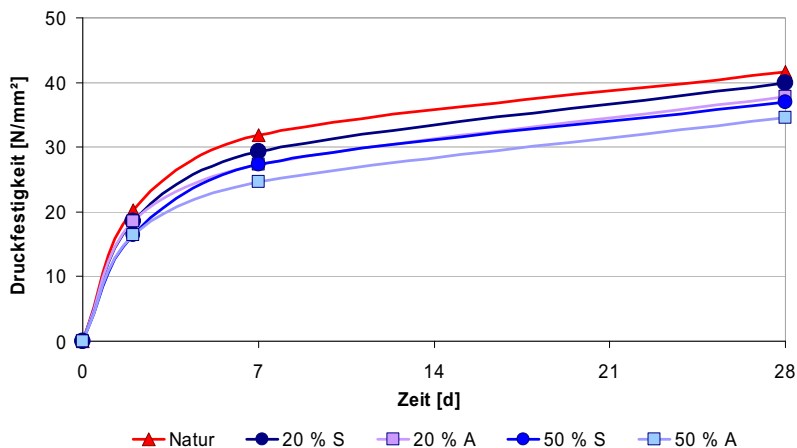


Abbildung 4.38: Entwicklung der Druckfestigkeiten von Beton mit Anteilen von 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung am Gesamtzuschlag im Vergleich zum Referenzbeton, Versuch BS 119

Abbildung 4.39 veranschaulicht den Zusammenhang zwischen dem Anteil an Altzementstein im Beton und seiner Druckfestigkeit. Hier sind die 28-Tage-Druckfestigkeitswerte als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons aufgetragen. Die unterschiedlichen Anteile an Altzementstein berechnen sich aus den unterschiedlichen Anteilen an RC-Material in der Rezeptur. Der Korrelationskoeffizient von $R = 0,94$ bestätigt die sehr gute Korrelation zwischen zunehmendem Altzementsteingehalt in der Gesteinskörnung und abnehmender Druckfestigkeit. Dieser Zusammenhang ist bei den in dieser Arbeit hergestellten RC-Betonen durch den Ausschluss von Sieblinien-einflüssen und die damit verbundene Vereinheitlichung der Zementzugaben bei der Betonherstellung deutlicher als bei den RC-Mörteln.

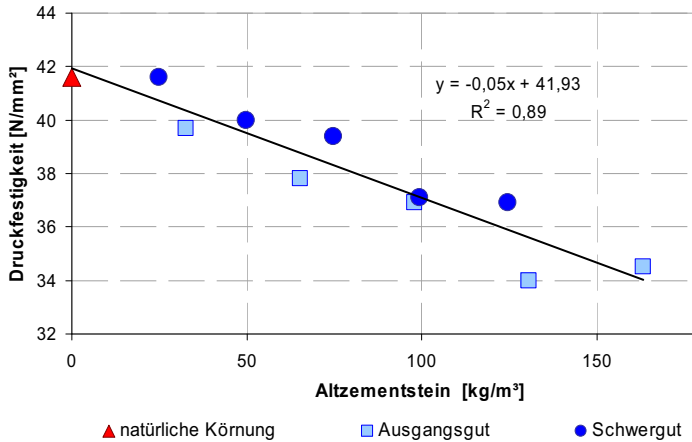


Abbildung 4.39: 28-Tage-Druckfestigkeit als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons, Versuch BS 119

Dynamischer Elastizitätsmodul

Die Entwicklung der dynamischen Elastizitätsmoduli von Betonen mit Betonbrechsandanteilen über einen Zeitraum von 28 Tagen verlief in gleicher Weise wie die der Referenzbetone. Ebenso wie bei den vergleichenden Untersuchungen der dynamischen E-Moduli von Mörteln ist bei den untersuchten Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung eine Erhöhung des dynamischen E-Moduls durch die Nassaufbereitung zu verzeichnen.

In Abbildung 4.40 ist die Entwicklung der dynamischen E-Moduli von Beton mit 20 % bzw. 50 % Anteil rezyklierter Gesteinskörnung aus dem Versuch BS 119 im Vergleich zum Referenzbeton über den Zeitraum von 28 Tagen aufgetragen. Die Werte des dynamischen E-Moduls mit Anteilen nass aufbereiteter Betonbrechsands lagen in der Regel über den Werten der Vergleichsbetone mit Ausgangsmaterial. Die Werte des Referenzbetons aus reiner Natursteinkörnung wurden nicht erreicht.

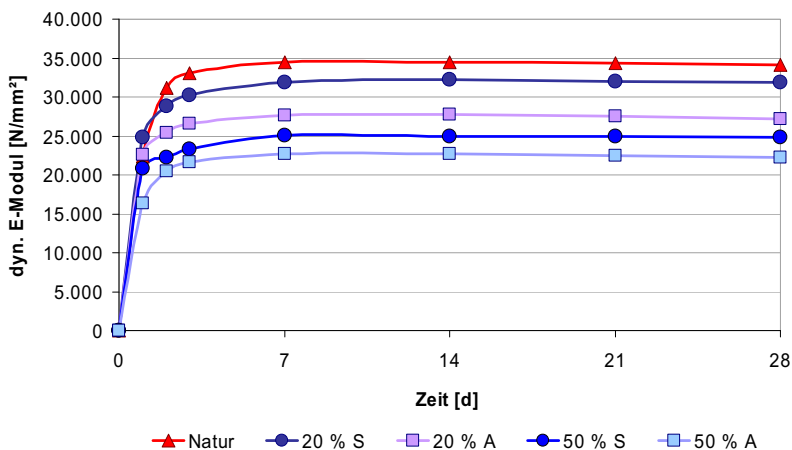


Abbildung 4.40: Entwicklung der dynamischen E-Moduli von Betonen mit Anteilen von 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung am Gesamtzuschlag im Vergleich zum Referenzbeton, Versuch BS 119

Auch die dynamischen E-Moduli lassen eine deutliche Abhängigkeit von den Altzementsteingehalten in der Gesteinskörnung erkennen. In Abbildung 4.41 sind die E-Moduli nach 28 Tagen in Bezug auf den Altzementsteingehalt pro Kubikmeter Beton aufgetragen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von $R = 0,96$ kann auch hier eine sehr gute Korrelation nachgewiesen werden.

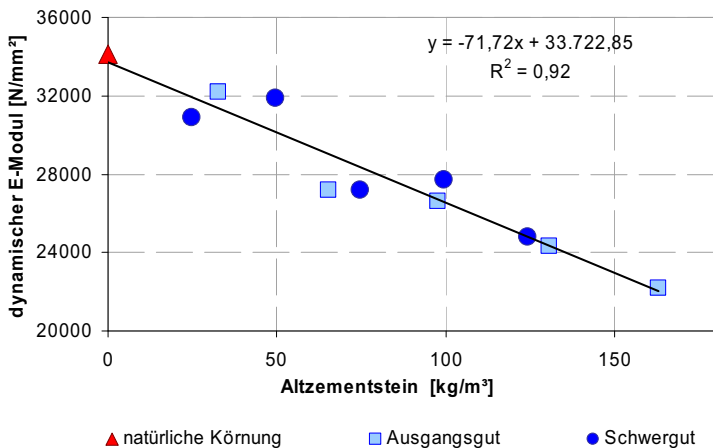


Abbildung 4.41: 28-Tage Werte des dynamischen E-Moduls als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons, Versuch BS 119

Wie bereits bei der Auswertung der Baustoffprüfungen an den RC-Mörteln festgestellt, beeinflusste der Altzementsteingehalt der Gesteinskörnungen die dynamischen Elastizitäts-Moduli der untersuchten RC-Betone stärker als die Druckfestigkeiten.

In Abbildung 4.42 sind die Druckfestigkeiten und die dynamischen E-Moduli aller untersuchten Betone als Funktion des Altzementsteingehaltes dargestellt.

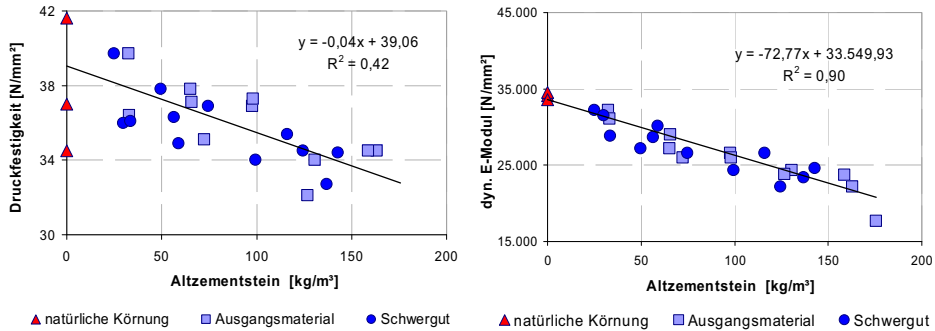


Abbildung 4.42: Druckfestigkeiten (links) und E-Moduli (rechts) von Beton aus Ausgangsmaterial und Schwergut als Funktion der Altzementsteingehalte der RC-Betone, Auswertung aller Betonversuchsreihen

Mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,95$ wird ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem dynamischem E-Modul von Beton und dem Altzementsteingehalt der Gesteinskörnung bestätigt. Dieser Zusammenhang besteht auch für die Referenzbetone. Auch in Bezug auf die Druckfestigkeiten kann eine Abhängigkeit vom Altzementsteingehalt der RC-Gesteinskörnung festgestellt werden. Jedoch ist der Zusammenhang mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,64$ weniger stark und kann auch nicht auf die Referenzbetone übertragen werden.

Schwinden

Die Auswertung der Schwindmessungen zeigt einen deutlichen Zusammenhang zwischen dem Anteil und dem Typ der rezyklierten Gesteinskörnung im Festbeton und dem Schwindmaß. Mit zunehmendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung erhöhte sich das Schwindmaß sowohl beim nur trocken aufbereiteten Ausgangsmaterial BS als auch beim Schwergut. Das Schwinden der Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung verlief dabei in gleicher Weise wie das Schwinden des Referenzbetons. Die Schwindmaße dieser RC-Betone lagen jedoch in jeder Messung über den Werten des Referenzbetons. Die Werte von Beton mit Anteilen des nass aufbereiteten Schwergutes waren dabei durchgehend geringer als die Werte von Beton mit vergleichbaren Anteilen an Ausgangsmaterial. In Abbildung 4.43 sind 365-Tage-Schwindmaße von Beton mit 20 % und 50 % Anteil rezyklierter Gesteinskörnung am Gesamtzuschlag im Vergleich zum Referenzbeton dargestellt (Versuch BS 119).

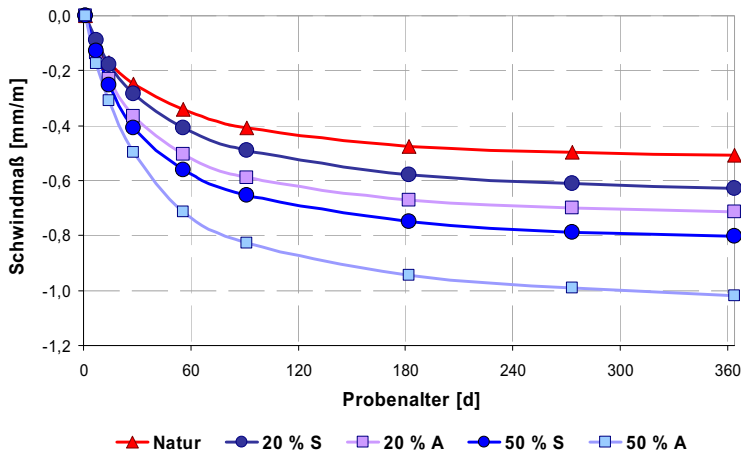


Abbildung 4.43: 365-Tage -Schwindmaße von Beton mit Gehalten von 20 % und 50 % rezyklierter Gesteinskörnung im Vergleich zum Referenzbeton, Versuch BS 119

Bezieht man die 365-Tage-Schwindmaße auf den Anteil an Altzementstein in der Gesteinskörnung ist ein deutlicher Zusammenhang erkennbar. In Abbildung 4.44 sind die Schwindmaße in Bezug auf den Altzementsteingehalt pro Kubikmeter Frischbeton aufgetragen.

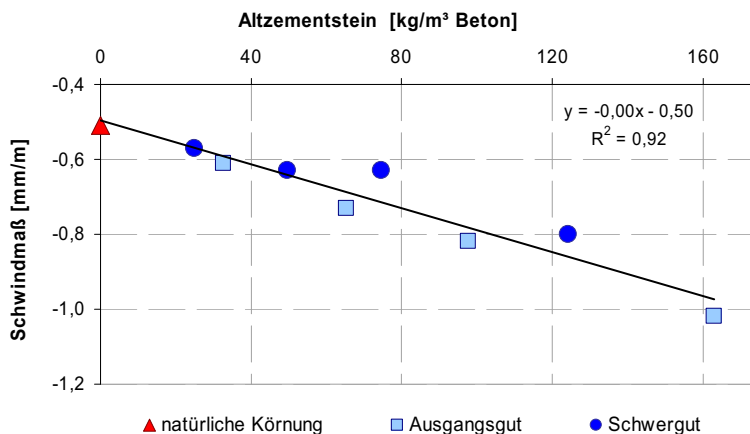


Abbildung 4.44: Schwindmaße von Beton nach 365 Tagen als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons, Versuch BS 119

Bei einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,96$ kann man auch hier von einer sehr guten Korrelation sprechen.

Die Schwindwerte der Betone mit Schwergutanteilen lagen auch beim Bezug auf den absoluten Alzementsteingehalt geringfügig unter denen der Betone mit Ausgangsmaterial, was wiederum für die positiven Auswirkungen des Aufbereitungsprozesses spricht.

5. Ökobilanzielle und ökonomische Bewertung des Verfahrens

5.1 Entwicklung eines Szenarios

Um das untersuchte Verfahren zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand für die industrielle Umsetzung sowohl ökobilanziell als auch ökonomisch zu bewerten, wurde zunächst auf der Basis des Betriebes der eingesetzten Pilotanlage eine Modellanlage mit einem Durchsatz von 100 t/h für den industriellen Einsatz konzipiert.

Die Bewertung basiert auf den während der Versuche in der Pilotanlage erfassten Betriebskennzahlen des Aufbereitungsverfahrens. Wichtigster Bestandteil dieser Erfassung waren der Gesamtenergieverbrauch der Anlage im Verlauf der verschiedenen Versuchsreihen und der Energieverbrauch sämtlicher Einzelaggregate, gegebenenfalls in unterschiedlichen Betriebszuständen. Anhand dieser Werte wurden die energieaufwendigsten Verfahrensschritte identifiziert. Weiterhin wurden die Prozesswasserströme der Pilotanlage erfasst.

Da die Versuchsanlage der BAM als Pilotanlage den räumlichen Gegebenheiten des Instituts sowie verschiedenen Verfahrensoptionen angepasst worden war, ist sie vergleichsweise aufwändig ausgestattet. Daher wurde bei dem Upscaling auf einige Aggregate der Pilotanlage wie z.B. Zwischenpumpen, deren Einsatz aufgrund der örtlichen Platzverhältnisse in der Pilotanlage erforderlich war, verzichtet. Aggregate, deren Betrieb einen besonders hohen Energieaufwand erforderte, wurden nach Möglichkeit durch energieeffizientere Anlagenteile ersetzt. So wurde in der Modellanlage, beispielsweise für die Entwässerung des Feinstgutes, statt des Dekanters eine Kammerfilterpresse vorgesehen.

Diese Auswertung diente zusammen mit vorliegenden Herstellerangaben für Einzelaggregate als Basis für die Abschätzung des Energieverbrauchs der Modellanlage. Nicht ermittelbare Daten von Einzelaggregaten wurden auf der Basis von Internetrecherchen abgeschätzt. Das Fließschema der Modellanlage mit den Einzelaggregaten und den Angaben zu den voraussichtlichen Stoffströmen und Energieaufnahmen ist im Anhang in der Abbildung A 1 dargestellt. Die Maschinenliste mit Energieverbrauch und elektrischer Anschlussleistung findet sich ebenfalls im Anhang, Tabelle A 3.

Es wurde von folgenden Randbedingungen ausgegangen:

- Die Anlage zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand befindet sich in unmittelbarer Nähe zu einer stationären Recyclinganlage für Altbeton mit einem Durchsatz von 300 t/h in einem Ballungsraum. Ausgehend von einem Brechsandanfall von 30 – 35 % der Aufgabemenge wurde die Nassaufbereitungsanlage für einen Durchsatz von 100 t/h ausgelegt.

- Alle Aufwendungen werden dem produzierten Schwergut, welches das verkaufsfähige Produkt darstellt, zugeschrieben. Der Schwergutaustrag beträgt durchschnittlich 75 % der Aufgabemenge.
- Die Aufnahme des angefallenen Betonbrechsandes 0/4 mm erfolgt mittels Radlader und wird der Betonbrechsandaufbereitung zugerechnet. In die Bilanz wurde der Dieselverbrauch des Radladers aufgenommen. Die Vorketten (also der Bereitstellungsaufwand für den Endenergieträger, inklusive des Herstellungsaufwandes für alle vorgelagerten Prozessschritte) zur Herstellung von Radlader, Schmierstoffen etc. waren aufgrund fehlender Daten nicht Bestandteil der Bilanz.
- Das Überkorn > 4 mm wird zur Recyclinganlage zurücktransportiert. Die angenommene Masse von 4 t/h basiert auf der Auswertung der Versuchsreihen mit dem Betonbrechsand BS in der Pilotanlage. Die Aufgabemenge des Betonbrechsandes wurde daher mit 104 t/h angenommen. Der Durchsatz der Aufbereitungsanlage liegt davon unabhängig bei 100 t/h.
- Die Nassaufbereitungsanlage wird mit elektrischer Energie betrieben.
- Das Prozesswasser wird im Kreislauf geführt. Während des Aufbereitungsprozesses wurde Wasser als Restfeuchte mit den Austragsgütern aus dem Prozesswasserkreislauf entfernt und nach den Versuchsfahrten durch Frischwasser ersetzt. Der bei Versuchen mit einem Schwergutaustrag von 75 % aufgetretene Wasserverlust lag – abzüglich der mit dem Ausgangsmaterial eingebrachten Feuchte – durchschnittlich bei 0,1 m³ je Tonne eingesetzten Brechsandes. Für die Industrieanlage wurde dieser Wert übernommen. Zuzüglich wurden 7,5 % des Wasserverbrauchs für diskontinuierlich erforderliche Wechsel des gesamten Prozesswassers veranschlagt. Der Wasserverbrauch für die Industrieanlage wurde daher mit 10,75 m³ pro Stunde berechnet. Dies entspricht 143 kg Wasser pro Tonne Schwergut.
- Der Verbrauch des für die Wasseraufbereitung erforderlichen Flockungsmittels wurde auf der Basis der Erfahrungen einer industriellen Bauschuttaufbereitungsanlage mit 0,5 kg/100 t veranschlagt [210]. Die Vorketten der Flockungsmittelproduktion konnten aufgrund fehlender Daten nicht berücksichtigt werden.
- Es wird davon ausgegangen, dass Feinstgut und Leichtgut nicht oder nur gering mit Schadstoffen belastet sind und einer Kompostierung zugeführt werden können. Versuche im Rahmen des EU-LIFE Projektes RECDEMO zeigten, dass die Nutzung weitgehend unbelasteter Reststoffe aus der Nassaufbereitung als Mineralisierungsbeigabe bei der Kompostierung möglich ist [211]. Für die Entfernung zum nächsten Kompostwerk wird eine Strecke von 10 km angenommen, da in Ballungsgebieten üblicherweise auch größere Kompostierungsanlagen vorhanden sind.
- Der Transport des Schwergutes zur Wiederverwertung wird nicht in die Bilanz eingerechnet. Kriterium hierfür ist, dass in die ökobilanziellen Kennzahlen für den zu ersetzenden Natursand ebenfalls keine Transporte zum Bestimmungsort eingerechnet wurden.

5.2 Ökobilanzielle Bewertung

5.2.1 Ziel- und Untersuchungsrahmen

Ziel der ökobilanziellen Betrachtung des Nassaufbereitungsverfahrens für Betonbrechsand ist die Bewertung der Umweltverträglichkeit des produzierten Schwergutes in Hinblick auf den Einsatz in der Betonherstellung und im Vergleich mit dem Rohstoff Natursand. Als Untersuchungsrahmen wurde die Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Einsatz der Setzmaschinenteknik zur Herstellung eines für die Betonproduktion geeigneten Schwergutes festgelegt. Da sowohl Nutzung als auch Entsorgung von RC-Betonbrechsand und Natursand in Beton gleich sind, wurden sie in dieser Bewertung nicht berücksichtigt.

Sämtliche bei der Aufbereitung des Betonbrechsandes verbrauchten Ressourcen, wurden auf das Produkt des Prozesses, die produzierte Tonne Schwergut bezogen. Die anfallenden Reststoffe Leichtgut und Feinstgut wurden ausschließlich als Reststoffe des Aufbereitungsprozesses betrachtet. Abbildung 5.1 zeigt die schematische Darstellung des angewandten Untersuchungsrahmens.

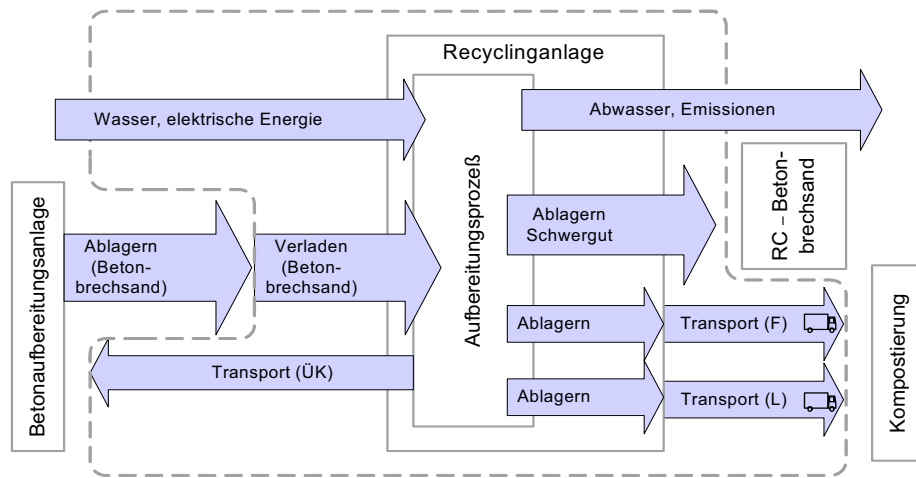


Abbildung 5.1: Schematische Darstellung des Untersuchungsrahmens der ökobilanziellen Betrachtung zur Aufbereitung von Betonbrechsand; ÜK - Überkorn, F – Feinstgut, L – Leichtgut nach [212]

Der Großteil der Umweltbelastungen aus der Nassaufbereitung von Betonbrechsand fällt während des Betriebes der Aufbereitungsanlage an. Der Stromverbrauch durch die Aggregate und der Einsatz von Hilfsstoffen wie z.B. Wasser sind die wesentlichen Faktoren, die diese Umweltbelastungen hervorrufen. Die Errichtung der Anlage selbst, die Herstellung und Anlieferung der einzelnen Aggregate sowie der Abriss und die Entsorgung der Anlage nach der Nutzungsdauer müssten bei einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 ff. berücksichtigt werden. Da zu erwarten ist, dass diese benannten

Auswirkungen gegenüber den Umweltauswirkungen durch den Anlagenbetrieb relativ gering sind, wurde dieser Teil in der Prozessbewertung nicht berücksichtigt.

Alle Umweltwirkungen und aggregierten Werte (KEV) aus dem Recyclingprozess werden bilanziell dem Produkt Schwergut zugerechnet. Auf der Grundlage dieser Berechnungen wurde der Einsatz des Schwergutes als Ersatz für Natursand in der Betonherstellung bewertet.

Als funktionelle Einheit wurde zunächst die Produktion von einer Tonne Schwergut als Gesteinskörnung festgelegt. Hierbei wurden die ökologischen Auswirkungen der Herstellung von Schwergut im Vergleich zur Natursandgewinnung bewertet. Auf der Basis dieses ökobilanziellen Vergleichs wurde als weitere funktionelle Einheit ein Kubikmeter Beton der Klasse C 30/37 gewählt. Verglichen wurden ein Betonkörper, dessen Gesteinskörnung zu 20 % aus nass aufbereitetem Betonbrechsand bestand, und ein Referenzbeton gleicher Rezeptur aus natürlicher Gesteinskörnung (Versuchsreihe BS 119).

5.2.2 Sachbilanzierung der ökobilanziellen Bewertung

Als Datenbasis für die Erstellung der Sachbilanz mit der Gegenüberstellung der funktionalen Einheiten wurden die Angaben aus der Grundlagendatenbank des Globalen Emissionsmodells Integrierter Systeme (Gemis) verwendet. Benutzt wurde die Version 4.2 von Oktober 2004 in der vom Umweltbundesamt veröffentlichten Fassung [189]. Im Einzelfall erfolgten Ergänzungen aus der überarbeiteten, noch nicht vollständig vorliegenden Originalversion Gemis 4.4 von Oktober 2007 [213]. In diesen Datenbanken sind die ökologischen Daten zu den jeweiligen Rohstoffen für die Betonherstellung dargestellt. Die Daten enthalten den Herstellungsaufwand inkl. des Aufwandes an Energie, Stoffen und Transporten in den Vorketten.

Diese Datenbank wurde aufgrund des umfangreichen Datenhintergrundes sowie den Angaben zur Flächeninanspruchnahme für die Stoffbereitstellung mineralischer Rohstoffe als Grundlage für die Sachbilanzierung herangezogen. Ein weiterer Vorteil dieser Datenbank ist die Angabe des kumulierten Energieverbrauchs (KEV) anstelle des Kumulierten Energieaufwands (KEA). Der KEV unterscheidet sich vom KEA dadurch, dass er bei stofflich genutzten Energieträgern, deren Heizwert nicht in die Bilanz einbezieht, da die stoffliche Nutzung diesen nicht verbraucht und die Energie somit für potenzielle Nutzungen am Ende des Produktlebenswegs noch zur Verfügung steht [189]. Bei der Verwendung von mineralischen Stoffen ist dieser Unterschied in der Regel vernachlässigbar, da diese Stoffe zumeist keinen Heizwert haben. KEV und KEA von rezyklierten Gesteinskörnungen können direkt miteinander verglichen werden. Jedoch ist die Bewertung des KEV im Zusammenhang mit einer ökobilanziellen Betrachtung grundsätzlich umfassender.

Die Vermeidung von Entsorgungsaufwand z.B. durch Deponieraumnutzung wurde in dieser Arbeit nicht berücksichtigt, da die im Rahmen von selektiven Rückbaumaßnahmen generierten Ausgangsmaterialien bereits von guter Qualität waren und als Verfüllmaterial beispielsweise im Straßenbau hätten wiederverwertet werden können.

Die Untersuchung der am Prozess beteiligten Stoffströme sowie des Energieverbrauchs in der Aufbereitungsanlage erfolgte mit Umberto, einem Software-Programm für Ökobilanzierung und Stoffstromanalysen [212, 214]. Eine Übersicht über die in der Bewertung berücksichtigten Stoffströme ist in Tabelle 5.1 dargestellt. Die erstellten Stoffbilanzen sind in den Abbildungen A 3 bis A 4, die Energiebilanz in A 5 ausführlich dargestellt.

Tabelle 5.1: Stoffströme des Nassaufbereitungsprozesses

| Inputströme | Outputströme |
|--------------------------|--------------|
| elektrische Energie | Emissionen |
| Energie für Ladevorgänge | |
| Frischwasser | Abwasser |
| Betonbrechsand / | Schwertgut |
| Ausgangsmaterial | Leichtgut |
| | Feinstgut |

Die Rezeptur des zu bewertenden Betons wurde in Anlehnung an die in den Versuchsreihen verwendeten Betonmischungen erstellt (siehe Anhang Tabellen A 24 bis A 26).

5.2.3 Wirkungsabschätzung der ökobilanziellen Bewertung

Bei der Wirkungsabschätzung wurden in Anlehnung an Bewertungen von mineralischen Sekundärbaustoffen [188, 193, 215] die folgenden Wirkungskategorien bzw. Leitindikatoren untersucht:

- Kumulierter Energieverbrauch (KEV)
- Treibhauswirkung (GWP)
- Versauerungspotential (AP)
- Ozonvorläuferpotential (TOPP)
- Naturraumbeanspruchung
- Verbrauch mineralischer Ressourcen

Die nachfolgenden Tabellen (Tabelle 5.2, Tabelle 5.3 und Tabelle 5.4) enthalten die den Wirkungskategorien Treibhauswirkung, Versauerungspotential und Ozonvorläufer-

potential zugewiesenen Emissionen. Die Faktoren zur Umrechnung der Wirkung der einzelnen Emissionen auf die Leitgröße der Wirkungskategorien entstammen der verwendeten Datenbank.

Tabelle 5.2: Umrechnung der Wirkung verschiedener Emissionen auf den Leitindikator der Wirkungskategorie Treibhauswirkung: CO₂

| Emission | Formel | Faktor für die Bewertung als CO ₂ -Äquivalent |
|-----------------------|-------------------------------|--|
| Kohlendioxid | CO ₂ | 1,00 |
| Methan | CH ₄ | 23,0 |
| Distickoxid (Lachgas) | N ₂ O | 296 |
| Perfluormethan | CF ₄ | 0,0057 |
| Perfluorethan | C ₂ F ₆ | 0,0119 |

Tabelle 5.3: Umrechnung der Wirkung verschiedener Emissionen auf den Leitindikator der Wirkungskategorie Versauerung: SO₂

| Emission | Formel | Faktor für die Bewertung als SO ₂ -Äquivalent |
|-------------------------------|------------------|--|
| Schwefeldioxid | SO ₂ | 1,00 |
| Stickoxide | NO _x | 0,696 |
| Chlorwasserstoff (Salzsäure) | HCl | 0,879 |
| Fluorwasserstoff (Flusssäure) | HF | 1,60 |
| Ammoniak | NH ₃ | 1,88 |
| Schwefelwasserstoff | H ₂ S | 1,88 |

Tabelle 5.4: Umrechnung der Wirkung verschiedener Emissionen auf den Leitindikator der Wirkungskategorie Ozonvorläuferpotential: NMVOC

| Emission | Formel | Faktor für die Bewertung als NMVOC-Äquivalent |
|---|-----------------|---|
| Flüchtige Nichtmethankohlenwasserstoffe | NMVOC | 1,00 |
| Kohlenmonoxid | CO | 0,11 |
| Methan | CH ₄ | 0,014 |
| Stickoxide | NO _x | 1,22 |

5.2.4 Ergebnisse der ökobilanziellen Bewertung

Auf Basis der durchgeführten Versuche wurde von einem Betrieb der Modellanlage mit einem durchschnittlichen Schwergutaustrag von 75 % ausgegangen. Bei einem Ener-

gieverbrauch von 384,5 kWh bei einem Durchsatz von 100 t/h entspricht dies einem Verbrauch von 5,1 kWh pro Tonne Schwergut (siehe Anhang Tabelle A 2). Eine Übersicht über die wichtigsten Umweltwirkungen, die durch die Nassaufbereitung von Betonbrechsand entstehen, ist in Tabelle 5.5 dargestellt, eine detaillierte Darstellung findet sich im Anhang, Tabelle A 4. Es ist gut zu erkennen, dass die einzelnen Produktionsschritte bzw. die unterschiedlichen Arten der verbrauchten Energien auch die verschiedenen Wirkungskategorien unterschiedlich beeinflussen. Während KEV und GWP sowie die Naturraumbeanspruchung primär vom Stromverbrauch abhängen, sind AP und NMVOC stark vom Dieserverbrauch beeinflusst. Abbildung 5.2 zeigt die unterschiedliche Beeinflussung von kumuliertem Energieverbrauch und Versauerungspotential durch die Nassaufbereitung von einer Tonne Schwergut. In Abbildung 5.3 sind die prozentualen Verteilungen der Ursachen bzw. Quellen des kumulierten Energieverbrauchs und des Versauerungspotentials dargestellt.

Tabelle 5.5: Umweltwirkungen der Herstellung von einer Tonne RC-Brechsand durch das untersuchte Nassaufbereitungsverfahren

| | KEV in kWh | CO ₂ -Äqu. in kg | SO ₂ -Äqu. in kg | NMVOC Äqu. in kg | Flächen- verbrauch in m ² |
|--|---------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------------|--|
| Stromverbrauch für die Aufbereitung | 14,81 | 3,17 | 4,29E-03 | 2,08E-04 | 1,190E-03 |
| Transport der Reststoffe zum Kompostwerk | 1,61 | 0,45 | 3,34E-03 | 5,80E-04 | 8,80E-05 |
| Radlader zur Beschickung der Anlage | 0,61 | 0,17 | 1,27E-03 | 2,21E-04 | 3,36E-05 |
| Rücktransport des Überkorns | 0,013 | 3,56E-03 | 2,65E-05 | 4,61E-06 | 7,00E-07 |
| Wasserverbrauch | 2,01E-07 | 0,04 | 1,78E-04 | 9,07E-05 | n.b.* |
| Summe | 17,05 | 3,83 | 9,11E-03 | 1,10E-03 | 1,31E-03 |

* Wert nicht bekannt

Vergleicht man die Umweltwirkungen für die Aufbereitung von Betonbrechsand mit den Werten für die Sandbereitstellung, so liegt der KEV für den nass aufbereiteten Betonbrechsand um ca. 37 % unter dem in Gemis für Natursand angegebenen Wert [189] (siehe Abbildung 5.2). Die Umweltwirkungen in den anderen Wirkungskategorien des nass aufbereiteten Betonbrechsandes liegen – bis auf das Ozonvorläuferpotential – noch deutlicher unter denen der Natursandbereitstellung.

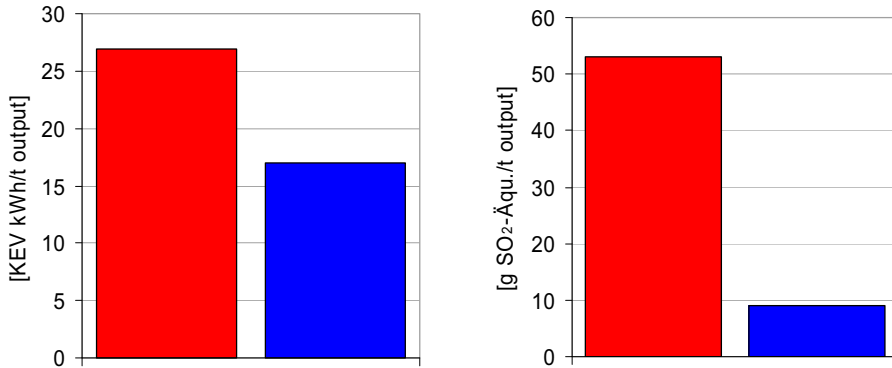


Abbildung 5.2: Kumulierter Energieverbrauch und entstehendes Versauerungspotential für die Herstellung von einer Tonne Natursand (rot) und von einer Tonne nass aufbereitetem Betonbrechsand (blau)

In Abbildung 5.3 sind der kumulierte Energieverbrauch und die Umweltwirkung Versauerungspotential nach den Anteilen, welche die einzelnen Prozessschritte an der jeweiligen Umweltwirkung haben, aufgeschlüsselt. Anhand der Grafiken ist zu erkennen, dass die verschiedenen Arbeitsschritte den kumulierten Energieverbrauch und das Versauerungspotential unterschiedlich stark beeinflussen. Während der KEV vom Energieverbrauch der Nassaufbereitung dominiert wird, wird die Wirkungskategorie AP in etwa gleichem Maße von Umschlag- und Transportprozessen mit dieselbetriebenen Aggregaten beeinflusst.

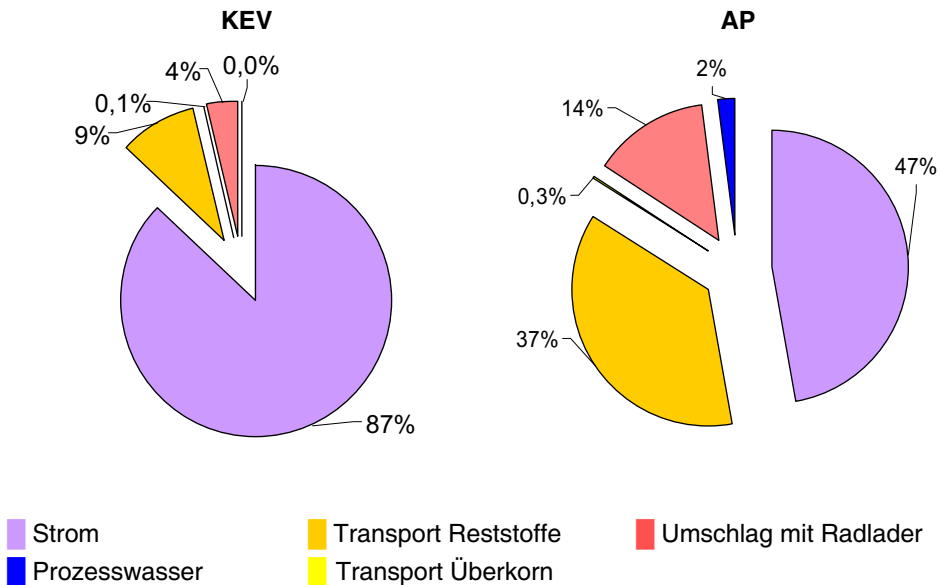


Abbildung 5.3: Entstehung von kumuliertem Energieverbrauch und Versauerungspotential bei der Herstellung von einer Tonne nass aufbereitetem Betonbrechsand

Es wird deutlich, dass veränderte Grundlagen für die Bewertung des Nassaufbereitungsverfahrens, beispielsweise ein niedrigerer Stromverbrauch der Anlagentechnik oder eine größere Transportstrecke für die Reststoffe nicht nur Veränderungen des Energieverbrauchs bewirken, sondern auch zu anderen Gewichtungen der Umweltwirkungen führen können. So erklärt sich auch die Notwendigkeit durch eine sorgfältige Dokumentation des ökobilanziellen Szenarios und der Datenquellen eine Vergleichbarkeit der berechneten Umweltwirkungen sicherzustellen.

Auf der Grundlage der hier verwendeten Datenquelle liegt der für den RC-Brechsand berechnete kumulierte Energieverbrauch unter dem entsprechenden Wert für Natur sand. Andere Quellen geben niedrigere Werte für den aggregierten Energieverbrauch an. Auch die Werte für die Umweltauswirkungen differieren. Eyerer hat den energetischen Aufwand für die Bereitstellung von Sand mit 9,6 kWh/t (34,4 MJ/t) angegeben [176]. Auch die ebenfalls von Eyerer untersuchten Werte der Wirkungskategorien GWP und AP liegen unter den in dieser Arbeit berechneten Ergebnissen.

Ein niedrigerer Energieverbrauch für die Gestellung von Sand wurde auch von der Forschungsstelle für Energiewirtschaft (FFE) ermittelt. Mit 12,2 kWh/t Sand (44 MJ/t) liegt der Energieverbrauch um ca. 30 % unter den hier ermittelten Werten. Gleiches gilt für die Entstehung von CO₂-Äquivalenten in der Wirkungskategorie GWP.

Die Werte der vor allem vom Dieserverbrauch beeinflussten Wirkungskategorien AP und Ozonvorläuferpotential sind jedoch um ein Vielfaches höher.

Wird die Herstellung von Brechsand, für welchen die FFE ebenfalls Werte veröffentlicht hat, zum Vergleich herangezogen, ergibt sich ein anderes Bild. Hier liegen der Energieaufwand mit 18,3 kWh/t (66 MJ/t) und die Umweltwirkung GWP in der gleichen Größenordnung wie für die Nassaufbereitung von Betonbrechsand in dieser Arbeit. Zurückzuführen ist dies vermutlich auf den für das Brechen der Natursteine aufzuwendenden Stromverbrauch. Für das Versauerungs- und das Ozonvorläuferpotential sind die Werte nur unwesentlich höher als die für den nicht gebrochenen Natursand der gleichen Studie.

Die zur Bewertung des in dieser Arbeit untersuchten Nassaufbereitungsverfahrens durchgeführte Stoffstromanalyse zeigt unter Berücksichtigung der Ergebnisse der verfahrenstechnischen Bewertung, dass in Bezug auf die Umweltwirkungen des Nassaufbereitungsverfahrens noch Optimierungsmöglichkeiten bestehen. Die in Abbildung A 5 dargestellte Verteilung des Stromverbrauchs während der Nassaufbereitung zeigt klar, dass der Aufschluss des Betonbrechsandes im Eirich-Mischer der Prozessschritt mit dem größten Energieverbrauch im untersuchten Nassaufbereitungsverfahren ist. Unter Berücksichtigung der Untersuchungen des Aufschlussaggregates in Kapitel 4.1.2, in denen festgestellt wurde, dass der Einfluss des Attritionsmischers auf die Qualität des Betonbrechsandes nur von geringer Bedeutung war, sollte das an dieser Stelle vorgesehene Aggregat durch einen weniger aufwendigen Mischer ersetzt werden. Dies würde sowohl die Umweltwirkungen der Nassaufbereitung verringern als auch die Anlagenkosten voraussichtlich reduzieren. Durch den Einsatz eines Mixers mit einem Drittel des Energieverbrauchs könnten KEV und GWP des nass aufbereiteten Betonbrechsandes um ca. 20 % reduziert werden.

Die Einsparung an Umweltwirkungen relativiert sich bei der Betrachtung des Einsatzes von RC-Brechsand in Beton. Der Vergleich von Beton mit einem Anteil von 20 % nass aufbereitetem Betonbrechsand an der Gesteinskörnung und einem Referenzbeton gleicher Rezeptur ist in Tabelle 5.6 dargestellt.

Tabelle 5.6: Vergleich der Umweltwirkungen der Herstellung von einem m³ Beton mit einem Anteil von 20 % Schwergut an der Gesteinskörnung und einem m³ Referenzbeton

| | 1 m ³ RC-Beton | 1 m ³ Referenzbeton | Prozentuale Veränderung [%] |
|--|---------------------------|--------------------------------|-----------------------------|
| KEV [kWh] | 481,9 | 486,1 | -0,9 |
| Treibhauseffekte [kg CO ₂ -Äqu.] | 314,9 | 316,2 | -0,4 |
| Versauerungspotential [kg SO ₂ -Äqu.] | 0,61 | 0,62 | -2,6 |
| Ozonvorläuferpotential [kg NMVOC-Äqu.] | 0,02 | 0,02 | -0,5 |
| Verbrauch mineralischer Ressourcen [t] | 1461 | 1826 | -20,0 |
| Naturraumbeanspruchung [m ²] | 0,68 | 0,70 | -3,2 |

Erwartungsgemäß zeigt sich die deutlichste Verbesserung der Umweltwirkungen durch den Einsatz von RC-Brechsand bei der Verringerung des Verbrauchs mineralischer Rohstoffe. Anhand Tabelle 5.6 wird ersichtlich, dass mit dem RC-Beton im Vergleich zum Referenzbeton ansonsten nur geringe Verbesserungen in Bezug auf die Gesamtumweltwirkung zu erzielen sind. Zu erklären ist dies mit dem hohen Energieverbrauch, der für die Produktion des für die Betonherstellung verwendeten Portlandzementes erforderlich ist und der dadurch alle Wirkungskategorien dominiert. In Abbildung 5.4 sind der kumulierte Energieverbrauch und das Versauerungspotential des RC-Betons aufgeschlüsselt nach den Anteilen, welche die einzelnen Bestandteile des Betons an der jeweiligen Umweltwirkung haben, dargestellt.

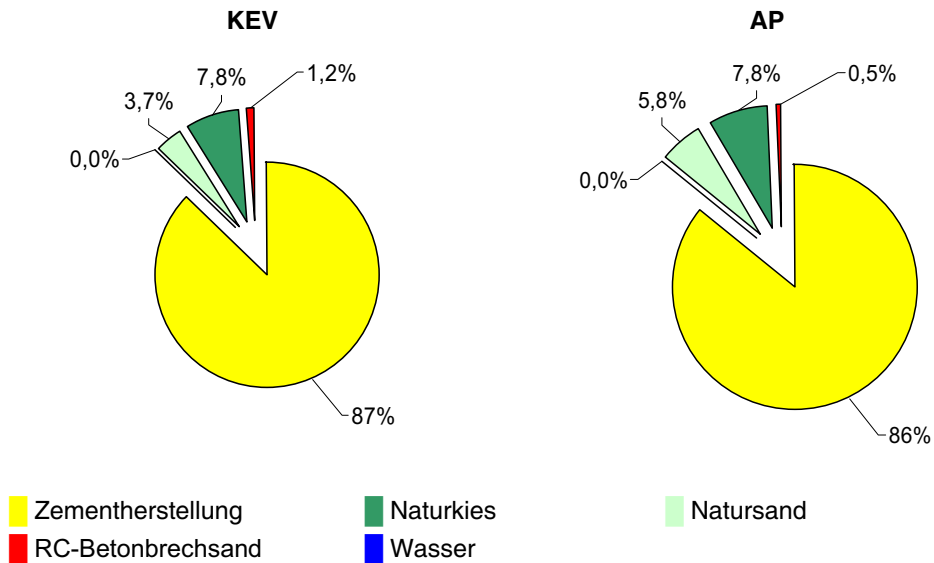


Abbildung 5.4: Entstehung von kumuliertem Energieverbrauch und Versauerungspotential bei der Herstellung von 1 m³ RC-Beton

Auch die anderen bewerteten Umweltwirkungen wie GWP etc. werden am stärksten von den Auswirkungen der Zementherstellung beeinflusst (siehe Tabelle A4 und A5). Daher würde auch der Einsatz von RC-Betonbrechsand, der mit einem Mischer mit geringerem Energieverbrauch hergestellt worden wäre (siehe oben), die Umweltwirkungen des RC-Betons nur in Größenordnungen von weniger als 1 % verbessern. Ähnliches gilt für die Auswirkung der Reduzierung von Zwischentransporten und andere Maßnahmen bei der Nassaufbereitung von Betonbrechsand.

Den größten Anteil an der Verursachung der Umweltwirkungen von Beton hat die Zementzugabe. Mit einer Verringerung der Zementzugabe – mit den entsprechenden Auswirkungen auf die Qualität des Betons – ist auch das größte Einsparpotential an Energieverbrauch und Umweltwirkungen zu erreichen. Weiterhin ist beispielsweise die Verwendung von Hochofenzement mit deutlich geringeren Umweltwirkungen verbunden als der Einsatz des auch in dieser Arbeit verwendeten Portlandzementes [189, 216].

Vergleiche mit anderen Studien zeigen ebenfalls, dass die Umweltwirkungen von RC-Betonen primär durch die Zementzugabe verursacht werden. Der kumulierte Energieaufwand (KEA) eines von Eyerer untersuchten Betons der Klasse C 30/37 lag mit 1792 MJ/m³ bzw. 498 kWh/m³ [176] in der gleichen Größenordnung wie der KEV des in dieser Arbeit bewerteten Betons derselben Klasse (1735 MJ/m³ bzw. 482 kWh/m³). Da in der dortigen Studie mit 360 kg Zement pro m³ Beton 16 % mehr Zement eingesetzt

wurde als bei dem in dieser Arbeit untersuchten Beton, handelt es sich möglicherweise um einen Mischwert, in den auch Ergebnisse von Betonen mit Hochofenzement eingeflossen sind.

Der kumulierte Energieaufwand für die Herstellung von Betonen der Klasse C 20/25 in den Studien von Eyerer und Hutter (FFE) ist mit 1350 MJ/m³ und 1448 MJ/m³ ebenfalls gut vergleichbar [176, 216]. In den Untersuchungen von Weil und Jeske bewegt sich der KEA für RC- und Vergleichsbetone der Klasse C20/25 zwischen 1272 - 1740 MJ/m³, jedoch waren die Zementzugaben für diese Betone unterschiedlich hoch [193]. Ein höherer Zementbedarf für die RC-Betone – und damit verbunden ein höherer Energieaufwand – wurde auch mit dem Ausgleich potentieller Druckfestigkeitsverluste aufgrund der unterschiedlich hohen Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen begründet.

Eine höhere Zementzugabe für die Erreichung der Qualität der Referenzbetone war bei den in dieser Arbeit untersuchten RC-Betonen nicht erforderlich. Daher hat auch die ökobilanzielle Bewertung der Betone mit Anteilen an nass aufbereitetem Betonbrechsanden zu einem positiven Ergebnis geführt. Neben geringfügigen Verbesserungen in Bezug auf den kumulierten Energieverbrauch und die untersuchten Umweltwirkungen GWP, AP, Ozonvorläuferpotential und Naturraumbeanspruchung führte der Einsatz des nass aufbereiteten Betonbrechsandes im Beton vor allem zu einer deutlichen Reduzierung des Verbrauchs an mineralischen Ressourcen.

5.3 Ökonomische Bewertung

5.3.1 Szenario der ökonomischen Bewertung

Die ökonomische Bewertung des Aufbereitungsprozesses wurde ebenfalls auf der Basis des Entwurfs einer Anlage zur Dichttrennung von Betonbrechsand mit einem Durchsatz von 100 t/h durchgeführt (Tabelle A 2, Abbildung A 1). Zur Abschätzung der Investitionskosten wurden nach Möglichkeit Herstellerangaben für die Kosten der Aggregate verwendet. Nicht vorliegende Daten wurden unter Verwendung der Baugeräteliste 2001 [217] anhand vergleichbarer Aggregate sowie mittels Internetrecherche überschlägig ermittelt. Die so berechneten Investitionskosten sind im Anhang, Tabelle A 3, aufgelistet.

Die Betriebskosten wurden anhand der Ergebnisse aus den Versuchen mit der Pilotanlage, den Werten der geplanten Modellanlage und auf der Basis von Literaturangaben [174, 218-221] und Daten der Baugeräteliste 2001 [217] abgeschätzt. Für die Verbrauchsmittel Energie, Wasser und Flockungsmittel wurden Preise aus dem Jahr 2007 verwendet.

In der Berechnung der Herstellungskosten des RC-Betonbrechsandes wurden keine Erlöse für die Annahme von Altbeton berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass

diese für den Betrieb der trockenen Aufbereitungsstrecke verwendet werden. Ebenso werden keine Ersparnisse für Deponierungskosten in der Kalkulation berücksichtigt. Ursache hierfür ist die hohe Qualität des Ausgangsmaterials. Da es sich bei dem in der Nassaufbereitung eingesetzten Betonbrechsand um schadstofffreies oder nur sehr gering belastetes Material handelt, kann davon ausgegangen werden, dass zumindest ein Teil dieses Materials ohne Nassaufbereitung hätte weiterverwertet werden können. Mögliche Entsorgungskosten für andere Teile des Materials hätten mit diesen Erlösen ausgeglichen werden können, so dass nicht von einer Einsparung von Entsorgungskosten ausgegangen werden konnte.

5.3.2 Ergebnisse der ökonomischen Bewertung

Die Details zur Kalkulation der Herstellungskosten für RC-Betonbrechsand als Gesteinskörnung für die Betonproduktion sind im Anhang in den Tabellen A 3, A 8 und A 9 enthalten. Auf der Basis der oben angegebenen Voraussetzungen und Annahmen könnte der nass aufbereitete Betonbrechsand für einen Nettoverkaufspreis von 9,90 Euro pro Tonne produziert werden.

Stichproben von im Jahr 2007 marktüblichen Preisen für qualitativ hochwertige Recyclingsande zeigte eine Preisspanne zwischen 7,50 Euro und 10,00 Euro netto pro Tonne. Damit läge der in dieser Arbeit kalkulierte Herstellungsaufwand für eine Tonne RC-Betonbrechsand noch im Rahmen der für Betonbrechsande erzielbaren Erlöse. Eine Stichprobe von Preisen für Natursand für die Betonherstellung im gleichen Zeitraum ergab Preise zwischen 10,00 Euro und 15,40 Euro pro Tonne. Der Preisdurchschnitt lag bei 11,75 Euro pro Tonne. Im Vergleich würde dies einen leichten Preisvorteil des nass aufbereiteten Betons bedeuten, wobei jedoch in jedem Fall regionale Gegebenheiten und Preisniveaus zu berücksichtigen sind.

Bei den ökonomischen Betrachtungen wird davon ausgegangen, dass die kalkulierte Modellanlage mit einem relativ großen Durchsatz an Betonbrechsand beschickt wird und dass die Nassaufbereitung als Ergänzung zu einer bestehenden trockenen Bauschutt- bzw. Altbetonaufbereitungsanlage in deren unmittelbarer Nähe errichtet wird. Dies bedeutet, dass Teile der Infrastruktur (z.B. der eingesetzte Radlader) gemeinsam genutzt werden. Das gilt auch für einen flexiblen Personaleinsatz, so dass an dieser Stelle vergleichsweise niedrige Betriebskosten angesetzt werden können. Beispielsweise ist der Einsatz des verantwortlichen Ingenieurs nur für einige Stunden pro Woche vorgesehen. Demgegenüber stehen mit einem Ansatz von 14 % die vergleichsweise hohen Gemeinkosten (mit Wagnis und Gewinn) eines größeren Betriebes.

Die Einbindung in den Betrieb eines größeren Baustofflieferanten hätte weiterhin den Vorteil, dass die Nassaufbereitungsstrecke auch für andere Anwendungen wie das

Waschen von Natursanden eingesetzt werden könnte, so dass die kontinuierliche Auslastung der Anlage sichergestellt werden könnte.

Abschließend kann festgestellt werden, dass es unter bestimmten Voraussetzungen durchaus möglich sein kann, Betonbrechsand mit dem in dieser Arbeit untersuchten Verfahren als konkurrenzfähiges Produkt für den Einsatz in der Betonherstellung zu produzieren.

6. Diskussion

In der vorliegenden Arbeit wurde ein Verfahren zur Nassaufbereitung von Betonbrechsanden in Hinblick auf einen Wiedereinsatz der aufbereiteten Körnungen als Gesteinskörnung in der Betonherstellung untersucht. Das Verfahren beinhaltet als wesentliche Prozessschritte den Aufschluss der Körnungen durch Abrasionsbehandlung, eine anschließende Klassierung zur Entfernung des zementsteinreichen Feinstgutes und danach – als wichtigsten Verfahrensschritt – eine Dichtesortierung mittels Setzmaschinenteknik. Gegenstand dieser Arbeit war die Beurteilung der Verfahrenstechnik und der erzielten Baustoffqualität anhand experimenteller Untersuchungen. Darauf aufbauend wurden eine ökologische und eine ökonomische Bewertung des Gesamtprozesses vorgenommen.

6.1 Verfahrenstechnische Bewertung

Der Einsatz von nassmechanischen Verfahrensschritten zur Verbesserung der Materialeigenschaften von rezyklierten Körnungen wurde schon in verschiedenen Arbeiten beschrieben. Dabei wurde überwiegend festgestellt, beispielsweise von Chen [66], Hendriks [109] und Miranda [222], dass das Durchlaufen von Nassaufbereitungsverfahren in der Regel zu höherer Produktqualität führt. Auch die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche zeigten, dass das untersuchte Verfahren geeignet ist, um die Baustoffeigenschaften von Betonbrechsanden in Hinblick auf einen Einsatz als Gesteinskörnung in der Beton- oder Mörtelproduktion zu verbessern.

Die Verbesserung der Materialeigenschaften der als Schwergut gewonnenen Gesteinskörnung wurde größtenteils durch die Dichtentrennung mittels Setzmaschinenteknik erreicht. Trotz nur geringer Dichteunterschiede der zu sortierenden Körnungen war die Dichtentrennung der Betonbrechsande erfolgreich. Die Natursteinkomponente des Betonbrechsandes wurde im Schwergut angereichert, der Zementsteingehalt wurde durch das untersuchte Aufbereitungsverfahren reduziert. Die Reindichte des Schwergutes erhöhte sich im Vergleich zum jeweiligen Ausgangsmaterial von $2,52 \text{ g/cm}^3$ auf $2,58 \text{ g/cm}^3$, was im Mittel einer Zunahme um 2 % entspricht. Bei der Kornrohddichte ist eine deutliche Zunahme zu erkennen. Die durchschnittliche Kornrohddichte des Ausgangsmaterials betrug $2,06 \text{ g/cm}^3$, die des Schwergutes $2,25 \text{ g/cm}^3$. Die Zunahme betrug im Mittel 9,2 %. Die Gesamtporosität des Schwergutes verringerte sich deutlich, im Durchschnitt um mehr als 30 %.

Die Siebanalysen zeigten, dass es während des Setzprozesses der Brechsande zu Klassierungseffekten kam. Das ausgetragene Leichtgut wies durchgehend kleinere Körnungsziffern und damit feinere Korngrößenverteilungen auf als das Schwergut. Diese Klassierungseffekte sind zum einen durch die unterschiedlichen Sinkgeschwindigkeiten von Körnern gleicher Dichte und unterschiedlicher Größe verursacht. Zum anderen weisen die feineren Körner zusätzlich größere spezifische Oberflächen und entsprechend auch höhere Zementsteinanhaftungen auf. Die feineren Körner sind also

spezifisch leichter als die gröberen. Die Korngrößenbedingten Unterschiede der Sinkgeschwindigkeiten werden so verstärkt.

Der Zusammenhang zwischen der Zementsteinanreicherung und der Feinheit des Materials wurde auch durch die Ergebnisse der Säureaufschlüsse der einzelnen Korngrößenfraktionen bestätigt. Durch ihre höheren Zementsteingehalte haben die feineren Partikel auch eine geringere Dichte, so dass sich Klassierung und Dichtesortierung wechselseitig beeinflussen und verstärken.

Der Einfluss der unterschiedlichen Setzmaschineneinstellungen auf die Materialeigenschaften der Austragsgüter war nur gering. Dies spricht für eine robuste Anlagentechnik. Mit den unterschiedlichen Anlageneinstellungen wurde primär das Verhältnis des Produktes Schwergut zum Reststoff Leichtgut gesteuert. In den durchgeführten Versuchen stellte sich eine Austragsmenge von 75 % Schwergut am Gesamtaustrag des Verfahrens, der sich aus Schwergut, Leichtgut und Feinstgut zusammensetzte, als günstig heraus. Dies entspricht einem Verhältnis von Schwergut zu Leichtgut von 80 % zu 20 % am Austrag der Setzmaschine. Bei Austragsverhältnissen in dieser Größenordnung war eine deutliche Reduzierung der Zementsteingehalte im Schwergut gegeben. Eine weitere Verschiebung zu höheren Schwergutausträgen führte zu Einbußen bei der Qualitätsverbesserung des Schwergutes.

Die erreichten Schwergutausträge sind vergleichbar mit den Ergebnissen einer Untersuchung zur Dichtentrennung von Bauschuttkörnungen > 4 mm mittels Setztechnik, in der – in Abhängigkeit vom Ausgangsmaterial – gute Trennergebnisse beim Verhältnis von 63 % Schwergut zu 37 % Leichtgut bzw. 93 % zu 7 % erreicht wurden [223].

Der für den Aufschluss der RC-Gesteinskörnungen eingesetzte Mischer sollte durch mechanischen Energieeintrag die Abrasion des Zementsteins von den Körnern bewirken. Bei einem Vergleich der Auswirkungen unterschiedlicher Energieeinträge auf die Reduzierung der Zementsteinmatrix im Schwergut zeigten sich jedoch nur geringe Unterschiede zwischen den verschiedenen Mischereinstellungen. Auch bei einer Variation der Verweilzeit des Untersuchungsmaterials im Mischer wurde der Zementstein Gehalt des Schwergutes nur wenig beeinflusst.

Insgesamt wurde mit dem eingesetzten Mischer nur eine mäßige Aufschlusswirkung erreicht. Daneben traten beim Einsatz des Mixers weitere Nachteile auf:

- Die intensive Durchmischung des Versuchsmaterials führte zu einem vergleichsweise hohen Energieverbrauch und damit verbunden zu einer ungünstigen Beeinflussung der ökologischen und ökonomischen Bewertung des Verfahrens.

- Der Mischer arbeitete im Batchbetrieb. Der Austrag erfolgte also diskontinuierlich, so dass es zu einer ungleichmäßigen Materialzufuhr in die Setzmaschine kam. Dies führte zu Störungen in der Setzbettausbildung.

In dem hier untersuchten Verfahren hat sich das Aufschlussaggregat daher als weniger geeignet erwiesen.

Der für die Feinstkornabtrennung nach dem Aufschluss eingesetzte Hydrozyklon mit einem Trennschnitt von 100 µm diente zur Klassierung des Mischeraustrages. Neben der Reduzierung des Zementsteingehaltes im Materialhauptstrom wurden auf diese Weise auch bereits vor der Nassaufbereitung vorhandene abschlämbare Bestandteile aus den Austragsgütern Schwergut und Leichtgut entfernt.

Der über die Analysen nachgewiesene Abrieb der Bindemittelmatrix von den Natursteinkörnern ist vermutlich auch durch Abrasionsvorgänge bei den trockenen und nassen Materialtransporten des Brechsandes entstanden. Auch in anderen Untersuchungen wurde festgestellt, dass es allein durch den Setzvorgang infolge der Bewegungen des Setzbettes zum Abrieb der Zementsteinmatrix vom Natursteinkorn kommen kann [168]. Dies könnte auch eine Ursache dafür sein, dass ein vergleichsweise hoher Anteil an Partikeln < 100 µm im Leichtgut vorhanden war, obwohl der Klassierungsschritt vorausging. So betrug der Massenanteil der Fraktion < 100 µm im Leichtgut bei den Versuchen mit dem Material BS im Mittel 7,0 %.

Die Verringerung des Zementsteingehaltes in rezyklierten Gesteinskörnungen wird in zahlreichen Untersuchungen als positiv für die Qualität der Körnungen bewertet [6, 81, 141]. Abschlämbare Bestandteile sind in Gesteinskörnungen für die Baustoffherstellung nicht erwünscht und ihre Entfernung aus dem Materialhauptstrom kann daher ebenfalls ein Ziel von Aufbereitungsverfahren sein [13, 29]. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen führte der Austrag dieser Körnungen mit dem Feinstgut gleichzeitig auch zu Veränderungen der Sieblinien. Vor allem die Sieblinien des Schwergutes wichen im Mehlkornbereich von der Fullersieblinie ab, für die eine hohe Packungsdichte erwartet werden kann. Diese Abweichung hatte möglicherweise einen Einfluss darauf, dass die Baustoffqualität einiger Mörtel aus Schwergut geringer war als die Qualität der Mörtel aus den jeweiligen Ausgangsmaterialien. Bei der Zusammenstellung der Sieblinien der Gesteinskörnungen für die RC-Betonherstellung wurde den Mischungen entsprechend auch natürliche Gesteinskörnung 0/0,5 mm zugegeben, um dieses Defizit auszugleichen.

6.2 Baustofftechnische Bewertung

Die Verbesserung der Materialeigenschaften des nass aufbereiteten Schwergutes in Hinblick auf eine Verwertung als Gesteinskörnung in der Baustoffherstellung konnte mit dem untersuchten Aufbereitungsverfahren erreicht werden. Für die Bewertung der

Qualität des aufbereiteten Produktes Schwergut wurden Untersuchungen an Körnungen, RC-Mörteln und RC-Betonen durchgeführt. Die Ergebnisse der Schwergutanalysen wurden mit denen von Ausgangsmaterialien, Natursand und teilweise Leichtgut und Feinstgut verglichen.

Die mittels Nassaufbereitung als Schwergut gewonnenen Gesteinskörnungen zeichneten sich vor allem durch eine Reduzierung des Zementsteingehaltes im Vergleich zu den Ausgangsmaterialien aus. In Abhängigkeit vom Versuchsmaterial verringerte sich der Zementsteinanteil – gemessen als salzsäurelösliche Bestandteile – in den Schwergütern im Mittel um 5 %, im Hauptversuchsmaterial BS von 21 % auf 16 %. Gleichzeitig konnte die beabsichtigte Anreicherung von Zementstein in den Reststoffen Leicht- und Feinstgut festgestellt werden. Besonders hervorzuheben ist, dass die Reduzierung des Zementsteingehaltes im Schwergut in jedem Versuch erreicht wurde.

Infolge der geringeren Zementsteingehalte im Produkt kam es auch zu einer Reduzierung der Wasseraufnahme und der Porosität. Der Zusammenhang zwischen Wasseraufnahme und Zementsteingehalt konnte nachgewiesen werden. In Abbildung 6.1 sind die Mittelwerte der Wasseraufnahme von Schwergut, Ausgangsmaterial und Leichtgut der Hauptversuchsserien als Funktion des Zementsteingehalts im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen dargestellt.

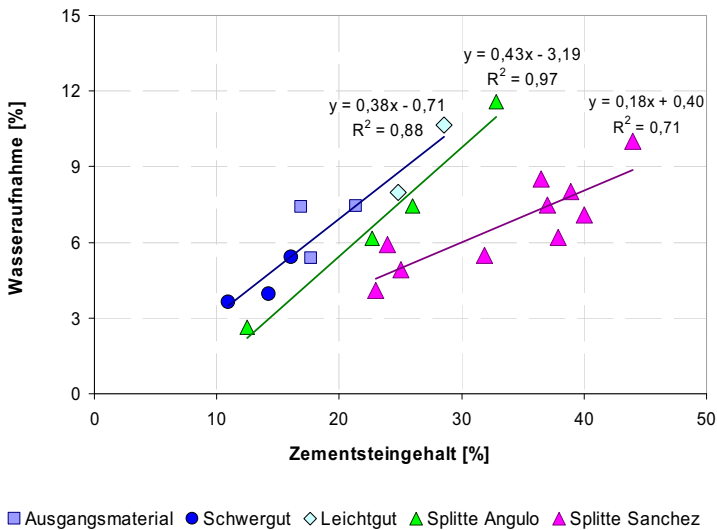


Abbildung 6.1: Mittelwerte von Wasseraufnahmen als Funktion des Zementsteingehaltes, Serien BS, REM und VS im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen [224, 225]

Die Abhängigkeit der Wasseraufnahmen vom Zementsteingehalt der Körnungen, der z.B. von Angulo und Sanchez für Splitte festgestellt wurde, konnte in dieser Arbeit auch für Betonbrechsande aufgezeigt werden [224, 225].

Weiterhin wurde eine Erhöhung von Kornrohdichten und Reindichten der untersuchten Schwergüter gegenüber den Ausgangsmaterialien und den Leichtgütern festgestellt. Auch für die Kornrohdichten der Betonbrechsande konnte eine lineare Abhängigkeit für Zementsteingehalte im Bereich von 10 % bis 30 % nachgewiesen werden. Angulo hat in seinen Untersuchungen an Splitten ebenfalls einen signifikanten Zusammenhang zwischen dem Zementsteingehalt und der Kornrohdichte festgestellt. Auch Müller und Wiens ermittelten in ihren Arbeiten zum Mehrfachrecycling von Altbetonsplitten eine Abnahme der Kornrohdichte mit zunehmendem Zementsteingehalt [226]. In Abbildung 6.2 sind die Mittelwerte der Kornrohdichten der Hauptversuchsserien dieser Arbeit als Funktion des Zementsteingehaltes im Vergleich zu den von Angulo sowie von Müller und Wiens für Splitte ermittelten Werten dargestellt.

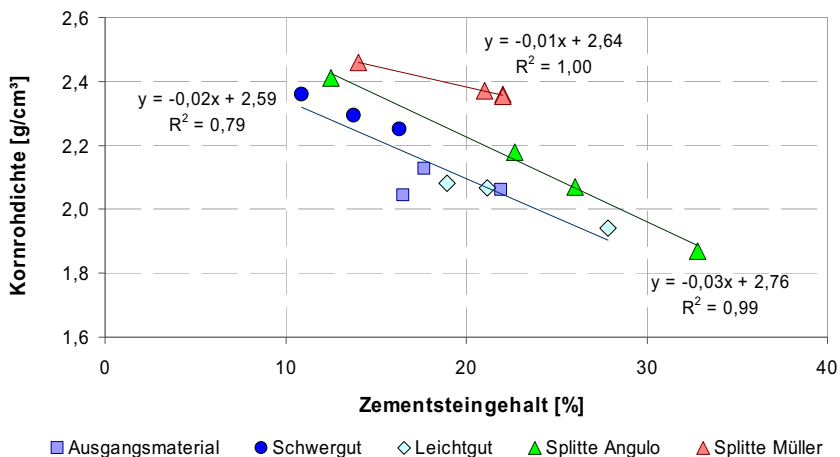


Abbildung 6.2: Kornrohdichten als Funktion des Zementsteingehaltes, Serien BS, REM und VS im Vergleich zu den Ergebnissen anderer Untersuchungen [224, 226]

Bei der Bewertung dieser Ergebnisse ist zu beachten, dass zur Bestimmung der Zementsteingehalte unterschiedlichen Messmethoden angewandt wurden. In den Untersuchungen Angulos erfolgten die Dichtebestimmungen mittels Schwimm-Sink-Trennungen mit Natriumpolywolframat als Schwerflüssigkeit. Müller und Wiens haben den Zementsteingehalt ebenfalls nicht über Salzsäureaufschlüsse, sondern auf der Basis von Röntgenfluoreszenzanalysen und Glühverlustmessungen ermittelt. Anhand der den Autoren vorliegenden Angaben zum Altbeton schätzten Müller und Wiens die Rohdichte des Zementsteins mit 1,4 g/cm³ und die Rohdichte des Natursteins

mit $2,63 \text{ g/cm}^3$ ab. Während eine Extrapolation der vorliegenden Werte von Müller und Wiens eine fast identische Rohdichte des Zuschlags von $2,63 \text{ g/cm}^3$ ergibt, liegt die Zementsteinrohddichte mit $1,64 \text{ g/cm}^3$ deutlich höher als die Annahmen der Autoren.

Im Gegensatz dazu ergibt die Extrapolation der auf den Setzversuchen beruhenden Abhängigkeit zwischen Kornrohddichte und Zementsteingehalt (siehe Abb. 4.14) deutlich geringere Zementsteinrohddichten. Als mögliche Ursachen können benannt werden:

- Das hier angewandte nasse Aufbereitungsverfahren kann zur Lösung bestimmter Bestandteile des Zementsteins wie beispielsweise Ca(OH)_2 führen. Dies würde an den betroffenen Stellen zu einer porösen Struktur mit geringerer Kornrohddichte führen.
- Die untersuchten Betonbrechsande, die aus realen Rückbaumaßnahmen stammten, enthielten neben dem Zementstein weitere leichte Bestandteile, die sich im Verlauf des Aufbereitungsprozesses im Leichtgut anreicherten.
- Die Beanspruchungen der Körnungen vor und während des Aufbereitungsprozesses führten zu einer Differenzierung der feinen, natürlichen Gesteinskörnung in Partikel ohne Gefügestörungen und solche, die Mikrorisse oder andere Gefügestörungen aufwiesen. Diese Partikel weisen eine höhere Porosität und eine geringere Dichte auf und wurden im Leicht- und Feinstgut angereichert.

Experimentelle Nachweise für diese Annahmen wurden nicht geführt. Jedoch zeigten die Auswertungen der Röntgendiffraktometrie keine Hinweise auf Ca(OH)_2 , das oftmals in Altbeton nachgewiesen werden kann. Dies würde auch die vergleichbaren Werte von Angulo erklären, in dessen Untersuchungen Natriumpolywolframat als Schwerflüssigkeit für die Dichtebestimmungen benutzt wurde. Natriumpolywolframat kann ebenfalls kalziumhaltige Verbindungen lösen und so zu einer Veränderung der Dichte führen.

Für die Darstellung in Abbildung 6.2 wurden gemittelte Daten der Hauptversuchsserien verwendet. Eine Betrachtung der nach Materialarten unterschiedenen Einzelwerte der Kornrohddichten führt zu drei unterschiedlichen Regressionsgleichungen für Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut (siehe auch Abbildung 4.13, Material BS). Auf der Basis dieser Gleichungen können über Extrapolation Zementsteinrohddichten von $1,49 \text{ g/cm}^3$ für Schwergut, $1,25 \text{ g/cm}^3$ für Ausgangsmaterial und $0,43 \text{ g/cm}^3$ für Leichtgut berechnet werden. Dies spricht dafür, dass trotz der selektiven Gewinnung der Altbetone neben den Komponenten Natursteinkörnung und Zementstein noch weitere leichte Bestandteile in den Betonbrechsanden vorhanden waren.

In den mikroskopisch untersuchten Proben aller Materialarten konnten zudem zahlreiche Körner mit Gefügestörungen festgestellt werden. Eine Anreicherung dieser beschädigten Partikel war in Leicht- und Feinstgütern zu beobachten. Dabei bezogen sich die Schädigungen nicht nur auf Risse oder Brüche in der Bindemittelmatrix. In

verschiedenen Proben, die durch Säurebehandlung vollständig vom Zementstein befreit worden waren, fanden sich auch Brüche durch die Natursteinkörner. Nagataki stellte in seinen Untersuchungen ebenfalls Kornschädigungen fest [80]. Seine Schlussfolgerung, dass diese Schädigungen einen größeren Einfluss auf die Qualität der Gesteinskörnung haben können als die am Korn anhaftende Altzementsteinmatrix, konnte in der hier durchgeführten Untersuchung nicht bestätigt werden.

Mittels mikroskopischer Untersuchungen konnte außerdem eine Akkumulation von günstig geformten, also kugelförmigen Partikeln im Schwergut festgestellt werden. Eine Ursache für diese Beobachtung ist in dem Sedimentationsverhalten von Körnungen zu finden, da kugelförmige Körner höhere Sinkgeschwindigkeiten entwickeln als platte Körner gleicher Dichte und Porosität. Gleichzeitig wurden verstärkt Körner mit einem höheren Anteil an gut spalt- bzw. brechbaren Mineralen wie Feldspäten in Leichtgut und Feinstgut festgestellt. Im Gegensatz zu Quarz haben Feldspäte kein isotropes Bruchverhalten. Brüche oder Spaltungen von Feldspatkörnern weisen oftmals glatte Flächen auf, die entlang bestimmter Gitterebenen der Kristallstruktur des Minerals verlaufen. Dieses Bruch- bzw. Spaltverhalten der Feldspäte führt vielfach zu platten Kornformen, die vergleichsweise langsam im Setzbett absinken und sich daher im Leichtgut anreichern können. Durch die gute Spaltbarkeit dieser Minerale bei Druckbelastung können Feldspäte nach dem Durchlauf des Altbetons durch Brecheranlagen auch geringere Korngrößen aufweisen. Während Betone mit einer Gesteinskörnung aus Quarz bei Druckbelastung zunächst durch die Zementsteinmatrix brechen, kann Feldspat in Beton, in Abhängigkeit vom angesetzten Belastungspunkt zu den Kristallgitterachsen, leichter brechen als die Zementsteinmatrix. Entsprechend kann durch die Altbetonaufbereitung eine Akkumulation von leichter brech- und spaltbaren Gesteinskörnungen in den feinen Fraktionen erfolgen.

Die Materialeigenschaften der Frischmörtel, die aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut hergestellt wurden, unterschieden sich nur geringfügig. Die Verarbeitbarkeit der Mörtel aus Ausgangsmaterial und Schwergut war in den meisten Fällen gut (Ausbreitmaßklasse F3). Die Mörtel aus Leichtgut waren in der Regel etwas steifer, teilweise konnten diese Mörtel im Gegensatz zu denen aus Schwergut und Ausgangsmaterial nicht zufriedenstellend verarbeitet werden. Bei allen Materialarten musste in Einzelfällen Wasser nachdosiert werden. Auch in der Literatur wurden zur Verarbeitbarkeit von Betonbrechsanden unterschiedliche Ergebnisse vorgestellt. Während Behler und Meyer bei der Betonherstellung Fließmittel zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit einsetzen mussten, wurde die Verarbeitbarkeit des Betons in den Versuchen von Ravindrarajah nicht durch den Einsatz von Betonbrechsanden beeinflusst [18, 78, 227].

Die Untersuchungen der Festmörtel bestätigten die Verbesserung der Qualität der Baustoffeigenschaften des Schwergutes gegenüber den Ausgangsmaterialien, wobei

allerdings zwischen den Auswirkungen auf die Festigkeiten und auf die Elastizitätsmoduli zu unterscheiden ist. Bei einer zusammenfassenden Betrachtung der erzielten Druck- und Biegezugfestigkeiten ergab sich eine Abhängigkeit vom Zementsteingehalt, wobei die Festigkeiten von Mörteln aus Ausgangsmaterialien und Schwergut trotz unterschiedlicher Zementsteingehalte ähnlich waren. Sie lagen über den Festigkeiten der Mörtel aus Leichtgut und in der Regel unter den Werten des Referenzmörtels. In Einzelfällen konnten die Festigkeiten des Referenzmörtels erreicht werden. Bei noch vorhandenen Altzementsteingehalten zwischen 10 % und 30 % scheinen andere Einflussgrößen, wie z.B. eine günstige Korngrößenverteilung, die festigkeitsmindernde Wirkung des Altzementsteins ausgeglichen zu haben. Das wird durch die Berechnungen zu den Abweichungen der vorliegenden Sieblinien von der Regelsieblinie bestätigt.

Während der Korrelationskoeffizient r zwischen Altzementsteingehalt und sowohl der Druckfestigkeit als auch der Biegezugfestigkeit jeweils nur 0,5 betrug, zeigte der Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Abweichung von der generierten Regelsieblinie B 4 einen Wert von $r = 0,74$. Da die Sieblinien der Ausgangsmaterialien wesentlich weniger von einer optimalen Sieblinie für Gesteinskörnungen abweichen als die des jeweiligen Schwergutes, erklärt dies vermutlich auch die im Mittel nur geringen Unterschiede zwischen den Festigkeiten dieser Materialien.

Eindeutige Verbesserungen der Qualität des Schwergutes konnten anhand der Messungen der dynamischen Elastizitätsmoduli festgestellt werden. Hier wurde bei den meisten Versuchen eine deutliche Zunahme der Elastizitätsmoduli der Schwergutmörtel im Vergleich zu den Mörteln aus dem jeweiligen Ausgangsmaterial erreicht. Die Korrelation des E-Moduls mit dem Zementsteingehalt war mit $r = 0,8$ wesentlich höher als die der anderen Messgrößen (Abbildung 4.34). Daher ist der Erfolg der Nassaufbereitung besonders gut an diesem Parameter zu erkennen. Noch deutlicher wird dies bei der Betrachtung der Mittelwerte. In Abbildung 6.3 sind die gemittelten Druckfestigkeiten und E-Moduli von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Hauptversuchsserien als Funktion der Mittelwerte der Altzementsteinanteile an der Gesamtfeststoffzugabe (Gesteinskörnung und Zement) dargestellt.

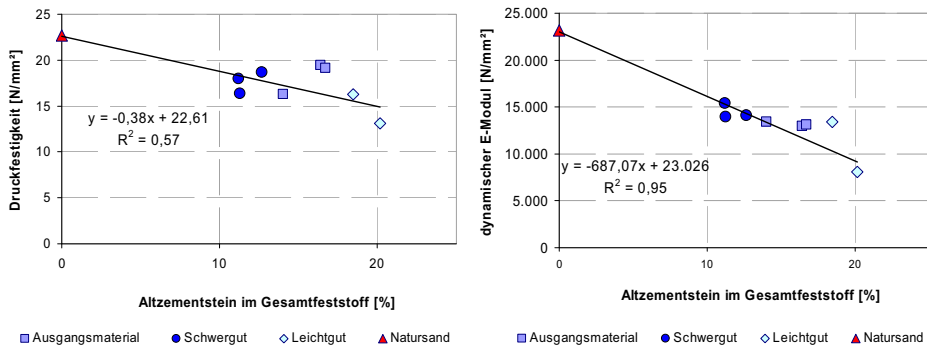


Abbildung 6.3: Druckfestigkeiten (links) und E-Moduli (rechts) von Mörteln aus Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut als Funktion des Altzementsteinanteils der Gesamtfeststoffzugabe, Mittelwerte aller Mörtelversuche der Serien BS, REM und VS

Bei dem dargestellten Zusammenhang beträgt der Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang zwischen E-Modul und Zementsteinanteil $r = 0,97$ gegenüber dem ebenfalls erhöhten Koeffizienten $r = 0,75$ für die Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Zementstein. In Anhang 4 sind ergänzend Berechnungen zur Bewertung des Einflusses von Kenngrößen der RC-Gesteinskörnungen auf die Qualität des RC-Baustoffes aufgeführt.

In verschiedenen Arbeiten wurde die Abhängigkeit des E-Moduls vom Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung beschrieben [4, 78]. Diese Abhängigkeit könnte damit erklärt werden, dass der dynamische E-Modul – im Gegensatz zur Druckfestigkeit, die die Porosität als wichtigste Einflussgröße hat – nicht nur von der Porosität, sondern auch zusätzlich von der Struktur der Calciumsilikathydrate im Zementstein beeinflusst wird. Damit verstärkt sich der Einfluss des Zementsteingehaltes. Das führt dazu, dass bei Mörteln oder Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen die relative, auf den rezyklatfreien Referenzzustand bezogene Abnahme des E-Moduls immer über der Abnahme der Festigkeit liegt [6].

Die Auswertung der Ergebnisse der Versuchsreihen mit RC-Betonen mit Betonbrechsandanteilen von 10 % bis 50 % zeigte den deutlichen Qualitätszuwachs der Schwergutkörnung durch die Nassaufbereitung im Vergleich zum nur trocken aufbereiteten Ausgangsmaterial und den direkten Zusammenhang mit der Reduzierung des Zementsteingehaltes. Die großen Unterschiede, die bei der Zusammenstellung von Literaturwerten in Bezug auf die Materialeigenschaften von RC-Betonen auftreten, können auf diese Weise erklärt werden. Da die Altzementsteingehalte der RC-Gesteinskörnungen stark variieren können, kann es bei gleichem Anteil an RC-Gesteinskörnung große Unterschiede in Bezug auf die Altzementsteingehalte der RC-Betone kommen. Bei-

spielsweise kann eine Rezyklatzugabe von 40 % mit einem Altzementsteingehalt von 15 % den gleichen Altzementsteineintrag zur Folge haben, wie eine Zugabe von 20 % mit einem Altzementsteingehalt von 30 %.

In dieser Arbeit erzielten die RC-Betone mit Schwergutanteilen bei allen untersuchten Kenngrößen (Rohdichte, Druckfestigkeit, dynamischer Elastizitätsmodul und Schwinden) bessere Ergebnisse als die RC-Betone mit Ausgangsmaterialien. Die Werte der Referenzbetone konnten jedoch nicht erreicht werden. Dabei verschlechterten sich die Messwerte mit zunehmendem Gehalt an rezyklierter Gesteinskörnung insgesamt. Die Verringerung der Druckfestigkeitswerte mit steigendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung war dabei erwartungsgemäß geringer als die Veränderungen des dynamischen Elastizitätsmoduls. Abbildung 6.4 zeigt den Zusammenhang zwischen relativer Druckfestigkeit und relativem E-Modul und dem Gehalt an RC-Gesteinskörnung im Beton.

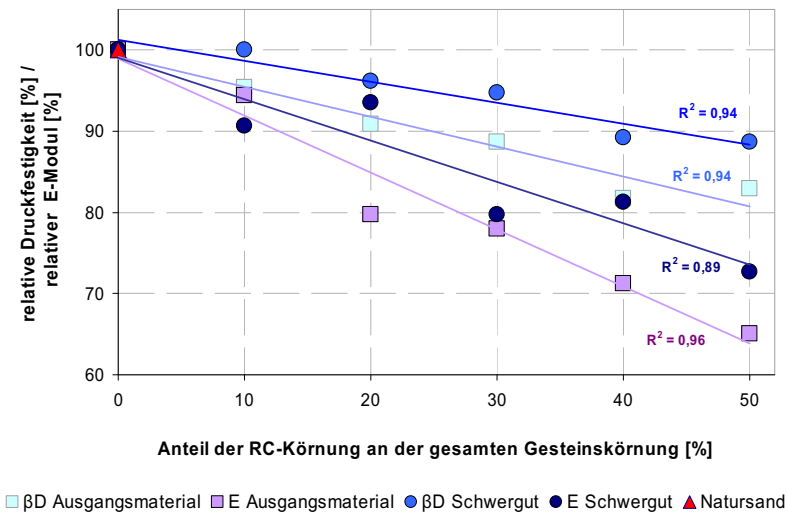


Abbildung 6.4: Relative Druckfestigkeiten und E-Moduli von Beton aus Ausgangsmaterial und Schwergut als Funktion des Anteils der RC-Körnung im Vergleich zum Referenzbeton, Serie BS, Versuch 119

Die Abhängigkeit von Festigkeiten, dynamischem Elastizitätsmodul und Schwinden von dem Gehalt des Betons an rezyklierter Gesteinskörnung wurde schon vielfach in der Literatur beschrieben. Die Beeinflussung von Elastizitätsmodul und Schwinden vom Gehalt an RC-Gesteinskörnung war dabei in den meisten Studien größer als die Veränderungen der Festigkeiten. Dies wurde bereits 1987 von Hansen festgestellt und auch in neueren Untersuchungen bestätigt [4, 71, 72]. In einer aktuellen Arbeit hat Chen einen im Vergleich zur Druckfestigkeit starken Abfall der Werte für den dynamischen Elastizitätsmodul beobachtet [66]. Zudem beschrieb Chen auch die deutliche Verbesserung der Materialqualität von rezyklierten Gesteinskörnungen durch eine

Nassaufbereitung und stellte gleichzeitig fest, dass sich RC-Mörtel klar anders verhalten können als RC-Betone. Diese Ergebnisse stimmen gut mit den Ergebnissen der hier durchgeführten Untersuchungen überein.

Da im Rahmen dieser Arbeit auch die Anteile an Zementstein in den Gesteinskörnungen bestimmt wurden, konnten die für die Betonevaluation gemessenen Werte direkt in Bezug zu den Zementsteingehalten der RC-Gesteinskörnungen gesetzt werden. Dabei wurde festgestellt, dass die Unterschiede zwischen RC-Betonen und Referenzbetonen sehr gut mit dem Altzementsteingehalt der Gesteinskörnungen korrelieren. Auch hierbei wird der größere Einfluss des Altzementsteingehaltes auf den dynamischen E-Modul im Vergleich zur Druckfestigkeit deutlich.

In Abbildung 6.5 sind relative Druckfestigkeiten und E-Moduli in Abhängigkeit vom Altzementsteingehalt des Frischbetons dargestellt. Im Vergleich mit Abbildung 6.4 ist gut zu erkennen, dass sowohl die Druckfestigkeiten als auch vor allem die E-Moduli von Ausgangsmaterial und Schwergut in Bezug auf den Altzementsteingehalt wesentlich stärker miteinander korrelieren als dies bei der Betrachtung der Anteile an RC-Gesteinskörnung an der gesamten Gesteinskörnung der Fall ist. Der steilere Anstieg der Regressionsgerade der E-Moduli weist zudem auf die größere Beeinflussung dieser Kenngröße durch den Altzementstein hin. Demgegenüber liegen die Druckfestigkeiten der Betone mit Schwergutanteilen im Vergleich etwas höher als die Werte der Betone mit Anteilen an Ausgangsmaterial. Ursache hierfür könnten wiederum größere Anteile an ungünstig geformten oder beschädigten Körnern sein. Auch dies spricht für den positiven Einfluss der Nassaufbereitung auf das Produkt Schwergut.

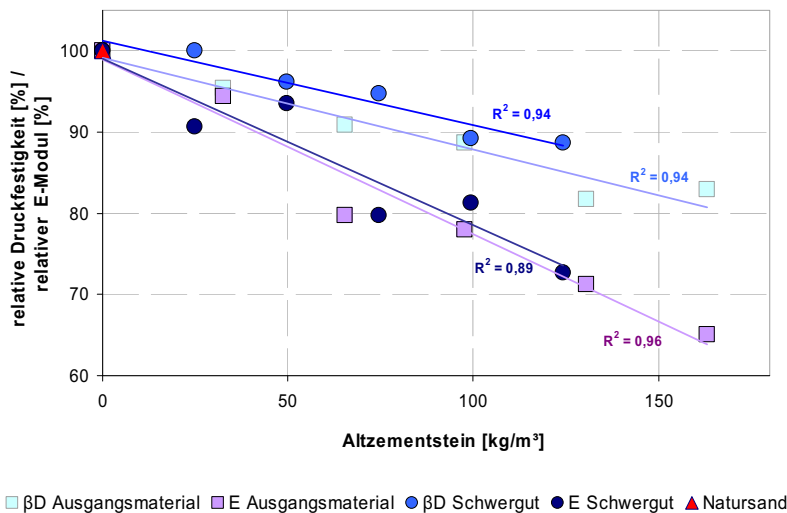


Abbildung 6.5: Relative Druckfestigkeiten und E-Moduli von Beton aus Ausgangsmaterial und Schwergut als Funktion des Altzementsteingehaltes des Betons im Vergleich zum Referenzbeton, Serie BS, Versuch 119

In den einzelnen Versuchsreihen der Betonuntersuchungen war die Korrelation zwischen Druckfestigkeit und Altzementsteingehalt mit einem Korrelationskoeffizienten bis zu $r = 0,94$ sehr gut. Der Korrelationskoeffizient für den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeiten und Altzementsteingehalt aller Betonversuche betrug $r = 0,71$. Die Abhängigkeit der Werte des dynamischen E-Moduls und des Schwindens war mit Korrelationskoeffizienten von jeweils $0,96$ über alle Messreihen noch größer. Somit konnte die Materialverbesserung des mittels Nassaufbereitung aufbereiteten Schwergutes in Hinblick auf den Einsatz in Beton auch durch diese Messungen bestätigt werden. In Abbildung 6.6 und Abbildung 6.7 sind Druckfestigkeiten und dynamische Elastizitätsmoduli als Funktion der Altzementsteingehalte dargestellt. Die Korrelation zwischen E-Modul und Altzementsteingehalt der RC-Betone ließ sich direkt auf die Referenzbetone übertragen. Diese gute Übereinstimmung konnte für den Zusammenhang zwischen Druckfestigkeit und Altzementsteingehalt nicht festgestellt werden. Daher sind in der Abbildung 6.6 die Messwerte der Referenzbetone nicht dargestellt.

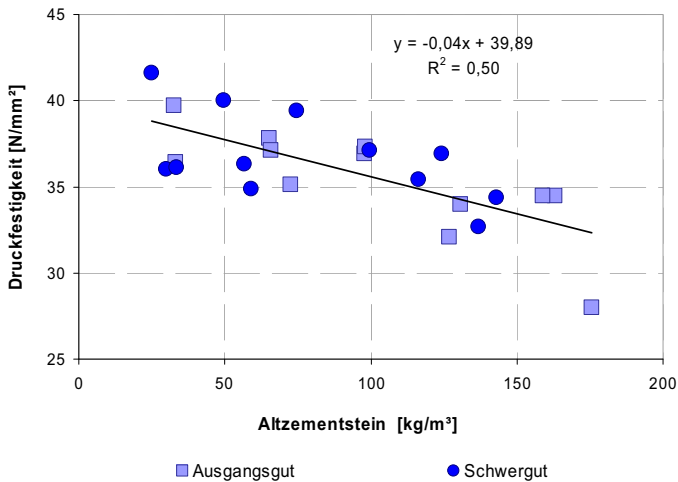


Abbildung 6.6: Druckfestigkeiten als Funktion des Altzementsteingehaltes des RC-Betons, Auswertung der Messwerte aller Betonversuchsreihen

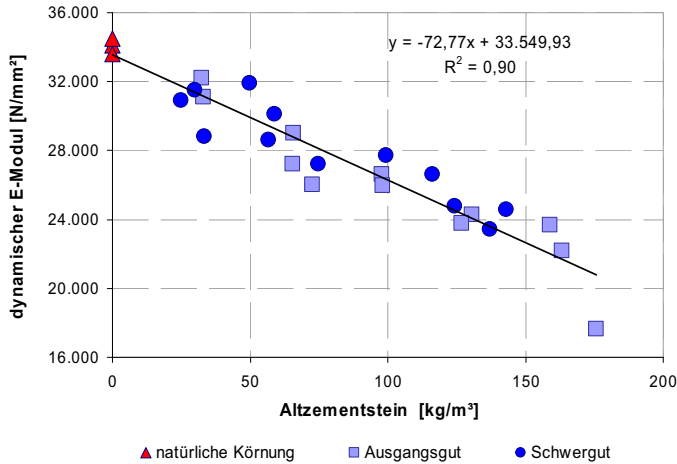


Abbildung 6.7: Dynamische E-Moduli als Funktion des Altzementsteingehaltes des RC-Betons im Vergleich zu den Referenzbetonen, Auswertung der Messwerte aller Betonversuchsreihen

Von verschiedenen Autoren wird auf die Unterschiede der Abhängigkeiten zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und der Druckfestigkeit von RC-Betonen im Vergleich zu Normalbetonen eingegangen. Exemplarisch sollen hier die eigenen Ergebnisse zu dieser Abhängigkeit mit den Werten, die nach der in der Schweiz gültigen Vorschrift SIA 262/1 berechnet und von der EMPA 2007 im Sachstandsbericht „Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat“ veröffentlicht wurden, verglichen werden [228].

$$E = x * \sqrt[3]{f_c} \quad \text{Gl. 6.1}$$

mit: E = Elastizitätsmodul
 x = Faktor für die Qualität der Gesteinskörnung
 f_c = Würfeldruckfestigkeit

Dabei betrug der dimensionslose Faktor x für Alluvialkies 11.000, für Betonbruch 8.300 und für Mischabbruch wurden Werte zwischen 5.500 und 6.000 angegeben. Für die in dieser Arbeit untersuchten Betone konnten folgende Zusammenhänge festgestellt werden:

Referenzbetone: $E = 10.200 * \sqrt[3]{f_c}$

RC-Betone mit Schwergutanteilen: $E = 8.400 * \sqrt[3]{f_c}$

RC-Betone mit Ausgangsgutanteilen: $E = 7.850 * \sqrt[3]{f_c}$

Damit wurde der Zusammenhang zwischen dem Faktor x und der Qualität der Gesteinskörnung auch in diesen Untersuchungen bestätigt. Gleichzeitig wurde die Verbesserung der Baustoffqualität durch das Nassaufbereitungsverfahren aufgezeigt.

Im Sachstandsbericht der EMPA 2007 werden in das Verhältnis von Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit von RC-Betonen auch die Frischbetonrohddichte und – wie auch von Roos vorgeschlagen – der Ziegelsplittanteil einbezogen [228, 49]. Der Zusammenhang wird mit folgender Formel angegeben:

$$E_{cm} = 9.100 * \sqrt[3]{f_{cm}} * \left(\frac{\rho}{2400} \right)^2 * \left(1 - \frac{Az}{500} \right) \quad \text{Gl. 6.2}$$

mit: E_{cm} = mittlerer Elastizitätsmodul [N/mm²]
 f_{cm} = Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit des Betons [N/mm²]
 ρ = Frischbetonrohddichte [kg/m³]
 Az = Ziegelsplittanteil [Vol.-%]

Die in dieser Arbeit untersuchten Brechsande wiesen nur einen geringen Ziegelanteil von < 1% auf: Daher konnte dieser Bemessungsweg nicht direkt auf die untersuchten RC-Betone übertragen werden. Der Ziegelsplittanteil ist jedoch, ebenso wie der Zementsteingehalt, über die Porosität als wichtiger Einflussfaktor auf die Größe des dynamischen E-Moduls bekannt.

Aufbauend auf den in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnissen wurde versucht, in Analogie zur Gleichung 6.2 eine Abhängigkeit zwischen Elastizitätsmodul und Druckfestigkeit unter Berücksichtigung der Frischbetonrohddichte und des Altzementsteingehalts der Gesteinskörnung herzustellen. Hierbei wurde eine Umrechnung der in dieser Arbeit an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm gemessenen Druckfestigkeiten auf die Druckfestigkeiten der Standardprobekörper (Zylinder 150 mm Durchmesser und einer Höhe von 200 mm) nach Roos vorgenommen. Es wurde der in der Arbeit von Roos angegebene Korrekturfaktor für Beton \geq B 25 verwendet:

$$f_c = 0,81 * f_{cw150} \quad \text{Gl. 6.3}$$

Auf der Basis dieses Ansatzes konnte der in Gleichung 6.4 dargestellte Zusammenhang für die Berechnung des Elastizitätsmoduls unter Berücksichtigung des Zementsteingehaltes festgestellt werden:

$$E_{cm} = 9.950 * \sqrt[3]{f_{cm}} * \left(\frac{\rho}{2400} \right)^2 * \left(1 - \frac{ZS}{30} \right) \quad \text{Gl. 6.4}$$

mit: E_{cm} = dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm²]

f_{cm} = Mittelwert der berechneten Zylinderdruckfestigkeit des Betons [N/mm²]

ρ = Frischbetonrohichte [kg/m³]

ZS = Zementsteingehalt berechnet als säurelösliche Bestandteile [M.-%]

Der Vergleich zwischen den in dieser Arbeit gemessenen E-Moduli mit den nach Gleichung 6.4 berechneten Werten bestätigt die in dieser Gleichung dargestellten Zusammenhänge. Der Korrelationskoeffizient zeigt mit $r = 0,95$ eine sehr gute Übereinstimmung von gemessenen und berechneten E-Moduli. Das Verhältnis berechneter dynamischer E-Modul zu gemessenem dynamischen E-Modul betrug im Mittel 0,91 mit einer Standardabweichung von 0,05 und einem Variationskoeffizienten von 5,3 %. In Abbildung 6.8 sind gemessene und berechnete E-Moduli der untersuchten RC-Betone aufgetragen.

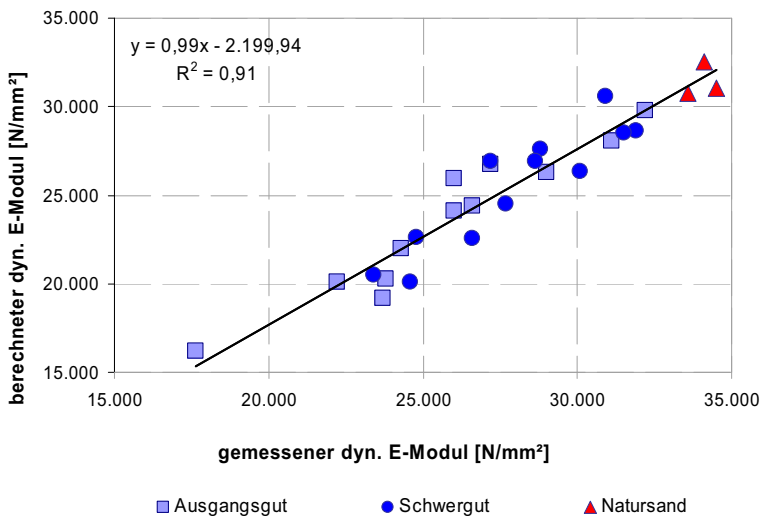


Abbildung 6.8: Messwerte der dynamischen E-Moduli im Vergleich zu den nach Gleichung 6.4 berechneten Werten

Trotz der Verbesserungen der Materialeigenschaften des nass aufbereiteten Schwergutes konnte die Qualität von natürlicher Gesteinskörnung nicht erreicht werden. Ursachen hierfür sind verbliebene Zementsteinanhaftungen, in einigen Fällen Vorschädigungen am Korn durch den Brechvorgang und möglicherweise auch die Anreicherung leichter brech- und spaltbaren Mineralien in der Sandfraktion durch das Brechen des Altbetons. Nass aufbereiteter Betonbrechsand ist daher kein gleichwertiges Substitut

für den Primärrohstoff Natursand, könnte jedoch mit Einschränkungen als Gesteinskörnung in der Beton- oder Mörtelproduktion verwertet werden.

Das im Rahmen dieser Arbeit aufbereitete Schwergut der Körnung 0/4 mm könnte bis zu einem Anteil von 20 % an der gesamten Gesteinskörnung ohne Qualitätseinbußen in der Betonherstellung eingesetzt werden. Diese Aussage korreliert mit den ebenfalls experimentell abgeleiteten Angaben von Evangelista und de Brito, die sogar eine RC-Betonbrechsandzugabe von bis zu 30 % vorschlagen [229].

Nach den hier vorgelegten Ergebnissen zum Einfluss des Zementsteingehaltes der rezyklierten Gesteinskörnungen auf die Eigenschaften der daraus erzeugten Betone, ist der Ansatz, die Qualität von RC-Betonen durch den Anteil an Rezyklat zu definieren, jedoch nicht eindeutig. Eindeutig wäre die Angabe und Begrenzung des eingetragenen Altzementsteingehaltes pro Kubikmeter Beton. Auf diese Weise wären in Bezug auf gut aufgeschlossene, zementsteinarme Körnungen höhere Zugabemengen möglich als bei zementsteinreichen Körnungen. Die tatsächlich mögliche Zugabemenge kann zudem nur in Abhängigkeit von den jeweiligen Anforderungen an den herzustellenden Beton festgelegt werden.

6.3 Ökologische und ökonomische Umsetzbarkeit des untersuchten Aufbereitungsverfahrens

Sowohl die ökologische als auch die ökonomische Bewertung des untersuchten Verfahrens zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand für den Wiedereinsatz als Gesteinskörnung in der Baustoffproduktion sind stark vom Energieverbrauch für die Produktion der Gesteinskörnung abhängig. Dieser wird wiederum neben dem Energieaufwand für den eigentlichen Aufbereitungsprozess auch von dem Aufwand für Materialtransporte beeinflusst.

Die Umsetzung des Verfahrens vom Pilotbetrieb in einen industriellen Maßstab wäre auf Basis der in dieser Arbeit ermittelten Werte möglich. In Abhängigkeit von verschiedenen Parametern kann die Verwendung von nassaufbereitetem Betonbrechsand gegenüber dem Einsatz von Natursteinkörnung nicht nur ökologisch vorteilhafter, sondern auch wirtschaftlich sinnvoll sein.

Grundvoraussetzung für die großtechnische Nassaufbereitung von Betonbrechsanden für die Produktion von Beton und Mörtel ist jedoch die Absatzmöglichkeit des Produktes „rezyklierte Betonbrechsande für die Baustoffherstellung“. Mit Inkrafttreten der Überarbeitung der Richtlinie des DAfStb für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen [12, 19] ist der Einsatz von Brechsanden als Gesteinskörnung nicht mehr zulässig. Für den Einsatz von nass aufbereitetem Betonbrechsand in der Betonherstellung müsste eine Einzelfallzulassung beim Deutschen Institut für Bautechnik erfolgen. Dies wäre neben dem zeitlichen Aufwand auch mit zusätzlichen Kosten verbunden.

Davon unabhängig wäre die Umsetzung dieses Verfahrens in Deutschland zum jetzigen Zeitpunkt nicht sinnvoll, da selbst grobe rezyklierte Gesteinskörnungen in immer geringerem Umfang in der Betonherstellung eingesetzt werden [3, 41]. Ursache hierfür ist – neben dem niedrigen Preisniveau für natürliche Gesteinskörnungen – die mangelhafte Akzeptanz der rezyklierten Gesteinskörnungen. Hinzu kommt ein höheres Haftungsrisiko für den Hersteller, bei nur geringen Kosteneinsparmöglichkeiten.

Ein Trend zur Verteuerung der Baurohstoffe aufgrund zunehmender Restriktionen, die eine wirtschaftliche Rohstoffgewinnung erschweren ist jedoch absehbar [230]. Zudem wird der Import von Rohstoffen aufgrund steigender Energie- bzw. Transportkosten dauerhaft teurer. Gleichzeitig gewinnt die Reduzierung des Treibhauspotentials zunehmend an Bedeutung. Hier ist eine Entwicklung in Richtung des Einsatzes energetisch günstiger gewonnener rezyklierter Gesteinskörnungen möglich.

Sinnvoll wäre die Anwendung der Nassaufbereitung von Betonbrechsanden auch nur dort, wo Emissionen und Kosten durch die Vermeidung oder Verringerung von Transporten von natürlichen Rohstoffen reduziert werden können. Dies ist beispielsweise in Ballungsgebieten der Fall, wo zum einen durch rege Bautätigkeit der Anfall von geeignetem Abbruchmaterial gegeben ist und andererseits die Transportwege für Natursand aus der Förderung in weniger urbanen Gebieten vergleichsweise lang sind.

Weiterhin muss berücksichtigt werden, dass die Baustoffeigenschaften des aufbereiteten Betonbrechsandes in der Regel nicht die Qualität von Natursand erreichen. Daher wird die Substitution von natürlichen Sanden durch aufbereitete Betonbrechsande im Regelfall nicht vollständig erfolgen können. Das wiederum bedeutet zusätzlichen Aufwand (Lagerhaltung, Dosiereinrichtung etc.) durch den Einsatz von zwei unterschiedlichen Materialien für die Sandfraktion von Gesteinskörnungen.

Im Sinne einer nachhaltigen Materialwirtschaft ist es nicht sinnvoll, dass Betonbrechsand nass aufbereitet und als Gesteinskörnung verwertet wird, wenn in räumlicher Nähe gleichzeitig qualitativ hochwertigerer Natursand für minderwertigere Zwecke wie Hinterfüllungen oder als Straßenunterbau eingesetzt wird. In diesen Fällen ist das Downcycling des nur trocken aufbereiteten Betonbrechsandes folgerichtiger als ein aufwändigeres Recycling zur Gesteinskörnung. Zielgerecht wäre die industrielle Anwendung des untersuchten Recyclingverfahrens beispielsweise in Regionen, in denen natürliche Sandvorkommen selten sind bzw. in denen Sande z.B. als Brechsande für die Betonherstellung mit höherem Aufwand gewonnen werden müssen. Denkbar wäre dies in Gebirgsregionen wie der Schweiz, in der die Erschöpfung natürlicher Kies- und Sandreserven bereits heute absehbar ist [43-45] und auch die rechtlichen Rahmenbedingungen günstiger sind. Letztendlich ist die Verwendung von Recyclingbeton auch eine Frage des Preises [61].

7. Zusammenfassung und Ausblick

In den vergangenen Jahren hat die Wiederverwertung von Abfall- und Reststoffen infolge der steigenden Anforderungen an einen nachhaltigen Umgang mit Naturraum und Ressourcen stetig an Bedeutung gewonnen. Aufgrund großer Massenströme und guter Wiederverwertungsmöglichkeiten haben sich die Recyclingquoten von Bauschutt und Altbeton in den letzten Jahren deutlich erhöht. Dabei wird zunehmend darauf geachtet, die entstehenden Stoffströme auf einem möglichst hohen Niveau zu verwerten.

Altbeton wird überwiegend durch Zerkleinerung und Klassierung zu rezyklierten Gesteinskörnungen aufbereitet. Dabei entstehen Betonbrechsande als feine rezyklierte Gesteinskörnungen in Größenordnungen zwischen 20 und 50 % des Aufgabematerials. Während die Wiederverwertung von Altbetonsplitten als grobe rezyklierte Gesteinskörnungen in einer Vielzahl von Studien untersucht wurde und in der Betonproduktion – in geringem Maßstab – bereits in der Praxis umgesetzt wird, eignen sich die bei der trockenen Aufbereitung anfallenden Betonbrechsande in der Regel nicht für die Wiederverwertung als Gesteinskörnung in Beton. Dies liegt an den im Vergleich zu größeren Körnungen ungünstigeren Materialeigenschaften von Brechsanden wie z.B. die höhere Porosität und die geringeren Dichten oder ggf. die Anreicherung von Stör- und Schadstoffen in dieser Fraktion.

Beim Einsatz nassmechanischer Verfahren bei der Aufbereitung von Splittfraktionen wurden bereits gute Qualitätsverbesserungen erreicht. Ziel der vorliegenden Arbeit war daher die Untersuchung eines Nassaufbereitungsverfahrens zur Verbesserung der Baustoffeigenschaften von Betonbrechsand als Voraussetzung für eine höhere Verwertung als Gesteinskörnung in der Betonherstellung. Das untersuchte Nassaufbereitungsverfahren beinhaltet folgende Verfahrensschritte:

- Aufschluss der Körnungen durch eine Abrasionsbehandlung in einem Intensivmischer,
- Klassierung zur Abtrennung der Fraktion < 100 µm mittels Hydrozyklon und
- Dichtesortierung mittels Setzmaschinenteknik.

Im ersten Verfahrensschritt, dem Aufschluss des Materials in einem Mischaggregat, wurde unter Zugabe von Wasser mechanischer Energieeintrag genutzt, um einen Abrieb anhaftender Zementmatrix von den Brechsandpartikeln zu bewirken. Im nachfolgenden Klassierungsschritt wurden sowohl abgeriebener Zementstein als auch die in Feinfraktionen oftmals angereicherten abschlämmbaren Bestandteile entfernt. Der wesentliche Aufbereitungsschritt des untersuchten Verfahrens ist die Dichtesortierung in einer Setzmaschine.

Die Sortierung mittels Setzmaschinenteknik beruht auf Dichteunterschieden, im vorliegenden Fall auf den Dichteunterschieden zwischen natursteinreichen und zementsteinreichen Brechsandpartikeln im Korngrößenspektrum von 100 µm bis 4 mm. In experimentellen Untersuchungen sollte die Frage beantwortet werden, ob diese Dichteunterschiede für eine Trennung in ein natursteinreiches Schwergut und ein zementsteinreiches Leichtgut ausreichen. Die Evaluierung der Materialeigenschaften erfolgte mit chemisch-physikalischen und mikroskopischen Untersuchungsmethoden sowohl an den Gesteinskörnungen als auch an Mörteln und Betonen, die aus dem jeweiligen Ausgangsmaterial sowie dem Schwergut und dem Leichtgut aus der Nassaufbereitung hergestellt wurden.

Um die Übertragbarkeit der Versuchsergebnisse auf die Praxis zu ermöglichen, wurden die experimentellen Arbeiten in einer für diese Versuche modifizierten Nassaufbereitungsanlage im halbtechnischen Maßstab (Durchsatz 400 bis 800 kg Trockensubstanz/h) durchgeführt. Als Produkt des Verfahrens wurde ein möglichst natursteinähnliches Schwergut angestrebt. Als Reststoffe fielen das Feinstgut < 100 µm nach dem Klassierungsschritt und das Leichtgut nach der Dichtentrennung an. Der Bezug zur Praxis wurde auch dadurch sichergestellt, dass die Untersuchungen ausschließlich an Altbetonkörnungen aus realen Abbrüchen erfolgten. Der Altbeton wurde zuvor in konventionellen Anlagen zerkleinert und klassiert.

Die verfahrenstechnischen Parameter der Aufbereitungsanlage wurden während der Versuche erfasst und dienten als Grundlage für die Übertragung des Verfahrens auf eine Modellaufbereitungsanlage im großtechnischen Maßstab. Anhand dieser Modellanlage wurde das Verfahren in Hinblick auf eine großtechnische Umsetzung ökonomisch und ökologisch evaluiert.

Die Auswertung der verschiedenen Versuchsreihen hat gezeigt, dass es mit dem untersuchten Verfahren möglich ist, als Produkt ein Schwergut mit – im Vergleich zum jeweiligen Ausgangsmaterial – verbesserten Baustoffeigenschaften herzustellen. Der Hauptverfahrensschritt, die Dichtentrennung, hat trotz der geringen Dichteunterschiede in den Ausgangsmaterialien und trotz der gleichzeitig auftretenden Klassierungseffekte im Setzprozess zu den erwarteten Differenzierungen in den Eigenschaften von Schwer- und Leichtgut geführt.

Der Einfluss der unterschiedlichen Anlageneinstellungen auf den Trenneffekt und die Materialeigenschaften der Austragsgüter war gering. Die eingesetzte Anlagentechnik verhielt sich robust gegenüber Schwankungen in den Aufgabemassenströmen, war aber auch wenig sensibel in Bezug auf die Einstellung bestimmter Steuerungsparameter.

Die Materialuntersuchungen an den Gesteinskörnungen zeigten, dass der Aufbereitungsprozess zu der beabsichtigten Anreicherung von Naturstein im Schwergut geführt hat. Im Mittel nahm der Zementsteingehalt von 20 % im Ausgangsmaterial auf 15 % im Schwergut ab. Gleichzeitig konnte die Anreicherung von Zementstein im Leicht- und Feinstgut festgestellt werden. Die maßgeblichen Materialeigenschaften wie Porosität, Wasseraufnahme und Zementsteingehalt der Schwergutkörnungen haben sich signifikant verbessert. Durch elektronenmikroskopische Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass neben der Anreicherung von Zementstein auch eine Tendenz zur Akkumulation von leichter spalt- bzw. brechbaren Mineralen in den feinkörnigeren Auszugsprodukten Leichtgut und Feinstgut besteht.

Aus Schwergut und Ausgangsmaterial wurden Betone mit abgestuften Anteilen an Betonbrechsand bis hin zum vollständigen Ersatz von Natursand, was einem Anteil von 50 % Betonbrechsand an der gesamten Gesteinskörnung entspricht, hergestellt. An den Ergebnissen der Baustoffprüfungen der RC-Betone waren die positiven Auswirkungen des Nassaufbereitungsverfahrens klar nachweisbar. Am deutlichsten ist die positive Auswirkung der Nassaufbereitung an den Messungen der dynamischen Elastizitätsmoduli und an den Schwindmessungen zu erkennen. Die Qualität von Natursanden konnte allerdings nicht erreicht werden.

Für sämtliche durchgeführten Betonuntersuchungen (Druckfestigkeit, Elastizitätsmoduli, Schwinden) konnten eindeutige Korrelationen zum Altzementsteingehalt festgestellt werden. Mit diesen Korrelationen wurden das Ausgangsmaterial und das Schwergut gleichermaßen erfasst. Somit wurde in der vorgelegten Arbeit erstmals der Altzementsteingehalt als eindeutiger und die tatsächlichen Wirkungsmechanismen berücksichtigender Güteparameter für rezyklierte Gesteinskörnungen identifiziert. Auf dieser Basis wurde ein neuer Bemessungsansatz für Beton unter Einbeziehung des Altzementsteingehaltes formuliert.

Die ökobilanzielle Betrachtung der Umsetzung des Verfahrens in einer Modellanlage im Vergleich zu Natursand kann – in Abhängigkeit von den angesetzten Rahmenparametern – zu einer positiven Bewertung der nass aufbereiteten Betonbrechsande führen. Eingesetzt in Beton sind die ökologischen Auswirkungen aufgrund der weiteren, insbesondere der energieintensiven Bestandteile des Betons zwar von geringer Bedeutung, in Hinblick auf den Massenstrom des jährlich produzierten Betons ist dieser Vorteil von RC-Beton jedoch nicht zu vernachlässigen.

Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtung zeigte, dass die Aufbereitung von Betonbrechsand zu einem Grundstoff für die Beton- und Mörtelherstellung mit dem untersuchten Verfahren – ebenfalls in Abhängigkeit von den Rahmenbedingungen – wirtschaftlich durchgeführt werden kann. Der Aufbau einer großtechnischen Aufbereitungsanlage wäre beispielsweise in Ballungsgebieten denkbar, wo durch umfangreiche Baumaß-

nahmen mit entsprechend großen Abbruchmengen und kurzen Transportwegen zu rechnen ist. Vorstellbar ist auch der gemeinsame Betrieb einer Nassaufbereitungsanlage für Natur- und RC-Sand durch einen Baustoffhersteller, da auch Natursand vor der Verwertung vielfach einer Nassaufbereitung unterzogen werden muss [231]. Auf diese Weise könnten die Betriebszeiten der Anlage optimal genutzt werden.

Bis zum Jahr 2010 wird die jährliche Abfallmenge an Baureststoffen in Deutschland voraussichtlich auf ca. 100 bis 130 Mio. t ansteigen. Diese Prognose verdeutlicht die Wichtigkeit der Substitutions- und Recyclingmöglichkeiten von Baustoffen. Bei der Betrachtung der tatsächlichen Verfügbarkeit geologischer Sand- und Kiesvorräte in Deutschland ist zu bemerken, dass diese durch Nutzungen wie Siedlungsräume, Straßen, Eisenbahnen sowie durch Wasser- und Naturschutzgebiete langfristig eingeschränkt sein könnten [232].

In sandarmen Regionen, beispielsweise im alpinen Raum, ist die Erschöpfung der natürlichen Sandressourcen schon heute absehbar [43]. Auch dort kann der Aufbau und wirtschaftliche Betrieb einer industriellen Anlage zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand in Abhängigkeit von den örtlichen Gegebenheiten sinnvoll und möglich sein.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass das untersuchte Nassaufbereitungsverfahren für Betonbrechsand zu einer Verbesserung der Baustoffeigenschaften des als Produktkörnung hergestellten Schwergutes führen kann und dass die Umsetzung in einen großtechnisch Aufbereitungsprozess unter bestimmten Rahmenbedingungen ökologisch und ökonomisch sinnvoll sein kann.

8. Literatur und Quellen

- [1] KrW-/AbfG (1994). *Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz (KrW-/AbfG), Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Beseitigung von Abfällen*. In BGBl. I.
- [2] Statistisches Bundesamt (2007). *Bruttoinlandsprodukt 2006 für Deutschland*. Internet Report; auf <http://www.destatis.de>.
- [3] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTTB) (2005). *4. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2002)*. Berlin, Düsseldorf, Duisburg: KWTTB. 83 Seiten.
- [4] Maultzsch, M., G. Mellmann, und U. Meinhold (2003). *Eigenschaften hochwertiger Betone aus aufbereitetem Bauschutt*. In Tagungsband "Ibausil 2003". Weimar. Hrsg. F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, S. 33-47.
- [5] Ravindrarajah, S.R. (1987). *Utilization of waste concrete for new construction*. Conservation and Recycling, 10. Auflage (2/3): S. 69-74.
- [6] Müller, A. (2003). *Baustoffkreisläufe - Stand und Entwicklung*. In Tagungsband "Ibausil 2003". Weimar. Hrsg. F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, S. 1289-1308.
- [7] Breitenbücher, R. (2000). *Recyclingbaustoffe aus der Sicht der Bauausführung*. in Ressourcen und Recycling mineralischer Rohstoffe für die Bauindustrie, Hrsg. H. Budelmann und J. Wolff. Zentrum für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig. S. 127-136.
- [8] Reichel, W. und P. Heldt (2003). *Einflüsse der Aufbereitung von Bauschutt für eine Verwendung als Betonzuschlag*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb. Berlin. S. 93-131.
- [9] Grübl, P. und M. Rühl (1998). *Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045*. Darmstadt: Institut für Massivbau - TU Darmstadt. Zwischenbericht (BiM E/03). 8 Seiten.
- [10] Meißner, M. (1997). *Konsequenzen aus den Materialeigenschaften von Recycling-Betonen für die Bemessung zum Zwecke deren vergleichbarer Einstufung*. Bochum: Ruhruniversität - Lehrstuhl und Institut für Stahlbeton- und Spannbetonbau. Zwischenbericht (BiM F/04). 16 Seiten.
- [11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (1998). *DAfStb-Richtlinie "Beton mit rezykliertem Zuschlag" Teil 1 und Teil 2*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Bonn.
- [12] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2004). *DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100"*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Berlin.
- [13] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2002). *DIN 4226-100, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen*. Beuth-Verlag: Berlin.
- [14] Görg, H. (2001). *Bauen für den Umweltschutz: Es gibt viel zu tun - nur wissen wir nicht wann!* Teil 2. Altlasten Spektrum, 10. Auflage (3): S. 152-153.
- [15] Dosch, F. (2001). *Flächenverbrauch in Deutschland und Mitteleuropa*. Terratech, 10. Auflage (6): S. 19-23.
- [16] Fischer, J.-U. (2005). *Masterplan Flächenverbrauch*. Altlasten Spektrum, 14. Auflage (4): S. 177-178.
- [17] Schießl, P., C. Müller, und B. Dora (1998). *Verwendungsmöglichkeiten von Materialien, die bei der Aufbereitung von Altbeton/Bauschutt anfallen und nicht wiederverwertbar sind, Teil 1 und Teil 2*. In Tagungsband " Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau". TU Darmstadt, Institut für Massivbau. S. 21 Seiten.
- [18] Behler, K. und A. Meyer (2002). *Untersuchungen zum Einsatz von Betonbrechsanden in sandreichen Betonen*. Bremen: Materialprüfungsanstalt Bremen. AiF-Forschungsbericht Nr. 12349. 68 Seiten.
- [19] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2003). *DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100" Teil 1*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Berlin.

- [20] Diedrich, R. (1997). *Einfluss der Brechwerkzeuge auf die Eigenschaften von Recycling-Granulaten im Hinblick auf eine Eignung als Zuschlag für Beton nach DIN 1045*. Bremen: Gesellschaft zur Aufbereitung von Baustoffen mbH. Zwischenbericht. 16 Seiten.
- [21] Möbius, A. (1999). *Neue Perspektiven zur Verwertung von Recycling-Betonsand - Produktideen und erste Ergebnisse*. In Tagungsband "Recycling 1999". Weimar. Hrsg. Bauhaus-Universität Weimar, S. 12.
- [22] Katz, A. (2003). *Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete*. Cement and Concrete Research, 33. Auflage: S. 703-711.
- [23] Hansen, T.C. und H. Narud (1983). *Strength of Recycled Concrete Made from Crushed Concrete Coarse Aggregate*. Concrete International, 5. Auflage (1): S. 79-83.
- [24] Breitenbücher, R. (1997). *Einfluss des Gehaltes an Recyclingsplitt auf die Festbetoneigenschaften*. Neu-Isenburg: Philipp Holzmann AG für BiM. Zwischenbericht. 4 Seiten.
- [25] Wu, K.-R., et al. (2001). *Effect of coarse aggregate type on mechanical properties of high-performance concrete*. Cement & Concrete Research, 31. Auflage: S. 1421-1425.
- [26] Limbachiya, M.C., E. Marrochino, und A. Koulouris (2007). *Chemical-mineralogical characterisation of coarse recycled concrete aggregate*. Waste Management, 27. Auflage (2): S. 201-208.
- [27] Mesters, K. und H. Kurkowski (1997). *Dichtesortierung von Recycling-Baustoffen mit Hilfe der Setzmaschinentchnik*. Aufbereitungs-Technik, 38. Auflage (10): S. 536-542.
- [28] Schachermayer, E., T. Lahner, und P. Brunner (1998). *Stoffflussanalyse und Vergleich zweier Aufbereitungstechniken für Baurestmassen*. Monographien. Wien: Bundesministerium für Umwelt, Jugend und Familie, Österreich.
- [29] Petit, E. (1997). *Entwicklung eines neuen Verfahrens zur Nassaufbereitung von Bauschutt*. Aachen: Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH), Institut für Bergwerks- und Hüttenmaschinenkunde. Dissertation.
- [30] Wilburn, D.R. und T.G. Goonan (1998). *Aggregates from Natural and Recycled Sources*. Denver: U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Circular. 37 Seiten.
- [31] Vazquez, E., et al. (2004). *Draft of spanish regulations for the use of recycled aggregate in the production of structural concrete*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona. Hrsg. RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France, S. 511-515.
- [32] Tam, V.W.Y. und C.M. Tam (2007). *Economic comparison of recycling over-ordered fresh concrete: A case study approach*. Resources, Conservation and Recycling, 52. Auflage (5): S. 208-218.
- [33] Angulo, S.C., L.F.R. Miranda, und V.M. John (2002). *Construction and Demolition Waste, its Variability and Recycling in Brazil*. (Internet). auf <http://www.reciclagem.pcc.usp.br/>.
- [34] Symonds Group Ltd (1999). *Construction and demolition waste management practices and their economic impacts*. London. European Commission. 104 Seiten.
- [35] Oikonomou, N.D. (2005). *Recycled concrete aggregates*. Cement & Concrete Composites, 27. Auflage (2): S. 315-318.
- [36] Car, M. (2001). *11. Baustoff-Recycling Forum zeigt den Weg nach Europa*. Internet Report; auf <http://www.br.v.at/rcinterforum.htm>.
- [37] Broere, P. (2003). *The Recycling of Construction & Demolition Waste*. (Internet); auf <http://www.iscowa.org/members/recon03.pdf>.
- [38] European Commission (2000). *Management of construction and demolition waste*. Working Document No. 1. 26 Seiten
- [39] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTTB) (2000). *1. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 1996)*. Berlin, Düsseldorf, Duisburg: KWTTB. 38 Seiten.
- [40] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTTB) (2001). *2. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 1998)*. Berlin, Düsseldorf, Duisburg: KWTTB. 82 Seiten.

- [41] Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau (KWTTB) (2003). *3. Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2000)*. Berlin, Düsseldorf, Duisburg: KWTTB. 83 Seiten.
- [42] Maultzsch, M. (2000). *Baustoffrecycling in Europa: Erfahrungen aus Forschung und Entwicklung*. in Ressourcen und Recycling mineralischer Rohstoffe für die Bauindustrie, Hrsg. H. Budelmann und J. Wolff. Zentrum für Abfallforschung der Technischen Universität Braunschweig. Braunschweig. S. 137-150.
- [43] EMPA (2003). *Recyclingzuschläge aus mineralischen Bauabfällen*. (Internet) (2003); auf <http://www.empa.ch/>.
- [44] Rosatzin-Strobel, C. (2003). *Recycling-Beton - ein Baustoff der Zukunft*. Tagesanzeiger. Zürich. 31.10.2003.
- [45] Jacobs, F. (1999). *Nachhaltiges Bauen mit Beton*. TFB cementbulletin, Schweiz. 68. Auflage (7/8).
- [46] Eberhard Recycling (2006). *Homepage*. (Internet); auf <http://www.eberhard.ch>.
- [47] Deisl, M. (1996). *Recycling von Baureststoffen - Herstellung hochwertige Baurestmassen - Recyclingverfahren Verarbeitungs- und Behandlungstechnik - Anwendung neuer Technologien*. Wien: Technische Universität Wien, Institut für Baubetrieb und Bauwirtschaft. Dissertation.
- [48] Deisl, M. (1999). *Herstellung hochwertiger Baustoffe aus Baurestmassen - Aufbereitungs- und Behandlungstechnik*. In Tagungsband "7. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft". Hrsg. Bauhaus-Universität Weimar, S. 6.
- [49] Roos, F. (2002). *Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1*. München: Technische Universität München, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen. Dissertation.
- [50] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2000). *DIN EN 206-1: Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Beuth Verlag: Berlin.
- [51] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2003). *DIN EN 12 620 Gesteinskörnungen für Beton*. Beuth Verlag: Berlin.
- [52] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2004). *DIN EN 12 620 Berichtigung 1*. In Berichtigungen zu DIN EN 12620:2003-04. Beuth Verlag: Berlin.
- [53] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2004). *DIN V 20000 -103 Anwendungen von Bauprodukten in Bauwerken - Teil 103: Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2003-04 (nationale Anwendungsnorm)*. Beuth Verlag: Berlin.
- [54] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2006). *DIN EN 12 620 A1 Gesteinskörnungen für Beton*. Beuth Verlag: Berlin.
- [55] Grübl, P. und M. Rühl (2004). *Erläuterungen zur DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100"*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Berlin.
- [56] LAGA (Bund/Länderarbeitsgemeinschaft Abfall) (2003). *"Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen - Technische Regeln" Mitteilung 20*. LAGA: Mainz.
- [57] Weil, M. (2004). *Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie. Dissertation.
- [58] Bundesministerium für Umwelt Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU) (2007). *Ersatzbaustoff-Verordnung, erster Arbeitsentwurf*. In Bundesverwertungsverordnung: Berlin.
- [59] Hoffmann, C. (2005). *Potentiale von mineralischen Sekundärressourcen*. In Tagungsband " Städtische Hochbauten in ökologisch sinnvoller Ausführung mit Recycling-Beton B". Zürich. Hrsg. Hochbaudepartement der Stadt Zürich.
- [60] Bundesamt für Umwelt (CH) (2006). *Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle*. Abteilung Abfall und Rohstoffe. BAFU. Bern, Schweiz.
- [61] Hoffmann, C. (2005). *Recyclingbeton zwischen Ökologie und Qualität*. Tec21, 131. Auflage (3-4): S. 24-27.
- [62] Hoffmann, C. (2007), EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt). Persönliche Mitteilung.

- [63] Topçu, I.B. (1995). *Using waste concrete as aggregate*. Cement & Concrete Research, 25. Auflage (7): S. 1385-1390.
- [64] Müller, A. und S. Lander (2000). *Aufbereitung und Verwertung von Bauabfällen*. Entsorgungspraxis, 52. Auflage: S. 13-17.
- [65] Bretschneider, A. und M. Rühl (1998). *The influence of recycled aggregate on the compressive strength and the elastic modulus of concrete*. In Tagungsband "Darmstadt Concrete 1998". Darmstadt. Hrsg. Institut für Massivbau - TU Darmstadt, S. 131-141.
- [66] Chen, H.-J., T. Yen, und K.-H. Chen (2003). *Use of building rubbles as recycled aggregates*. Cement and Concrete Research, 33. Auflage: S. 125-132.
- [67] Grübl, P. und M. Rühl (1998). *Der Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festboneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045*. Darmstadt: Technische Universität Darmstadt - Institut für Massivbau. Zwischenbericht (BiM E/03). 7 Seiten.
- [68] BRITE/EURAM (2000). *Construction recycling technologies for high quality cement and concrete - Task 5 Cement Production*. Berlin, Barcelona. 52 Seiten.
- [69] Hoppe, B., M. Mehlmann, und S. Kazemi (1994). *Verwertbarkeit und Umweltverträglichkeit kalkhaltiger Recyclingmaterialien*. Köln: Forschungsgemeinschaft Kalk und Mörtel e.V. AiF-Forschungsbericht Nr. 9071.
- [70] Müller, A. (2003). *Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen - aktueller Stand und Ausblick*. In Tagungsband "Recycling 2003 - Forschungsprojekte zum Recycling". Weimar. 21 Seiten.
- [71] Siebel, E. und B. Kerkhoff (1998). *Einfluss von Recyclingzuschlägen aus Altbeton auf die Eigenschaften insbesondere die Dauerhaftigkeit des Betons*. In Tagungsband "Statusseminar BMBF-Vorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau"". Darmstadt. Hrsg. BiM Baustoffkreislauf im Massivbau, 6 Seiten.
- [72] Hansen, T.C. (1986). *Recycled aggregates and recycled aggregate concrete second state-of-the-art report developments 1945-1985*. Materials and Structures / Materiaux et Constructions, 18. Auflage: S. 201-246.
- [73] Wesche, K. (1993). *Baustoffe für tragende Bauteile, Band 2: Beton, Mauerwerk*. 3. Auflage. Wiesbaden: Bauverlag GmbH.
- [74] Lorenz, W. und W. Gwosdz (2003). *Handbuch zur geologisch-technischen Bewertung von mineralischen Baurohstoffen*. Geologisches Jahrbuch, Sonderhefte Reihe H, Heft SH 16. Hannover: BGR.
- [75] Sagmeister, B. (1999). *Rezeptoptimierung von haufwerksporigem Leichtbeton*. Betonwerk und Fertigteil-Technik, 65. Auflage (11): S. 70-78.
- [76] Hollatz, B., H.-J. Linke, und U. Zimmer (1995). *Technologie Hochbau*. Fachstufen. Hrsg. A. Lindner-Focke. Vol. 1. Berlin: Cornelsen Verlag Berlin.
- [77] BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2003). *Bundesrepublik Deutschland Rohstoffsituation 2002*. Rohstoffwirtschaftliche Länderstudien. Hannover: BGR Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe.
- [78] Ravindrarajah, R.S. und C.M. Tam (1987). *Recycling concrete as fine aggregate in concrete*. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 9. Auflage (4): S. 235-241.
- [79] Evangelista, L.R. und J.C. de Brito (2004). *Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona. Hrsg. RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France, S. 503-510.
- [80] Nagataki, S., et al. (2004). *Assessment of recycling process induced damage sensitivity of recycled concrete aggregates*. Cement & Concrete Research, 34. Auflage (6): S. 965-971.
- [81] Jeschke, H. und W. Poppy (2004). *Prallzerkleinerung von Beton*. Aufbereitungs-Technik, 45. Auflage (5): S. 25-32.

- [82] Hoffmann, C. und A. Leemann (2004). *Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch*. Dübendorf: EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt). Forschungsbericht. 37 Seiten.
- [83] Poon, C.S., et al. (2004). *Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of hardened concrete*. Cement & Concrete Research, 34. Auflage (1): S. 31-36.
- [84] Breitenbücher, R. (2004). *Sand: In Zukunft besser aufbereiten! - Die Bedeutung des Sandes für Betone von Morgen*. Vortrag, Forum Kies und Sand. Aachen, 17.03.2004.
- [85] Naelen, A. und M. Rühl (1997). *Consistency aspects in the production of concrete using aggregates from recycled demolition material*. Darmstadt Concrete, 12. Auflage.
- [86] Hahn, U. (2003). *Die Naturstein-Industrie im Zeitraum 2002/2003*. Die Naturstein-Industrie, 39. Auflage (6): S. 5-11.
- [87] Bundesverband der Deutschen Kies- und Sandindustrie e.V. (2007). *Geschäftsbericht 2006*. Duisburg: bks e.V. 58 Seiten.
- [88] International Mineralogical Association (IMA) (2004). *List of minerals designated as approved, discredited and redefined by the IMA Commission on New Minerals and Mineral Names since 1959*. Amsterdam, Liège, St. Petersburg, Melbourne: IMA, 161 Seiten.
- [89] Kloess, G. (2005). *Vorlesungsskript Einführung in die Petrographie / Petrologie*. Kapitel D: Die häufigsten gesteinsbildenden Minerale. auf <http://www.uni-leipzig.de/>.
- [90] Rösler, H.J. (1980). *Lehrbuch der Mineralogie*. 2. Auflage. Hrsg. H. Schwarz. Vol. 1981. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie Leipzig.
- [91] Karimov, I. (2002). *The mechanism of cement-aggregate bond in concrete (the review of literature)*. (Internetreport).
- [92] Penttala, V. und J. Komonen (1997). *Effects of aggregates and microfillers on the flexural properties of concrete*. Magazine of Concrete Research, 49. Auflage (179): S. 81-97.
- [93] Dombrowski, K. (2003). *Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton*. Weimar: Bauhaus-Universität, Fakultät Bauingenieurwesen. Dissertation.
- [94] Müller, C. (2004). *Betonwaren mit rezyklierten Gesteinskörnungen*. Betonwerk und Fertigteil-Technik, 70. Auflage (7): S. 10-21.
- [95] Schießl, P. und C. Müller (1998). *Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag*. In Tagungsband "Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau". TU Darmstadt, Institut für Massivbau. 16 Seiten.
- [96] Takenaka Corporation (2000). *Aggregate Brought back to Life from Concrete Waste*. Internet Report; auf <http://www.takenaka.co.jp>.
- [97] Takenaka Corporation (2003). *High-quality Recycled Aggregate "Cyclite"*. Internet Report; auf <http://www.takenaka.co.jp>.
- [98] Rühl, M. (1997). *Water absorption capacity of recycled demolition rubbish*. In Tagungsband " Darmstadt Concrete 1997". Darmstadt. Hrsg. Institut für Massivbau - TU Darmstadt, S. 4.
- [99] Müller, C. und U. Wiens (1998). *Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag*. In Tagungsband " Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau". TU Darmstadt, Fachbereich Bauingenieurwesen und Geodäsie, Institut für Massivbau. 16 Seiten.
- [100] Sani, D., et al. (2005). *Leaching and mechanical behaviour of concrete manufactured with recycled aggregates*. Waste Management, 25. Auflage (2 (Special Issue)): S. 177-182.
- [101] Smith, N.R. und L. Collins (1993). *Aggregates - Sand gravel and crushed rock aggregates for construction purposes*. 2. Auflage. Geological Society Engineering Geology Special Publications. Hrsg. J.C. Cripps. London: The Geological Society.
- [102] Budelmann, H. und B. Dora (1999). *Beton im Stoffkreislauf*. Arconis, 1. Auflage.
- [103] Siebel, E. und B. Kerckhoff (1997). *Einfluß von Recyclingzuschlägen aus Altbeton auf die Eigenschaften insbesondere die Dauerhaftigkeit des Betons*. Düsseldorf: Verein

- Deutscher Zementwerke e.V. Düsseldorf, Forschungsinstitut der Zementindustrie. Zwischenbericht 01.05.96-31.12.96. 8 Seiten.
- [104] Juling, H. (2001). *Entwicklung eines Verfahrens zu Wiederverwertung von Hochbaurestmassen als Zuschlag in zementgebundenen Systemen der Betonsteinproduktion*. Bremen: MPA Bremen. Abschlussbericht. 76 Seiten.
- [105] Poon, C.S. und C.S. Lam (2004). *Optimizing the Production of Concrete Paving Blocks with Recycled Aggregates*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona.
- [106] Diedrich, R., A. Brauch, und J. Kropp (2001). *Werk trockenmörtel mit Porenbetongranulaten aus der Bauschutt aufbereitung*. Bremen: Amtliche Materialprüfungsanstalt Bremen und Institut für Baustofftechnologie der Hochschule Bremen. Schlussbericht. 181 Seiten.
- [107] Friedl, L. (2004). *Experimentelle Untersuchungen zum Transport von Wasser und Chlorid in rezykliertem Beton und zu der daraus ableitbaren Gefahr der chloridinduzierten Stahlkorrosion*. Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Dissertation.
- [108] Haase, R. und J. Dahms (1998). *Baustoffkreislauf am besonderen Beispiel von Beton im norddeutschen Raum*. Beton, 6. Auflage.
- [109] Hendriks, C.F. und W. Xing (2004). *Suitable separation treatment of stony components in construction and demolition waste*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona. Hrsg. RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France, S. 166-172.
- [110] Friedl, L. (2003). *Perspektiven für Recycling-Körnungen*. In Tagungsband " 3. Münchner Baustoffseminar". München. 18 Seiten.
- [111] Poon, C.S. und D. Chan (2007). *The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong*. Resources Conservation and Recycling, 50. Auflage (3): S. 293-305.
- [112] Schultmann, F. und O. Rentz (2001). *Konzeption und Umsetzung ökonomisch-ökologisch optimierter Strategien zur Demontage und zum Recycling von Bauwerken - Konzeption zur Anwendung*. In Handbuch der Altlastensanierung, Hrsg. E. Steiner. 2001. Franzius, V., Wolf, K., Brandt, E., Altebockum, M. Heidelberg. S. 1-39.
- [113] Kurkowski, H. und U. Penzel (1998). *Einfluss der Aufbereitungstechnologie auf Eigenschaften des rezyklierten Zuschlags*. Internetreport; auf <http://www.b-i-m.de/>.
- [114] Hendriks, C.F. und W. Xing (2004). *Quality improvement of granular wastes by separation techniques*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona. Hrsg. RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France, S. 142-149.
- [115] Bianchini, G., et al. (2005). *Recycling of construction and demolition waste materials: a chemical-mineralogical appraisal*. Waste Management, 25. Auflage (2 (Special Issue)): S. 149-159.
- [116] vdz - Verein Deutscher Zementwerke e.V. (2002). *Zementtaschenbuch*. Hrsg. vdz. Düsseldorf: vdz.
- [117] EMPA (2003). *Petrografie und Granulometrie von Betonzuschlag*. Internet Report (2003); auf <http://www.empa.ch>.
- [118] Schießl, P. und C. Müller (1997). *Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag*. In Tagungsband " Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau". TU Darmstadt, Institut für Massivbau. 6 Seiten.
- [119] Reichel, W. (1998). *Einflüsse der Aufbereitung von Bauschutt für eine Verwendung als Betonzuschlag*. Dresden: MPA. Kurzbericht zum Arbeitsstand. 9 Seiten.
- [120] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2001). *DIN EN 206-1: Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*. Beuth Verlag: Berlin.
- [121] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2001). *DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton, Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Beuth-Verlag: Berlin.

- [122] Wiegink, K.-H. und A. Spengler (2002). *Beton mit Überschusssanden - Abgrenzung der Einsatzgebiete*. München: Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung. Kurzbericht zum Forschungsbericht. 12 Seiten.
- [123] Kropp, J. (2004). *Frost Resistance of Low Grade Concretes with Recycled Aggregates*. Vortrag RILEM Conference "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona, 10.11.2004.
- [124] Breitenbücher, R. (1998). *Einfluss von Betonsplitt auf das Wasserrückhaltevermögen von Frischbeton*. Neu-Isenburg: Philipp Holzmann AG für BiM. Zwischenbericht. 7 Seiten.
- [125] Müller, C. und U. Wiens (1998). *Verwertung mineralischer Bauabfälle im Beton*. In Tagungsband " 20. Aachener Baustofftag". Aachen. 21 Seiten.
- [126] Rao, A., N.J. Kumar, und M. Sudhir (2007). *Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete*. Resources Conservation and Recycling, 50. Auflage (1): S. 71-81.
- [127] Müller, A. (2004). *Aufbereiten und Verwerten von Bauabfällen - Stand und Entwicklung*. in Ratgeber Abbruch & Recycling 2004, Hrsg. A. Müller und H. Strauß. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH. Iffezheim. S. 14-24.
- [128] Müller, C. (1998). *Requirements on concrete for future recycling*. In Tagungsband "International Symposium Sustainable Construction: Concrete with Recycled Aggregates". Dundee, Ireland. Hrsg. University of Dundee, 10 Seiten.
- [129] Tavakoli, M. und P. Soroushian (1996). *Drying and shrinkage behaviour of recycled aggregate concrete*. Concrete International, 18. Auflage (11): S. 58-61.
- [130] Roos, F. und K. Zilch (1998). *Verification of the Dimensioning Values for Concrete with Recycled Concrete Aggregate*. In Tagungsband "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate". London. Hrsg. University of Dundee, Concrete Technology Unit, London, UK, 9 Seiten.
- [131] Schubert, H. (1996). *Aufbereitung fester Stoffe, Band II: Sortierprozesse*. 4. Auflage. Stuttgart: Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [132] Schießl, P. und C. Müller (1998). *Mehrfachrecycling*. In Tagungsband "Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau". Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau. 5 Seiten.
- [133] Linß, E. und A. Müller (2004). *High-performance of sonic impulses - an alternative method for processing of concrete*. International Journal of Mineral Processing, 74. Auflage, Supplement 1: S. 199-208.
- [134] Stark, U. und A. Müller (2004). *Korngröße und Kornform von Recyclingbaustoffen - schnelle und effektive Methode zur Beurteilung*. in Ratgeber Abbruch & Recycling 2004, Hrsg. A. Müller und H. Strauß. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH. Iffezheim. S. 78-84.
- [135] Schubert, H. (1989). *Aufbereitung fester mineralischer Rohstoffe, Band I*. 4. Auflage. Vol. 4. Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie.
- [136] Grübl, P. und M. Rühl (1998). *German Committee for Reinforced Concrete (DAfStb) - Code: Concrete with Recycled Aggregates*. In Tagungsband "Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate". London, U.K. Hrsg. University of Dundee, Concrete Technology Unit, London, UK, 8 Seiten.
- [137] Jeschke, H. und W. Poppy (2003). *Optimierung der Prallzerkleinerung im Prallbrecher*. In Tagungsband "Recycling 2003 - Forschungsprojekte zum Recycling". Weimar. 10 Seiten.
- [138] Müller, A., et al. (2005). *Vergleichende Untersuchungen zum Aufschluss von Altbeton mittels Leistungsschallimpulsen*. In Tagungsband "Recycling 2005". Weimar. Hrsg. Bauhaus-Universität Weimar, 17 Seiten.
- [139] Schubert, J. und D. Heinz (2006). *Nachhaltige Verwertung von Betonbrechsand als Betonzusatzstoff*. München: Technische Universität München, cbm - Centrum Baustoffe und Materialprüfung. Stoffflussmanagement Bauwerke, Schlussbericht. 173 Seiten.
- [140] Maultzsch, M. (1988). *Die thermogravimetrischen Analyse (TGA) in der Materialprüfung kunststoffmodifizierter Zementmörtel*. Materialprüfung, 30. Auflage (5): S 157-161.

- [141] Mulder, E., et al. (2002). *A closed material cycle for concrete as part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D waste*. In Tagungsband "Sustainable Concrete Construction - Challenges of Concrete Construction". Dundee. Thomas Telford. London. S. 555-562.
- [142] Hansen, T.C. und H. Narud (1983). *Recycled concrete and fly ash make calcium silicate bricks*. Cement and Concrete Research, 13. Auflage (4): S. 507-510.
- [143] Müller, C., U. Wiens, und B. Dora (1998). *Verwendungsmöglichkeiten von Materialien, die bei der Aufbereitung von Altbeton/Bauschutt anfallen und nicht wiederverwertbar sind*. In Tagungsband " Statusseminar Baustoffkreislauf im Massivbau". Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau. 15 Seiten.
- [144] Möbius, A. und A. Müller (2001). *Re-use of recycled concrete sand fraction*. in GREEN 3: The exploitation of natural resources and the consequences 2001. Thomas Telford. London. S. 170-176.
- [145] Kropp, J. und F. Hllawatsch (2004). *Autoclaved Masonry Products Made of Fines From C&D Waste Proccesing - a promising approach to high level re-use of problem wastes.*, Vortrag RILEM Conference "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona, 09.11.2004.
- [146] Hauer, B., et al. und Ramolla S., et. al. (2007). *Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau - Teilprojekt B1*. in Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton"- Heft 572. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton DAfStb. Berlin. S. 135 - 230.
- [147] de Jong, T., L. Fabrizi, und W. Kuilman (2005). *Dry density separation of mixed construction and demolition waste*. In Tagungsband "Sortieren - Innovationen und Anwendungen". Berlin. Hrsg. Lehrstuhl für Mechanische Verfahrenstechnik & Aufbereitung, Technische Universität Berlin, S. 89-97.
- [148] Buntenbach, S., E. Petit, und H. Hohberg (1997). *Naßmechanische Aufbereitung von Bauschutt*. Aufbereitungs-Technik, 38. Auflage (3): S. 130-138.
- [149] Kellerwessel, H. (1996). *Neue Entwicklungstendenzen in der Aufbereitungstechnik - Anwendungen und Anlagentechnik*. Aufbereitungs-Technik, 37. Auflage (9): S. 438-444.
- [150] Dehler, M. (2004). *Optische Sortierung von mineralischen Rohstoffen*. Die Natursteinindustrie, 40. Auflage (6): S. 14-36.
- [151] Xing, W. (2004). *Quality Improvement of Granular Secondary Raw Building Materials by Separation and Cleansing Techniques*. Delft: Delft University of Technology, Section of Material Science and Sustainable Construction, Faculty of Civil Engineering and Geosciences. Dissertation.
- [152] Bohle, B. (1993). *Einsatz und Anwendungen von Sortierspiralen im europäischen Umweltschutz*. Aufbereitungs-Technik, 34. Auflage (11): S. 579-590.
- [153] Bohle, B. (1995). *Hydrozyklone und Sortierspiralen - eine einfache Lösung für die wirtschaftliche Sortierung und Rückgewinnung von Feinsand in der europäischen Kies- und Sandindustrie*. Aufbereitungs-Technik, 36. Auflage (12): S. 554-561.
- [154] Pretz, T. (2006). *Vorlesungsskript "Aufbereitung fester Abfallstoffe und Recyclingtechnologien III - Teil 8"*. (2006); auf <http://www.iar.rwth-aachen.de>.
- [155] Bakker, M.A. (1993). *12 Jahre erfolgreiche Naßaufbereitung von Bauschutt in Rotterdam*. Aufbereitungs-Technik, 34. Auflage (4): S. 201-210.
- [156] Kleemann & Reiner GmbH (1998). *Waschen von Bauschutt*. Firmeninformation auf <http://www.kleemann.info/de>.
- [157] Agricola, G. (1950). *De re metallica - Translated from the first latin edition of 1556*. Hrsg. H.C. Hoover und L.H. Hoover. New York: Dover Publications Inc.
- [158] Fellensiek, E. und W. Erdmann (1991). *Die Setzsortierung - geschichtliche und maschinentechnische Entwicklung*. Aufbereitungs-Technik, 32. Auflage (11): S. 599-607.
- [159] Fellensiek, E. und W. Erdmann (1985). *Neuere Entwicklungen in der Setzmaschinentechnik*. Aufbereitungs-Technik, 26. Auflage (6): S. 329-342.
- [160] Marx, G., R. Moskala, und U. Schneider-Kühn (1999). *Dichtesortieren auf Nasssetzmaschinen*. Aufbereitungs-Technik, 40. Auflage (5): S. 215-224.

- [161] Wasmuth, H.-D. und D. Ziaja (1992). *Aufbereitung von Eisenerz-Stückerz und Sinterfeinerzen mit luftgepulsten BATAc-Setzmaschinen*. Aufbereitungs-Technik, 33. Auflage (6): S. 318-327.
- [162] Bräumer, M. (2004). *Vertikalsetzmaschine für Schlackenaufbereitung*. Aufbereitungs-Technik, 45. Auflage (5): S. 63-65.
- [163] Wills, B.A. (1992). *Mineral Processing Technology*. 5th Edition. Oxford: Pergamon Press.
- [164] Mayer, F.-W. (1950). *Der Entmischungsvorgang als physikalischer Aufbereitungsprozeß*. Bergbau-Archiv, 5. Auflage (11/12): S. 82-94.
- [165] Kellerwessel, H. (1993). *Sortieren mit Luft im Recycling-Bereich - Verfahren, Apparate, Möglichkeiten, Grenzen*. Aufbereitungs-Technik, 34. Auflage (3): S. 144-150.
- [166] Horn, A. (2005). Allmineral. *Persönliche Mitteilung* Berlin / Duisburg.
- [167] Derks, J.W., R. Moskala, und U. Schneider-Kühn (1997). *Nassaufbereitung von Bauschutt mit Schwingsetzmaschinen*. Aufbereitungs-Technik, 38. Auflage (3): S. 139-143.
- [168] Kellerwessel, H. (1993). *Setzmaschinen, besonders für Recyclingaufgaben - Möglichkeiten, Grenzen, Bauarten*. Aufbereitungs-Technik, 34. Auflage (10): S. 521- 530.
- [169] Vogt, V. (2006). Technische Universität Clausthal-Zellerfeld. *Persönliche Mitteilung*.
- [170] Wienke, L. (2005). "Entwicklung einer neuen Maschinenteknik zur nassmechanischen Trennung von Stoffen nach ihren spezifischen Gewichten" - Abschlussbericht ABW. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung. Abschlussbericht. 55 Seiten.
- [171] Zimmermann, W. (1989). *Setzen von Quarz/Magnetit-Mischungen und Steinkohle im Feinkornbereich unter einem Millimeter*. Clausthal-Zellerfeld: Technische Universität Clausthal-Zellerfeld, Institut für Aufbereitung und Veredlung. Dissertation.
- [172] BAM (2004). *EU-LIFE Projekt: RECDemo - Vollständige Verwertung der Sandfraktion aus dem Bauschuttrecycling*. Berlin: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung. Technischer Abschlussbericht. 54 Seiten.
- [173] Saxer, A., W. Lukas, und M. Deisl (1999). *Herstellung von Betonen mit Zuschlägen aus der Wiederverwertung von anorganischen Baureststoffen*. In Tagungsband "7. Weimarer Fachtagung über Abfall- und Sekundärrohstoffwirtschaft". Weimar. Hrsg. Bauhaus-Universität Weimar.
- [174] Jungmann, A., et al. (1997). *Bauschutttaufbereitung mit Alljig-Setzmaschinen in Europa und USA*. Aufbereitungs-Technik, 38. Auflage (10): S. 543-549.
- [175] Mesters, K. und K. Krass (1997). *Großtechnische Aufbereitung von RC-Baustoffen mittels Dichtentrennung*. Bochum: Krass & Mesters, Beratungsgesellschaft mbH. Forschungsbericht für Industrieunternehmen, unveröffentlicht. 66 Seiten.
- [176] Eyerer, P. und H.-W. Reinhardt (2000). *Ökologische Bilanzierung von Baustoffen und Gebäuden*. Baupraxis. Basel: Birkhäuser Verlag.
- [177] Heinz, D. (2003). *Vom Baustoff zum Bauwerk - Chancen für eine nachhaltige Entwicklung*. In Tagungsband "3. Münchner Baustoffseminar". München.
- [178] Nisbet, M. und M.G.v. Geem (1997). *Environmental life cycle inventory of Portland cement and concrete*. World Cement, 28. Auflage: S. 100-103.
- [179] Craighill, A. und J. Powell (1996). *Lifecycle assessment and economic evaluation of recycling: a case study*. Resources Conservation & Recycling, 17. Auflage (2): S. 75-96.
- [180] Kern, G., B. Elendt-Schneider, und A. Kicherer (2006). *Balanceakt zwischen Ökonomie und Ökologie*. Entsorgung-Magazin, 16. Auflage (4): S. 19-22.
- [181] Ekkerlein, C. (2004). *Ökologische Bilanzierung von Gebäuden in frühen Planungsphasen auf Basis der Produktmodellierung*. München: Technische Universität, Lehrstuhl für Wassergüte- und Abfallwirtschaft der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen. Dissertation.
- [182] Schebek, L., et al. (2003). *Dokumentation des Workshops "Qualitätssicherung und nutzerorientierte Bereitstellung von Lebenszyklusdaten"*. Karlsruhe: Forschungszentrum Karlsruhe GmbH. Wissenschaftliche Berichte, 133 Seiten.

- [183] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (1998). *DIN EN ISO 14041: Umweltmanagement - Ökobilanz - Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens sowie Sachbilanz*. Beuth Verlag: Berlin.
- [184] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2000). *DIN EN ISO 14042: Umweltmanagement - Ökobilanz - Wirkungsabschätzung*. Beuth Verlag: Berlin.
- [185] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2000). *DIN EN ISO 14043: Umweltmanagement - Ökobilanz - Auswertung*. Beuth Verlag: Berlin.
- [186] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (1997). *DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Prinzipien und allgemeine Anforderungen*. Beuth Verlag: Berlin.
- [187] Gallenkemper, B., et al. (2004). *Einsatz ökologisch of vorteilhaft. Baustoff Recycling + Deponietechnik (BR)*, 20. Auflage (3): S. 34-38.
- [188] Gallenkemper, B., et al. (2004). *Ökologischer Nutzen des Recyclings und der Kreislaufwirtschaft im Bauwesen. Müll und Abfall*, 36. Auflage (6): S. 260-266.
- [189] Öko-Institut (2005). *Datenbank Gemis 4.2*. (Internet); auf www.oeko.de/service/gemis/de/.
- [190] Lauritzen, E. (1994). *Economic and environmental benefits of recycling waste from the construction and demolition of buildings*. UNEP Industry and Environment, 17. Auflage: S. 26-31.
- [191] Sára, B., E. Antonini, und M. Tarantini (1999). *Application of Life Cycle Assessment (LCA) methodology für valorization of building demolition materials and products*. Bologna, Italy: LIFE. Zwischenbericht: 9 Seiten.
- [192] Craighill, A. und J. Powell (1999). *A lifecycle assessment and evaluation of construction and demolition waste*. London: Centre for Social and Economic Research on the Global Environment (CSERGE). CSERGE Working Paper WM 99-03, 49 Seiten.
- [193] Weil, M. und U. Jeske (2005). *Ökologische Positionsbestimmung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen*. In Tagungsband "Recycling 2005". Weimar. Hrsg. Bauhaus-Universität Weimar, 15 Seiten.
- [194] Weil, M., U. Jeske, und L. Schebek (2002). *Stoffstromanalyse und Ökobilanz als Hilfen zur umweltorientierten Positionsbestimmung von Beton mit und ohne rezyklierten Zuschlag im mineralischen Baustoffstrom*. Technologiefolgenabschätzung, 11. Auflage (1): S. 50-64.
- [195] Weil, M., U. Jeske, und L. Schebek (2002). *Beton mit und ohne rezyklierten Zuschlag im mineralischen Baustoffstrom*. Wasser- und Geotechnologie, 1. Auflage (2): S. 93-105.
- [196] Möller, A. (2000). *Stoffstrombasierte Kostenrechnungen*. in Grundlagen stoffstrombasierter Betrieblicher Umweltinformationssysteme2000. Projekt Verlag. Bochum. S. 147-166.
- [197] Kugler, G. (1990). *Betriebswirtschaftslehre der Unternehmung*. Fachbuchreihe für wirtschaftliche Bildung. Vol. 11. Haan Gruiten: Verlag Europa-Lehrmittel.
- [198] Kurkowski, H., I. Nyatanyi, und U. Penzel (2002). *Eingangskontrolle und Trockenaufbereitung von rezyklierten Betonsanden und -splitten*. Dresden. Bericht zum EU-LIFE Vorhaben "Recdemo". 97 Seiten.
- [199] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2001). *DIN 4226-1, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen*. Beuth-Verlag: Berlin.
- [200] Pieper, A. (2006). *Bestimmung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten von Recycling-Brechsand der Fraktion 0 - 4 mm*. Cottbus: Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus, Bauingenieurwesen. Diplomarbeit.
- [201] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2003). *DIN 66137-1, Bestimmung der Dichte fester Stoffe, Teil 1: Grundlagen*. Beuth-Verlag: Berlin.
- [202] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2003). *E-DIN 66137-1, Bestimmung der Dichte fester Stoffe, Teil 2: Gaspyknometrie*. Beuth-Verlag: Berlin.
- [203] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (1996). *DIN EN 932-1, Prüfverfahren für allgemeine Eigenschaften von Gesteinskörnungen , Teil 1: Probenahmeverfahren*. Beuth-Verlag: Berlin.

- [204] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (1993). *DIN 66133, Bestimmung der Porenvolumenverteilung und der spezifischen Oberefläche von Feststoffen durch Quecksilberintrusion*. Beuth-Verlag: Berlin.
- [205] Walz, K. (1972). *Herstellung von Beton nach DIN 1045*. 2. Auflage. Düsseldorf: Beton-Verlag.
- [206] Ebeling, K., W. Knoop, und R. Pickhardt (2002). *Beton - Herstellung nach Norm*: Bau + Technik.
- [207] Readymix Kies & Beton AG (1998). *Betontechnische Daten*. 16. Auflage. Ratingen: Readymix Kies & Beton AG.
- [208] DIN-Deutsches Institut für Normung e.V. (2001). *DIN EN 12390-2, Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen*. Beuth-Verlag: Berlin.
- [209] Krezel, Z.A. und K.J. McManus (2001). *New concrete products made from concrete waste*. In Tagungsband "3rd International Congress "Added Value and Recycling of Industrial Waste"". Aquila, Italy. 4 Seiten.
- [210] Gruber, B. (2004). *Grundlegende Betrachtungen einer ökologischen Bilanzierung zweier ausgewählter Fraktionen aus einer nassen Baurestmassen-Aufbereitung (unveröffentlicht)*. Hallein, Österreich: Deisl-Beton GmbH. Interner Bericht. 4 Seiten.
- [211] Weimann, K., et al. (2004). *Untersuchungen zur Verwertung von Reststoffen aus der Betonbrechsandaufbereitung*. Recycling Magazin, 59. Auflage (23): S. 14-15.
- [212] Sprenger, S. (2005). *Ökonomische und ökologische Bewertung eines Recyclingprozesses zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand*. Berlin: Fachhochschule für Technik und Wirtschaft Berlin, Umwelttechnik / Regenerative Energien. Diplomarbeit.
- [213] Öko-Institut (2007). *Datenbank Gemis 4.4*. (Internet); auf <http://www.oeko.de/service/gemis/de/>.
- [214] ifu (2004). *Umberto*. (Internet) (1998); Firmeninformation auf <http://www.umberto.de/de/>.
- [215] Thielen, G. (2001). *Technische und rechtliche Anforderungen bei Verwendung von Bauprodukten unter Berücksichtigung von Gesundheits- und Umweltaspekten aus der Sicht der Steine- und Erden-Industrie*. In Tagungsband "Nachhaltigkeit im Bauwesen". Frankfurt a. M. Hrsg. Bundesverband Baustoffe Steine + Erden e.V., S. 135-144.
- [216] Hutter, C., et al. (1999). *Ganzheitliche Bilanzierung von Grundstoffen und Halbzeugen - Teil 2: Baustoffe*. München: Forschungsstelle für Energiewirtschaft e.V. 182 Seiten.
- [217] Hauptverband der Deutschen Bauindustrie (2001). *Baugeräteliste 2001*. Baugeräteliste. Hrsg. H.d.D. Bauindustrie. Vol. 2. Wiesbaden und Berlin: Bauverlag GmbH.
- [218] Görg, H. (2002). *Landschaftsverbrauch und Flächenrecycling - Neue Anstöße für baunahe Umwelttechnik? Altlasten Spektrum*, 11. Auflage (5): S. 261-262.
- [219] Warnecke, H.J., et al. (1990). *Kostenrechnung für Ingenieure*. Vol. 3. München: Carl Hanser Verlag.
- [220] Keil, W. und U. Martinsen (1991). *Einführung in die Kostenrechnung für Bauingenieure*. Vol. 7. Düsseldorf: Werner-Verlag GmbH.
- [221] Pretz, T. (2005). *Vorlesungsskript "Grundlagen der Aufbereitung fester Abfallstoffe und Recyclingtechnologien II"*. (2005); Betriebskostenkalkulation). auf <http://www.iar.rwth-aachen.de/>.
- [222] Miranda, L.F.R. und S.M.S. Selmo (2004). *A case study on the variation in the quality of mortars using cdw recycled sands*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona. Hrsg. RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France, S. 483-492.
- [223] Kurkowski, H. (1998). *Hochwertige Verwertung schwer recycelbarer Baustoffe*. Deutag. Zwischenbericht BiM C/03. 7 Seiten.
- [224] Angulo, S.C. und A. Müller (2008). *Recycled concrete Aggregates: Dependences between water absorption, content of cement paste and density*. Artikel in Vorbereitung.
- [225] Sanchez de Juan, M. und P.A. Gutiérrez (2004). *Influence of attached mortar content on properties of recycled concrete aggregate*. In Tagungsband "Use of recycled materials in buildings and structures". Barcelona. Hrsg. RILEM Publications S.a.r.l., Bagneux, France, S. 536-544.

-
- [226] Müller, C. und U. Wiens (1998). *Mehrfachrecycling*. Technische Universität Darmstadt, Institut für Massivbau. Zwischenbericht Teilprojekt E04, 7 Seiten.
- [227] Behler, K. (2002). *Betonbrechsande in sandreichen Betonen*. Baustoff Recycling + Deponietechnik (BR), 18. Auflage (6): S. 25 - 28.
- [228] Hoffmann, C. und F. Jacobs (2007). *Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat*. Dübendorf: EMPA (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt). Sachstandsbericht. 92 Seiten.
- [229] Evangelista, L.R. und J.C. De Brito (2007). *Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled aggregates*. Cement & Concrete Composites, 29. Auflage: S. 397-401.
- [230] Sichtung, M. (2003). *Rohstoffabbau*. Die Naturstein-Industrie, 39. Auflage (6): S. 12-14.
- [231] Pollmanns, J. (2004). *Effektive Kiesentholzung mit Setzmaschinen*. Aachen: Vortrag, Forum Kies und Sand 2004.
- [232] Karnuth, M. (2003). *Verhalten von Recycling-Materialien in der Umwelt: Labor- und Feldversuche*. Mainz: Johannes Gutenberg-Universität, Fachbereich Geowissenschaften. Dissertation.

9. Anhänge

Anhang A 1: Theoretische Grundlagen zur Sedimentation

Als Endfallgeschwindigkeit wird die maximale Geschwindigkeit, die ein Teilchen in einem ruhenden Fluid erreichen kann, bezeichnet. Die Haupteinflussfaktoren auf die Endfallgeschwindigkeit sind Korngröße, Korndichte und Kornform. Sie ist außerdem von den Eigenschaften des Fluids, in dem sich das Teilchen bewegt, abhängig.

Nach der Stoke'schen Gleichung, die auf dem Stoke'schen Gesetz aufbaut, kann die Sedimentationsgeschwindigkeit sphärischer Körper bestimmt werden. Auf den sinkenden Körper wirken die Schwerkraft F_G , die statische Auftriebskraft F_A und die Widerstandskraft F_W . Beim Sedimentieren eines Teilchens steigt mit ansteigender Sinkgeschwindigkeit auch die Widerstandskraft an, solange bis sich ein Kräftegleichgewicht eingestellt hat und damit die konstante Endfallgeschwindigkeit erreicht ist. Das Kräftegleichgewicht kann dann wie folgt beschrieben werden:

$$F_G - F_A - F_W = 0 \quad \text{Gl. A 1}$$

umgeformt ergibt sich die Widerstandskraft dann wie folgt:

$$F_W = F_G - F_A \quad \text{Gl. A 2}$$

Nach Stokes berechnet sich die stationäre Sinkgeschwindigkeit oder Endfallgeschwindigkeit gemäß:

$$v_p = \frac{2 r^2 \cdot g (\rho_p - \rho_f)}{9\eta} \quad \text{Gl. A 3}$$

- mit
- v_p = Sedimentationsgeschwindigkeit
 - g = Erdbeschleunigung
 - r = Radius des sinkenden Partikels
 - ρ = Dichte des Partikels
 - ρ_f = Dichte des Fluids
 - η = Viskosität des Fluids

Diese Gleichung ist gültig für langsame Sedimentationsgeschwindigkeiten mit einer Reynolds-Zahl $Re < 1$, wenn die Trägheit des Fluids unbedeutend ist. Für Sinkgeschwindigkeiten in turbulenteren Fluids gelten größere Reynoldszahlen.

Für kugelförmige Partikel mit einem Durchmesser von 4 mm und unterschiedlicher Dichte ergeben sich nach Gl. A 3 die folgenden Endfallgeschwindigkeiten im ruhenden Wasser:

| Material | Dichte [g/cm ³] | Endfallgeschwindigkeit [m/s] |
|------------------------|-----------------------------|------------------------------|
| Quarz | 2,65 | 1,44 |
| Beton Ausgangsmaterial | 2,06 | 0,92 |
| Beton – Schwergut | 2,25 | 1,09 |
| Beton – Leichtgut | 1,94 | 0,82 |

Anhand dieser Tabelle ist ersichtlich, dass schon bei sedimentierenden Betonbrech-sandpartikeln im ruhendem Fluid – bei ausreichender Sedimentationsstrecke – eine Schichtung nach der Kornrohddichte erfolgen kann.

Anhang A 2: Umweltanalytische Untersuchungen

Tabelle A 1: Ergebnisse der Eluatanalysen der Ausgangsmaterialien

| Brech- sand | pH- Wert | el. Leitf. [mS/cm] | As | Pb | Cd | Cr _{i(ges.)} [µg/l] | Cu | Ni | Hg*) | Zn |
|----------------|-------------|-----------------------|-----|-----|-----|---------------------------------|------|-----|------|-----|
| | | | | | | | | | | |
| BS A | 11,0 | 1,13 | 6,1 | 2,4 | 0,5 | 5,0 | 10,0 | 3,0 | n.a. | 7,1 |
| REM A | 11,6 | 2,71 | 4,7 | 1,3 | 0,3 | 7,1 | 26,5 | 4,4 | n.a. | 7,1 |
| SAL A | 11,6 | 2,51 | 4,8 | 1,0 | 0,3 | 30,2 | 6,2 | 1,6 | n.a. | 9,7 |
| HAL A | 11,8 | 3,11 | 5,3 | 0,4 | 0,3 | 8,4 | 4,6 | 0,4 | n.a. | 4,7 |
| Z 1.1 | 12,5 | 1,5 | 10 | 40 | 2,0 | 30 | 50 | 50 | 0,2 | 100 |
| Z 1.2 | 12,5 | 2,5 | 40 | 100 | 5,0 | 75 | 150 | 100 | 1,0 | 300 |

*) die gemessenen Quecksilbergehalte lagen unter dem Quecksilbergehalt des Blindwertes

Tabelle A 2: Schadstoffgehalte von Ausgangsmaterial, Schwergut und Leichtgut der Versuchsserien BS, REM, SAL und HAL sowie einer Mischprobe der Feinstgüter aller Materialien ($F_{(Misch)}$) und die prozentualen Veränderungen der Schadstoffgehalte der Austragsgüter im Verhältnis zum jeweiligen Ausgangsmaterial

| Brechsand | As [mg/kg] | Pb [mg/kg] | Cd [mg/kg] | $C_{(gas)}$ [mg/kg] | Cu [mg/kg] | Hg [mg/kg] | Zn [mg/kg] | MKW [mg/kg] | PAK (EPA) [mg/kg] |
|---------------|---------------|---------------|---------------|------------------------|---------------|---------------|---------------|----------------|----------------------|
| | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] | Δ [%] |
| BS A | 28,1 | 11,1 | 1,0 | 32,0 | 15,3 | 0,00 | 40,0 | 15,6 | 2,0 |
| BS S | 10,1 | 11,1 | 0,9 | 24,8 | 12,2 | 0,00 | 33,9 | 13,9 | 1,1 |
| BS L | 17,8 | 14,4 | 1,2 | 44,5 | 11,7 | 0,00 | 48,8 | 21,4 | 4,0 |
| REM A | 6,2 | 12,6 | 1,3 | 18,4 | 22,0 | 0,00 | 80,7 | 64,2 | 1,6 |
| REM S | 4,6 | 10,5 | 1,0 | 13,4 | 20,1 | 0,00 | 80,4 | 51,9 | 0,6 |
| REM L | 5,9 | 12,8 | 1,5 | 19,0 | 23,3 | 0,00 | 84,2 | 94,5 | 1,2 |
| SAL A | 1,1 | 3,8 | 0,8 | 13,7 | 5,0 | 0,00 | 20,6 | 3,9 | 1,1 |
| SAL S | 1,1 | 2,9 | 0,7 | 7,7 | 2,8 | 0,00 | 3,3 | 5,7 | 0,4 |
| SAL L | 3,7 | 3,6 | 1,0 | 15,6 | 8,1 | 0,00 | 22,4 | 2,4 | 1,3 |
| HAL A | 2,1 | 4,9 | 0,8 | 11,6 | 8,6 | 0,00 | 55,2 | 20,2 | 0,6 |
| HAL S | 1,8 | 4,3 | 0,7 | 9,9 | 7,3 | 0,75 | 31,3 | 11,2 | 0,2 |
| HAL L | 3,4 | 10,5 | 1,3 | 18,0 | 16,6 | 1,50 | 91,0 | 16,2 | 0,0 |
| $F_{(Misch)}$ | 39,9 | 40,5 | 3,0 | 83,7 | 34,3 | 2,75 | 212 | 537 | 2,3 |
| Z 1.1 | 30 | 200 | 1 | 100 | 100 | 1 | 300 | 300 | 5 |
| Z 1.2 | 50 | 300 | 3 | 200 | 200 | 3 | 500 | 500 | 15 |

Δ [%]: Veränderung des Schadstoffgehaltes im Vergleich zum Schadstoffgehalt im jeweiligen Ausgangsmaterial in [%]

Anhang A 3: Ökologische und ökonomische Bewertung - Modellanlage

Tabelle A 3: Maschinenliste für eine Industrieanlage zur Brechsandaufbereitung mit einem Durchsatz von 100 t Brechsand / h

| Position | Aggregat | Preis in € | el. Anschlussleistung [kw] | Energieverbrauch [kW/h] |
|----------|---|---------------------|----------------------------|-------------------------|
| A 0 | Aufgabesilo (50m ³) | 30.000,00 | 0 | 0 |
| A 1 | Dosierband | 40.000,00 | 30 | 30 |
| A 2 | Attritionsmischer | 340.000,00 | 200 | 150 |
| A 3 | Überkornsieb | 40.000,00 | 6 | 6 |
| A 4 | Förderband | 10.000,00 | 2 | 2 |
| A 5 | Vorlagebehälter und Rührer | 8.000,00 | 5 | 5 |
| A 6 | Kolbenmembranpumpe P1 | 65.000,00 | 37 | 37 |
| A 7 | Hydrozyklon | 6.700,00 | 0 | 0 |
| A 8 | Setzmaschine | 180.000,00 | 40 | 36 |
| A 9 | Entwässerungssieb | 40.000,00 | 2 | 2 |
| A 10 | Förderband LG | 20.000,00 | 10 | 10 |
| A 11 | Entwässerungssieb | 40.000,00 | 6 | 6 |
| A 12 | Förderband SG | 35.000,00 | 30 | 30 |
| A 13 | Prozesswasserbehälter mit Pumpe P2 (NM 100/200CE) | 11.460,00 | 30 | 30 |
| A 14 | Pumpe P3 (B-NM 50/16AE) | 780,00 | 7,5 | 7,5 |
| A 15 | Kammerfilterpresse und Aggregate | 640.000,00 | 2 | 1 |
| A 16 | Bypassbehälter und Rührer | 8.000,00 | 164 | 24 |
| A 17 | Förderband FG | 15.000,00 | 8 | 4 |
| | Steuern / Regeln (Messschränke etc.) | 25.000,00 | 8 | 4 |
| | Gesamt: | 1.554.940,00 | 587,50 | 384,50 |

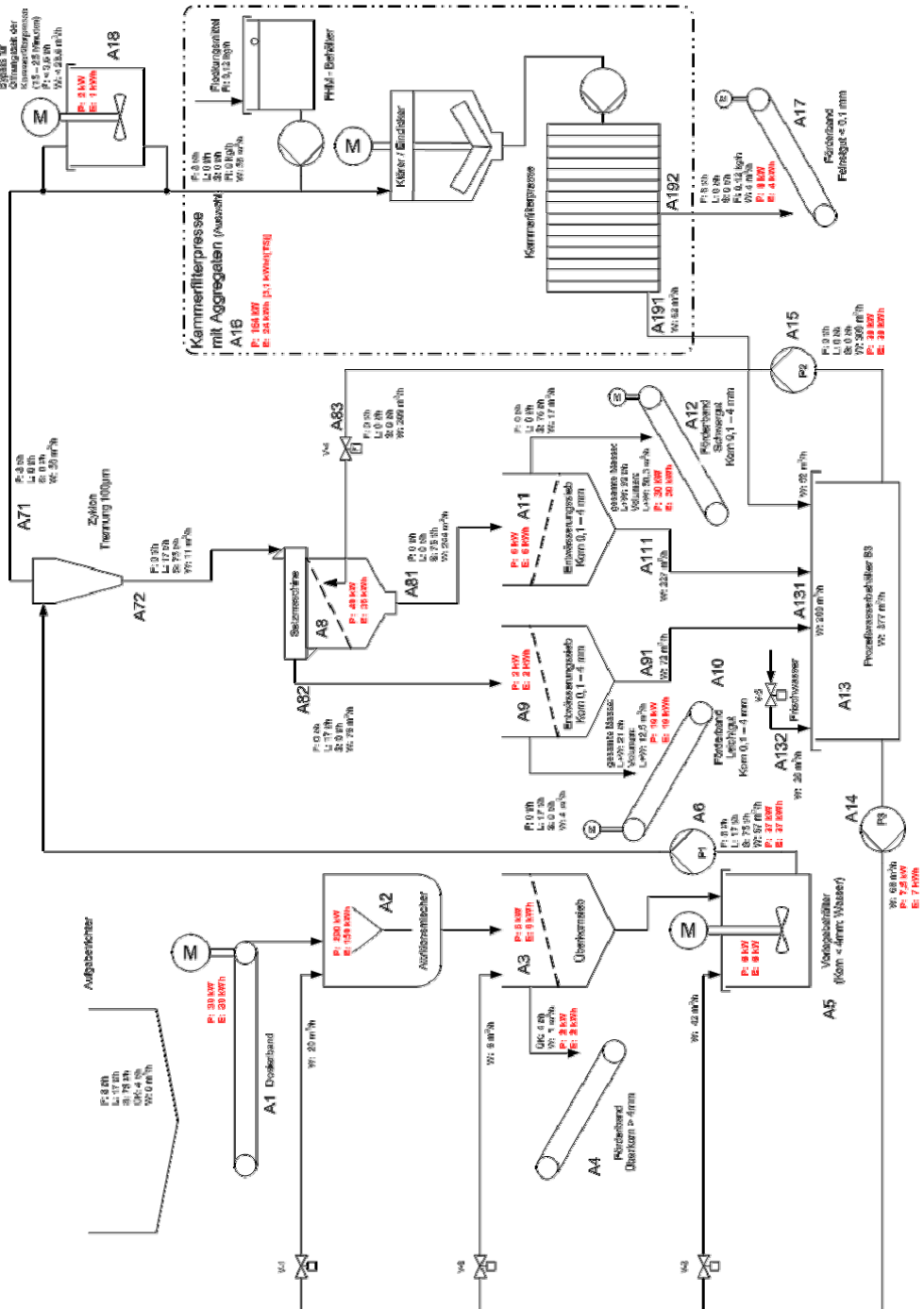


Abbildung A 1: Fließschema einer industriellen Aufbereitungsanlage für Betonbrechsand (Durchsatz 100 m³/h)

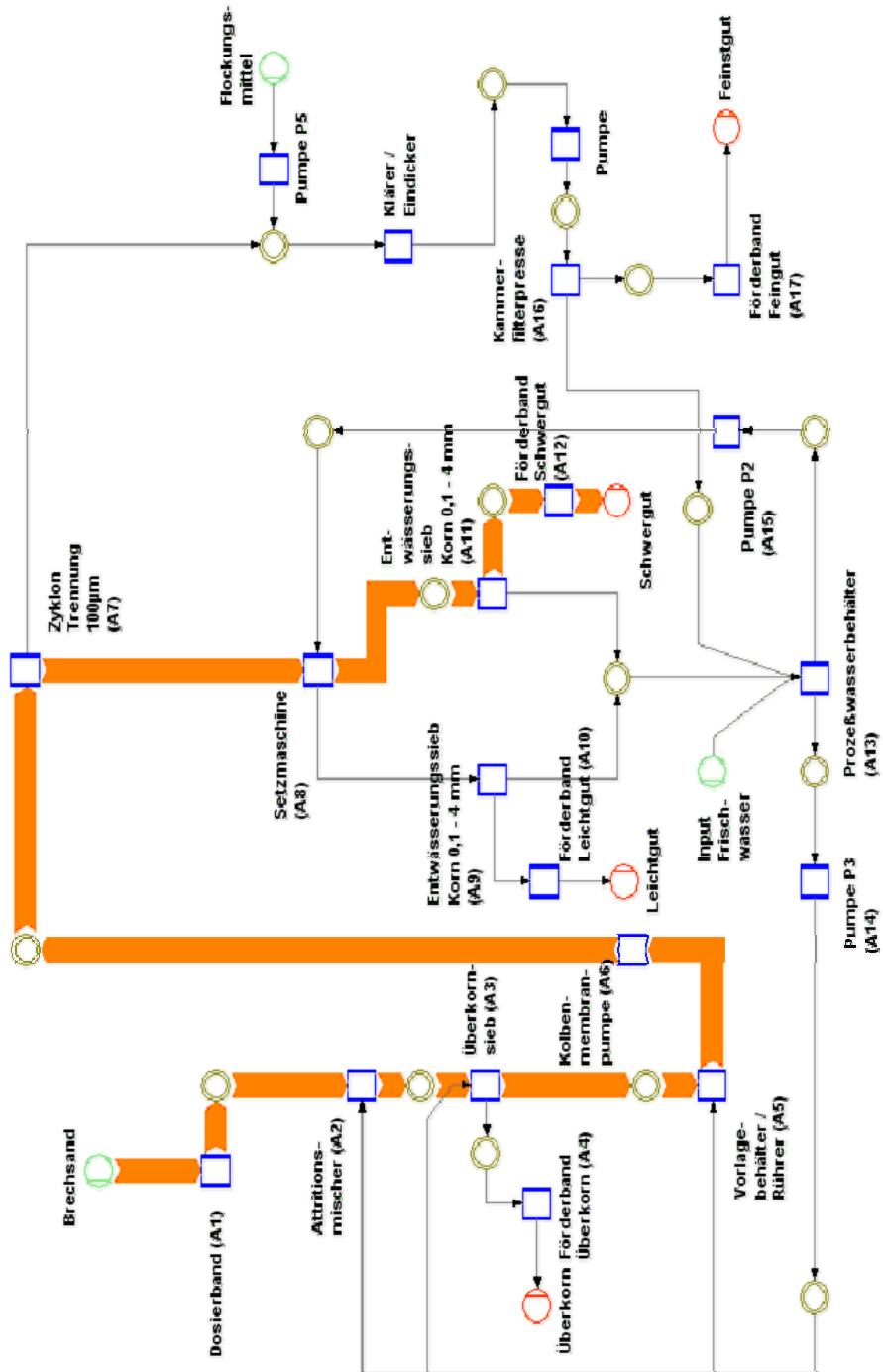


Abbildung A 2: Stoffflussdiagramm der Modellanlage (Umberto): Schwergut

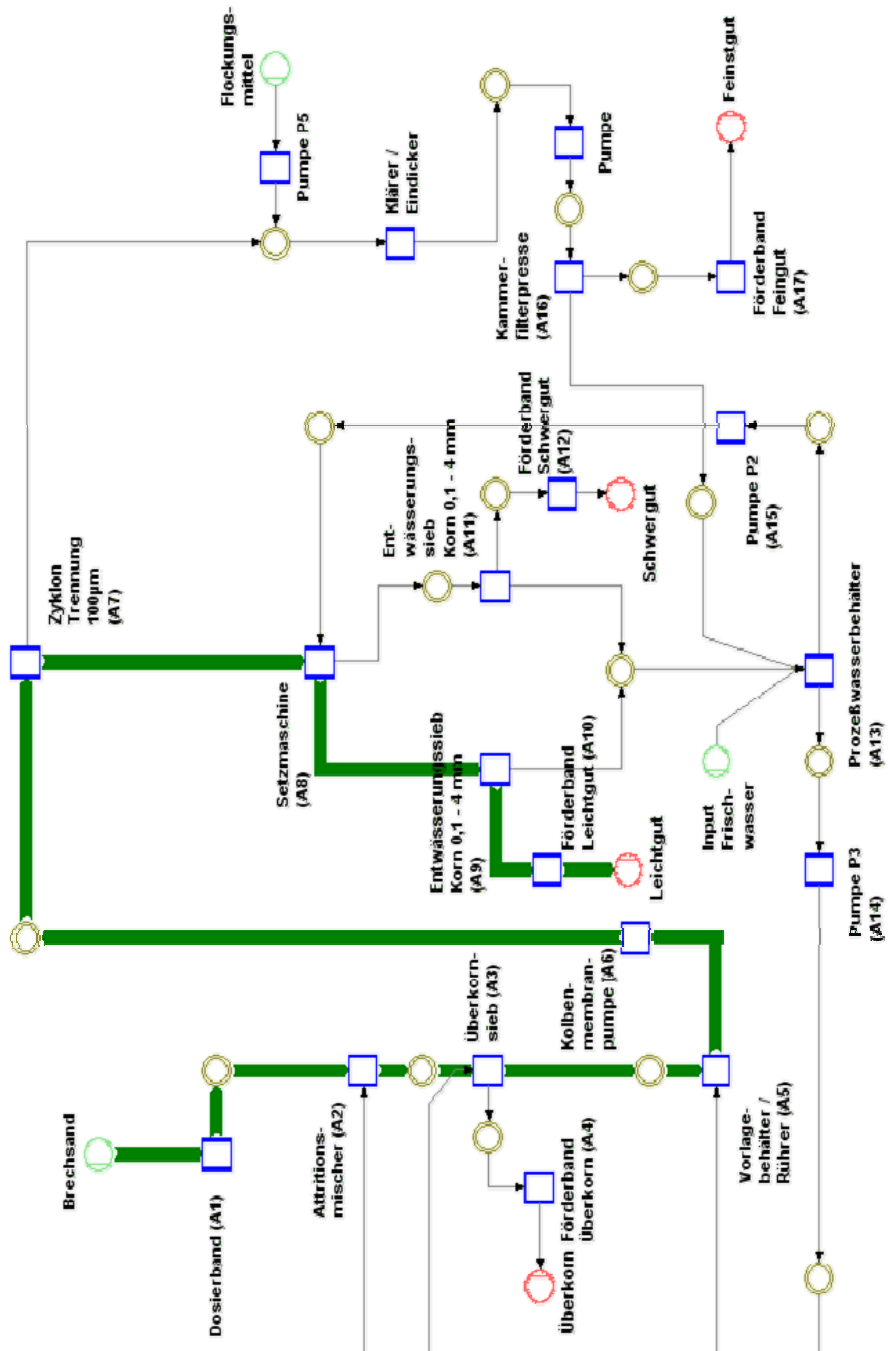


Abbildung A 3: Stoffflussdiagramm der Modellanlage (Umberto): Leichtgut

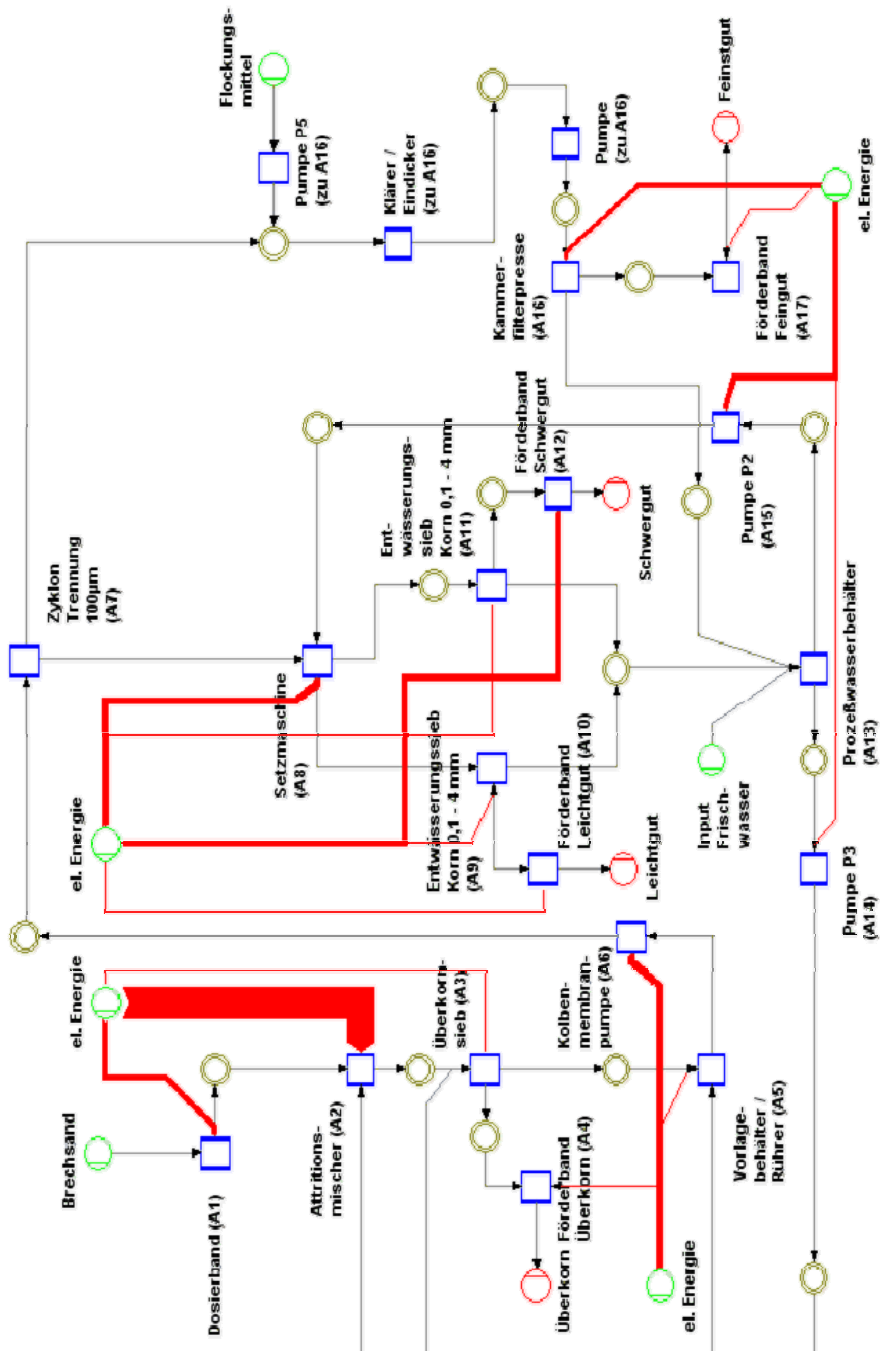


Abbildung A 5: Stoffflussdiagramm der Modellanlage (Umberto): elektrische Energie

Tabelle A 4: Umweltwirkung und kumulierter Energieverbrauch der Nassaufbereitung von 1 Tonne RC-Betonbrechsand

| Umweltwirkung und aggregierte Werte des Recyclingprozesses zur Herstellung von 1 Tonne RC - Brechsand | | | | | | | | | | |
|---|-------------------------------|-------------------|--|---|--|----------|--|--|--|--|
| Rohstoffe | Transport-entfernung in km | KEV in kWh/t | Treibhauseffekte CO ₂ -Äquivalent in kg | Umweltwirkungen | | | Naturraum- beanspruchung in m ² | | | |
| | | | | Versauerung SO ₂ -Äquivalent in kg | Ozonvorläufer NMVOC-Äquivalent in kg | | | | | |
| Stromverbrauch * | 385 kWh/75t | 1,48E+01 | 3,17E+00 | 4,29E-03 | 2,08E-04 | 1,19E-03 | | | | |
| Transport F+L zur Kompostieranlage ** | 25 (FG+LG) | 1,61E+00 | 4,47E-01 | 3,34E-03 | 5,80E-04 | 8,80E-05 | | | | |
| Rücktransport Überkorn zur Betonaufbereitungsanlage mit Dieselfahrzeug (LKW D mix) *** | 4 t(ÜK) | 53,3 kg/t(SG) | 3,55E-03 | 2,65E-05 | 4,61E-06 | 7,00E-07 | | | | |
| Radler (Verladung Betonbrechsand in Recyclinganlage) / Dieselfahrzeug *** | 2,29l Diesel/(104t/h) | 1,30E-06 T/Jt(SG) | 1,71E-01 | 1,27E-03 | 2,21E-04 | 3,36E-05 | | | | |
| Wasser (Verluste, Verdunstung, Prozesswasser) **** | 10,75 m ³ /75 t | 143,3 kg/1t(SG) | 3,79E-02 | 1,78E-04 | 9,07E-05 | 0,00E+00 | | | | |
| gesamt (nach Gemis) | | 17,05 | 3,83E+00 | 9,11E-03 | 1,10E-03 | 1,31E-03 | | | | |
| Sand (nach Gemis) | 1 to | 26,93 | 6,98E+00 | 5,31E-02 | 1,32E-03 | 6,24E-02 | | | | |
| Differenz [%] | | -36,69 | -45,15 | -82,84 | -16,60 | -97,89 | | | | |

* 385 kWh/ 75t S; entspricht: 5,1 kWh/t S; Anteil erneuerbarer Energien: ca. 4%
 ** 25 (F+L); entspricht: 333,3 kg/t S; Transportentfernung: 10 km; Durchschnittswert für LKW in Deutschland (D-Mix)
 *** 4 t(ÜK); entspricht: 53,3 kg/t S; Transportentfernung: 0,5 km, Transport mit Diesel Fahrzeug (LKW D mix)
 **** 2,29l Diesell/ Ladebewegung von 104 t/h; (Hu Diesel: 37,5 MJ/l), entsprechend: 1,1 MJ/t S bzw. aufgerundet ca. 10 % des Dieselvebrauchs eines durchschnittlichen Dieselfahrzeugs in D.
 ***** 10,75 m³/75 t S; entspricht: 143,33 kg/ t S - Faktoren für die Umweltwirkungen übernommen aus Lit. Sprenger
 Abkürzungen: F - Feinstgut; L - Leichtgut; S - Schwergut; ÜK - Überkorn

Tabelle A 5: Umweltwirkungen von RC-Beton mit einem Anteil von 20 % Schwergut als Gesteinskörnung

| Umweltwirkung und aggregierte Werte der Herstellung von 1 m ³ RC - Beton mit einem Anteil von 20% Schwergut | | | | | | | |
|--|-------|----|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Rohstoffe | | | KEV | Umweltwirkungen | | | Naturraumbeanspruchung |
| | | | | CO ₂ -Äquivalent | SO ₂ -Äquivalent | NM ₁₀ VOC-Äquivalent | |
| | | | in kWh/m ³ | in kg | in kg | in kg | in m ² |
| Zement (Portlandzement) | 310,0 | kg | 4,21E+02 | 3,00E+02 | 5,19E-01 | 1,82E-02 | 5,17E-01 |
| Wasser | 205,6 | l | 2,98E-07 | 5,62E-02 | 2,63E-04 | 1,34E-04 | n.b. |
| Natursand 0/4 mm | 656,0 | kg | 1,77E+01 | 4,58E+00 | 3,48E-02 | 8,69E-04 | 4,09E-02 |
| Naturkies 4/16 mm | 805,0 | kg | 3,77E+01 | 9,06E+00 | 4,74E-02 | 1,29E-03 | 1,20E-01 |
| Betonbrechsand 0/4 mm | 329,0 | kg | 5,61E+00 | 1,26E+00 | 3,00E-03 | 3,63E-04 | 4,33E-04 |
| RC-Beton gesamt | | | 481,86 | 314,93 | 0,60 | 0,02 | 0,68 |

Tabelle A 6: Umweltwirkungen des Referenzbetons gleicher Rezeptur

| Umweltwirkung und aggregierte Werte der Herstellung von 1 m ³ Referenzbeton | | | | | | | |
|--|----------|----|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| Rohstoffe | | | KEV | Umweltwirkungen | | | Naturraumbeanspruchung |
| | | | | CO ₂ -Äquivalent | SO ₂ -Äquivalent | NM ₁₀ VOC-Äquivalent | |
| | | | in kWh/m ³ | in kg | in kg | in kg | in m ² |
| Zement (Portlandzement) | 310,00 | kg | 4,21E+02 | 3,00E+02 | 5,19E-01 | 1,82E-02 | 5,17E-01 |
| Wasser | 185,00 | l | 2,68E-07 | 5,06E-02 | 2,37E-04 | 1,21E-04 | 0,00E+00 |
| Natursand 0/4 mm | 1.020,00 | kg | 2,75E+01 | 7,12E+00 | 5,41E-02 | 1,35E-03 | 6,36E-02 |
| Naturkies 4/16 mm | 806,00 | kg | 3,78E+01 | 9,07E+00 | 4,75E-02 | 1,29E-03 | 1,20E-01 |
| Betonbrechsand 0/4 mm | 0,00 | kg | | | | | |
| Referenzbeton gesamt | | | 486,10 | 316,22 | 0,62 | 0,02 | 0,70 |

Tabelle A 7: Vergleich der Umweltwirkungen von RC-Beton (mit 20 % RC-Gesteinskörnung) und Referenzbeton

| Rohstoffe | | | Umweltwirkungen | | | Naturraumbeanspruchung |
|---------------|-----------------------|----------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------|------------------------|
| | KEV | KEV | CO ₂ -Äquivalent | SO ₂ -Äquivalent | NM ₁₀ VOC-Äquivalent | |
| | in kWh/m ³ | in MJ/m ³ | in kg | in kg | in kg | in m ² |
| RC-Beton | 481,865 | 1734,713 | 314,934 | 0,605 | 0,021 | 0,678 |
| Referenzbeton | 486,104 | 1749,973 | 316,221 | 0,621 | 0,021 | 0,701 |
| Differenz [%] | -0,87 | -0,87 | -0,41 | -2,63 | -0,51 | -3,20 |

Tabelle A 8: Auflistung von Investitionskosten und Kapitalkosten für die Errichtung einer Industrieanlage zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand

| Investitionskosten | [Euro] | |
|--|---------------------|--------------|
| Aufbereitungsanlage (siehe Anlagenfließbild A1) | 1.554.940,00 | € |
| Planungs- und Genehmigungskosten (2,5 % der Anlagenkosten) | 38.873,50 | € |
| mobile Maschinenteknik / Radlader, anteilig 50 % in Verbindung mit der trockenen Aufbereitungsanlage | 75.000,00 | € |
| zusätzliche Infrastruktur (Wege, Fundamente) (1 %) | 15.549,40 | € |
| zusätzliche Büro- und Aufenthaltscontainer/Messwarte inkl. Wasser- und Elektrizitätsanschluss (2 %) | 31.098,80 | € |
| keine Baukosten: Mietpreis für Grundstück inkl. Leichtbauhalle für 10 Jahre (3.000 m ² * 10 € pM) in den laufenden Kosten enthalten | | € |
| Summe Investitionen | 1.715.461,70 | € |
| Kapitalkosten (Nutzungsdauer 10 a) | | |
| Abschreibung (linearer Afa-Satz) | 171.546,17 | € |
| Eigenkapital (30 %) | 514.638,51 | € |
| Fremdkapital | 1.200.823,19 | € |
| Zins (effektiver Zins, KfW-Kreditbank, 5 %, Auskunft Oktober 2007) | 5,50 | [%] |
| Laufzeit n | 10,00 | [a] |
| Zinssatz q = (1 + p/100) | 1,055 | |
| Annuitätsfaktor* | 0,132668 | |
| Annuität | 159.310,53 | |
| * $A = qn * (q-1) / (qn-1)$ | | |
| Investitionen pro Jahrestonne Durchsatz | 8,58 | €/t/a |
| Investitionen pro Jahrestonne Schwergut | 11,44 | €/t/a |

Tabelle A 9: Kalkulation von Betriebskosten der Nassaufbereitungsanlage und Verkaufspreis des RC-Betonbrechsandes

| Kalkulation der jährlichen Betriebskosten einer Industrieanlage (Durchsatz 100 t/h) | | | | |
|--|---|--|--------------|-----------------------------------|
| Betriebsstunden / Jahr: (250 Tage à 8 h) | 2.000 [h] | | | Zwischen- summen |
| Personal (Arbeitgeberbrutto): <i>PK öffentlicher Dienst 2006</i> | Maschinenführer Arbeiter Ingenieur (4 h /Woche) | 38.000,00 € 32.000,00 € 5.500,00 € | | |
| | | | | 75.500,00 € |
| Betrieb und Betriebsmittel: | | | | |
| <u>Wasser</u> Die Wassermengen, die mit den Austragsgütern ausgetragen werden, werden auf der Basis der Mittelwerte von Austragsmengen und Feuchtegehalten von 5 Versuchsfahrten mit einem Schwergutaustrag von ca. 75 % berechnet: 75% Schwergut (Feuchte 12,9 %), 16,7 % Leichtgut (Feuchte 33,5 %), 8,3 % Feinstgut (Feuchte 39,2 %) abzüglich der Feuchte des Ausgangsmaterials (9,4 %): bei einem Durchsatz von 100 t/h entspricht dies 9,153 m³/h, gerundet 10 m³/h. | | | | |
| Preise: Berliner Wasserbetriebe (BWB) 2007: | | | | |
| Grundgebühr: | | | | |
| | | 860,00 € | | |
| Verbrauch Austragswasser: 10 m³/h * 2000 h * 2,221 €/m³ * 2000 h | | 44.420,00 € | | |
| Wasserwechsel: 1.500 m³/a (Frischwasser + Abwasser) * 4,708 €/m³ | | 7.062,00 € | | |
| | | | | 52.342,00 € |
| <u>Strom:</u> Preise Vattenfall Gewerbe, Stand 11/2007: | | | | |
| Grundgebühr: 12 * 14,19 €/Monat | | | | |
| | | 170,28 € | | |
| Stromverbrauch 384,5 kW/h * 2000 h * 0,1413 €/kWh | | 108.659,70 € | | |
| | | | | 108.829,98 € |
| <u>Diesel</u> für den Radladerbetrieb: Dieselpreise Stand 11/2007: 1,25 €/l 2,29 l/100 t*2000 h = 4.580 l | | | | |
| | | 5.725,00 € | | |
| <u>Flockungsmittel</u> Hochrechnung auf Basis von Lieferantangaben 2007 | | | | |
| | | 6.250,00 € | | |
| <u>Reparatur und Wartung</u> 6 % der Anlagenkosten pro Jahr | | | | |
| | | 93.296,40 € | | |
| | | | | 105.271,40 € |
| Transport und Entsorgung Reststoffe Schätzung nach Internetrecherche (2007) | | | | |
| <u>Transport</u> Feinstgut und Leichtgut: 25 t/h * 2000 h | | 3 €/t | 150.000,00 € | |
| <u>Annahmegebühren</u> Kompostwerk: | | 2 €/t | 100.000,00 € | |
| | | | | 250.000,00 € |
| Übertrag: | | | | 591.943,38 € |

| | | |
|---|---------------------------------|-----------------------|
| Übertrag: | | 591.943,38 € |
| Versicherung Maschinentechnik: 1,5 % der Anlageninvestitionskosten/a | 23.324,10 € | 23.324,10 € |
| Miete für Grundstück mit Leichtbauhalle Mietpreis für Grundstück inkl. Leichtbauhalle für 10 Jahre 3.000 m ² * 10 € / Monat Schätzung | 360.000,00 € | 360.000,00 € |
| Annuität (kalkulatorische Zinsen) (Zinsen + Tilgung) | 159.310,53 € | 159.310,53 € |
| Abschreibung (lineare Abschreibung der Maschinentechnik, Abschreibungsdauer 10 Jahre) | 171.546,17 € | 171.546,17 € |
| Zwischensumme | | 1.306.124,18 € |
| Gemeinkosten und Wagnis & Gewinn 14 % der Zwischensumme, (Wagnis & Gewinn: 5 %) | 182.857,39 € | 1.488.981,57 € |
| 2000 * 75 t/h = | 150.000 t Schwergut p.a. | |
| Herstellungskosten: | 9,93 € /t | |
| Verkaufspreis: | <u>9.90 € /t</u> | |

Anhang A 4: Bewertung des Einflusses von Kenngrößen der RC-Gesteinskörnungen auf die Qualität des RC-Baustoffes

Auf der Basis der Auswertungen von Versuchsserie BS kann eine Gewichtung des Einflusses der Kenngrößen Zementsteingehalt (ZS) und Abweichung von der generierten Regelsieblinie B 4 (ΔRB_4) auf die Qualität der aus diesem Material hergestellten Mörtel erfolgen. Setzt man die erreichten Druckfestigkeiten der RC-Mörtel und des Referenzmörtels zu diesen Kenngrößen in Bezug, so erhält man über die Auswertung mittels linearer Regression die in den nachfolgenden Abbildungen A 6 und A 7 dargestellten Zusammenhänge.

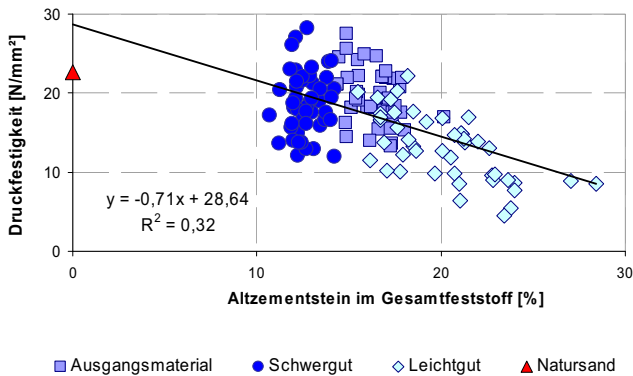


Abbildung A 6: Druckfestigkeiten von Mörteln aus Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serie BS als Funktion des Zementsteingehaltes im Vergleich zum Referenzmörtel

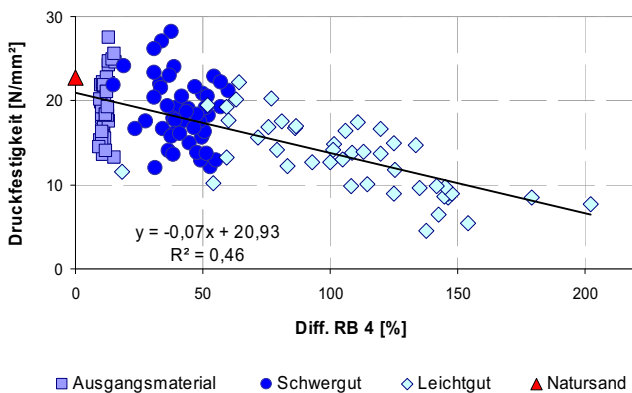


Abbildung A 7: Druckfestigkeiten von Mörteln aus Ausgangsmaterial und Austragsgütern der Serie BS als Funktion der Abweichung von der generierten Regelsieblinie RB 4 im Vergleich zum Referenzmörtel

Für die Druckfestigkeit von Mörteln aus den Gesteinskörnungen der Serie BS gelten dementsprechend die folgenden Abhängigkeiten:

$$\beta_D = f(ZS) = -0,71 \cdot (ZS) + 28,64 \quad \text{Gl. A 4}$$

$$\beta_D = f(\Delta RB_4) = -0,07 \cdot (\Delta RB_4) + 20,93 \quad \text{Gl. A 5}$$

Dabei gilt für die Abhängigkeit der Druckfestigkeit vom Zementsteingehalt der rezyklierten Gesteinskörnung ein Korrelationskoeffizient von $r = 0,57$. Der Korrelationskoeffizient für die Abhängigkeit von ΔRB_4 ist mit $r = 0,68$ etwas höher. Setzt man die Werte des Zementsteingehaltes in Bezug zu ΔRB_4 , so erhält man den folgenden Zusammenhang:

$$ZS = f(\Delta RB_4) = 0,05 \cdot (\Delta RB_4) + 13,38 \quad \text{Gl. A 6}$$

Der Korrelationskoeffizient beträgt $r = 0,64$. Über eine multiple Regression ist es möglich den Einfluss der beiden Kennwerte auf die Druckfestigkeit zu gewichten. Für die Druckfestigkeit ergibt sich die folgende Regressionsgleichung:

$$\hat{y} = 9,35 + 0,06 \cdot x_1 + 0,3 \cdot x_2. \quad \text{Gl. A 7}$$

Die Druckfestigkeit wird als abhängige Variable mit \hat{y} bezeichnet. x_1 steht als unabhängige Variable für ΔRB_4 und x_2 für ZS. Der Regressionskoeffizient für ΔRB_4 , ist mit $b_1 = 0,06$ um den Faktor 5 niedriger als der Regressionskoeffizient für ZS mit $b_2 = 0,3$. Jedoch ist der Mittelwert von 51,9 % der in die Berechnung einfließenden Kenngröße ΔRB_4 um einen Faktor von rund 3 höher als der Mittelwert des Zementsteingehaltes von 16,3 %. Dementsprechend kann man aus dieser Berechnung erkennen, dass sowohl der Zementsteingehalt als auch die Differenz der generierten Regelsieblinie B 4 die Druckfestigkeit klar beeinflussen. Der Einfluss des Zementsteingehaltes auf die Druckfestigkeit ist jedoch – trotz eines niedrigeren Korrelationskoeffizienten bei der linearen Regression – größer als die Auswirkungen der Abweichung von der Regelsieblinie B 4.

Ein anderes Bild ergibt sich bei der Betrachtung der Beeinflussung des dynamischen Elastizitätsmoduls durch die Kennwerte ZS und ΔRB_4 der rezyklierten Gesteinskörnung. Die Auswertung der Ergebnisse der Serie BS mittels linearer Regression ist in den nachfolgenden Abbildungen A 8 und A 9 dargestellt.

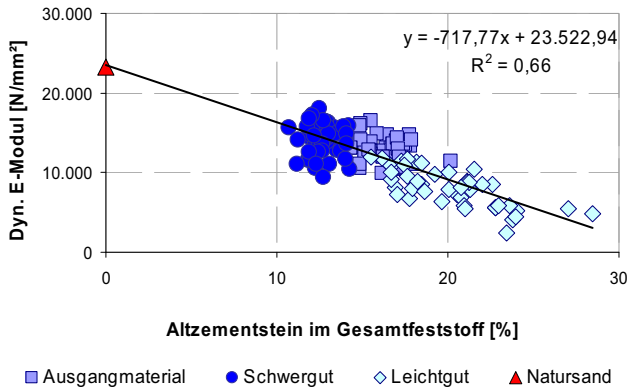


Abbildung A 8: Dynamischer E-Modul von Mörteln aus Ausgangsmaterial und Ausstragsgütern der Serie BS als Funktion des Zementsteingehaltes im Vergleich zum Referenzmörtel

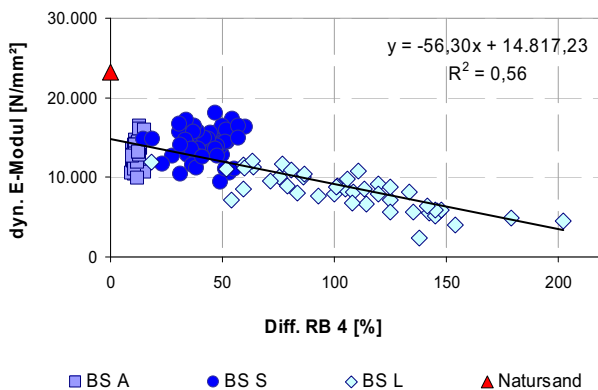


Abbildung A 9: Dynamischer E-Modul von Mörteln aus Ausgangsmaterial und Ausstragsgütern der Serie BS als Funktion der Abweichung von der generierten Regelsieblinie RB 4 im Vergleich zum Referenzmörtel

Für die dynamischen Elastizitätsmoduli der Mörtel aus den Gesteinskörnungen der Serie BS gilt demgemäß folgendes:

$$E = f(ZS) = -717,77 \cdot (ZS) + 23.523 \quad \text{Gl. A 8}$$

$$E = f(\Delta RB_4) = -56,3 \cdot (\Delta RB_4) + 14.817 \quad \text{Gl. A 9}$$

Der Korrelationskoeffizient für die Abhängigkeit des dynamischen E-Moduls vom Zementsteingehalt der rezyklierten Gesteinskörnung steht mit $r = 0,81$ für einen stärker-

ren Einfluss des Zementsteingehaltes als dies bei der Druckfestigkeit der Fall ist. Der Korrelationskoeffizient für die Abhängigkeit von ΔRB_4 ist mit $r = 0,74$ ebenfalls höher als in Bezug auf die Druckfestigkeit, liegt jedoch unter dem des Zementsteins.

Unter Berücksichtigung des Zusammenhangs zwischen ZS und ΔRB_4 , der in Gleichung A 6 dargestellt ist, kann der Einfluss von ZS und ΔRB_4 auf den dynamischen E-Modul über die folgende Regressionsgleichung dargestellt werden:

$$\hat{y} = 2.366 + 29,4 \cdot x_1 + 497 \cdot x_2. \quad \text{Gl. A 10}$$

Erwartungsgemäß wird der dynamische E-Modul, Variable \hat{y} , wesentlich stärker vom Zementsteingehalt der rezyklierten Gesteinskörnung (x_2) beeinflusst als von der Abweichung von der Regelsieblinie B 4 (x_1). Unter Berücksichtigung des Regressionskoeffizienten $b_2 = 497$ und des Mittelwertes des Zementsteingehaltes von 16,3 % – und ohne an dieser Stelle andere Einflussfaktoren zu berücksichtigen – kann der Einfluss der Kenngröße Zementstein auf den dynamischen E-Modul näherungsweise als etwa fünf mal so groß wie der Einfluss der Abweichung von der Regelsieblinie ΔRB_4 – mit $b_1 = 29,4$ und einem Mittelwert von 51,9 % – abgeschätzt werden.

Berechnet man auf der Basis der Gleichungen A 7 und A 10 die Druckfestigkeit und den dynamischen Elastizitätsmodul, so gibt es gute Übereinstimmungen mit den tatsächlich gemessenen Werten. Jedoch zeigen sich auch die unterschiedlichen Abhängigkeiten dieser beiden Baustoffeigenschaften von den untersuchten Kenngrößen. Während die berechneten Druckfestigkeiten der RC-Mörtel mit den gemessenen Werten mit einem Korrelationskoeffizienten von $r = 0,7$ gut korrelieren, gibt es eine deutliche Abweichung bei der Betrachtung des Referenzmörtels. Demgegenüber gibt es zwischen gemessenem und berechnetem dynamischen E-Modul mit $r = 0,87$ eine sehr gute Korrelation, die sich auch auf den Referenzmörtel übertragen lässt (siehe Abbildung A 10). Bei der Druckfestigkeit spielen neben dem Altzementsteingehalt und der Abweichung von der Regelsieblinie RB 4 noch weitere Faktoren eine größere Rolle als beim dynamischen Elastizitätsmodul.

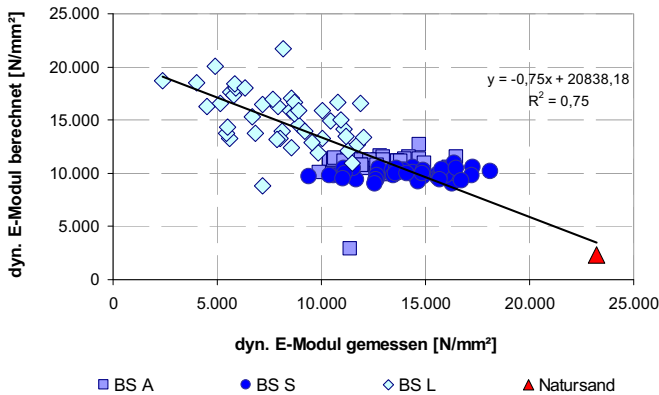


Abbildung A 10: Messwerte der dynamischen E-Moduli von RC-Mörteln im Vergleich zu den nach Gleichung A 10 berechneten Werten

Die Betrachtung der Zusammenhänge zwischen dem dynamischen Elastizitätsmodul und anderen Kenngrößen kann auch für RC-Betone über multiple Regressionen erfolgen. Wie bei den RC-Mörteln zeigte sich hier ein deutlicher Einfluss des Altzementsteingehaltes. Der Zusammenhang zwischen E-Moduli und Altzementsteingehalt sowie Druckfestigkeiten war dabei stärker als bei der Betrachtung der Kenngrößen Altzementsteingehalt und Frischbetonrohichte und dem E-Modul.

In Abbildung A 11 sind die über multiple Regression auf Basis von Altzementsteingehalten und Druckfestigkeiten berechneten E-Moduli im Vergleich zu den gemessenen E-Moduli dargestellt. Mit einem Korrelationskoeffizienten von ebenfalls $r = 0,92$ zeigten diese berechneten Werte eine ähnlich gute Übereinstimmung mit den gemessenen Werten wie die nach Gleichung 6.4 berechneten Werte. In dieser Abbildung wird nur zwischen RC-Gesteinskörnung und natürlicher Gesteinskörnung unterschieden. Auch hier zeigen die Messwerte von Referenzbetonen und RC-Betonen in Bezug auf den dynamischen Elastizitätsmodul eine sehr gute Übereinstimmung mit der ermittelten Regression.

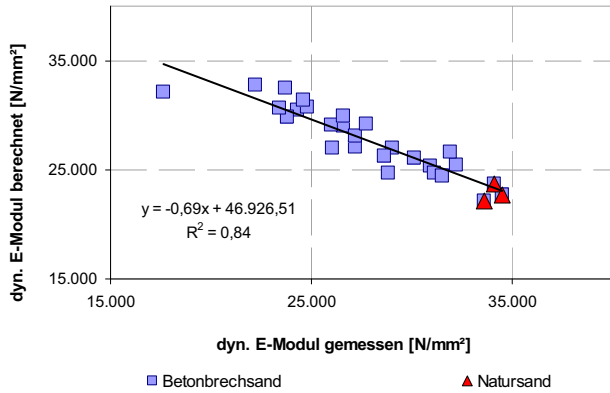


Abbildung A 11: Messwerte der dynamischen E-Moduli von Betonen im Vergleich zu den nach Gleichung A 11 berechneten Werten

Anhang 5: Versuchsübersichten

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (1)

| Versuchsnummer: | BS_01 | BS_03 | BS_05 | BS_07 | BS_08 | BS_09 | BS_10 | BS_11 | BS_12 | BS_13 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 1000 | 1000 | 629 | 94 | 629 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzбетhöhe/Schichtdicke [mm] | 92 | 86 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 | 82 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 166 | 175 | 174 | 174 | 174 | 174 | 215 | 62 | 115 | 115 |
| Druckluftzufuhr [U] | 6 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 4 | 8 | 4 | 6 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | 7,40 | 7,10 | 7,60 | 6,50 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 59,50 | 65,70 | 74,80 | 68,30 | 71,60 | 71,80 | 67,00 | 65,10 | 66,37 | 70,42 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 30,80 | 25,70 | 14,20 | 20,60 | 15,60 | 16,10 | 21,90 | 22,40 | 21,77 | 18,39 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 9,70 | 8,60 | 11,00 | 11,10 | 12,80 | 12,10 | 11,10 | 12,50 | 11,86 | 11,19 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 798,0 | 429,4 | 813,5 | 593,0 | 601,0 | 650,7 | 680,0 | 650,0 | 647,0 | 630,0 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 8,67 | 7,95 | 9,18 | 8,89 | 9,27 | 6,14 | 7,20 | 8,38 | 7,76 | 7,20 |
| Schwergut [%] | 6,56 | 10,00 | 8,40 | 10,15 | 11,51 | 9,44 | 9,67 | 10,46 | 10,32 | 9,38 |
| Leichtgut [%] | 25,73 | 23,66 | 29,89 | 28,30 | 29,75 | 27,05 | 28,62 | 29,40 | 30,30 | 30,10 |
| Feinstgut [%] | 37,23 | 36,50 | 34,04 | 30,95 | 32,47 | 33,81 | 34,50 | 35,20 | 32,40 | 30,94 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 19,57 | 19,97 | 26,15 | 23,37 | 19,93 | 22,92 | 21,07 | 22,55 | 23,59 | 22,20 |
| Schwergut [% TS] | 16,00 | 17,04 | 17,04 | 15,20 | 13,63 | 16,51 | 15,33 | 15,22 | 15,53 | 15,49 |
| Leichtgut [% TS] | 21,49 | 27,79 | 29,77 | 28,42 | 25,50 | 30,15 | 32,07 | 23,71 | 24,15 | 26,39 |
| Feinfraktion [% TS] | 51,65 | 47,91 | 44,30 | 41,61 | 37,64 | 40,10 | 43,25 | 36,21 | 39,12 | 42,05 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -18,24 | -14,67 | -34,84 | -34,96 | -31,61 | -27,97 | -27,24 | -32,51 | -34,17 | -30,23 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,83 | 0,69 | 1,01 | 0,79 | 0,97 | 0,97 | 0,78 | 1,08 | 0,80 | 0,89 |
| 2000-4000 µm | 19,05 | 18,43 | 21,57 | 19,57 | 23,92 | 19,50 | 21,48 | 19,89 | 20,25 | 20,28 |
| 1000-2000 µm | 23,36 | 23,51 | 23,38 | 24,30 | 24,20 | 23,67 | 23,73 | 23,77 | 23,18 | 23,84 |
| 500-1000 µm | 22,44 | 23,04 | 21,65 | 21,72 | 20,66 | 21,22 | 20,85 | 22,14 | 21,91 | 21,42 |
| 250-500 µm | 16,75 | 16,63 | 15,69 | 16,69 | 14,76 | 16,24 | 15,55 | 16,96 | 17,13 | 16,93 |
| 125-250 µm | | 9,43 | 9,17 | 9,71 | 8,52 | 9,72 | 9,47 | 9,25 | 10,20 | 9,81 |
| 100-125 µm | 9,79 | 1,87 | 1,98 | 2,08 | 1,94 | 2,23 | 2,19 | 1,81 | 2,46 | 1,97 |
| 63-100 µm | 4,11 | 2,50 | 2,45 | 2,39 | 2,23 | 2,88 | 2,74 | 2,27 | 2,41 | 2,31 |
| < 63 µm | 3,67 | 3,90 | 3,10 | 2,75 | 2,80 | 3,56 | 3,19 | 2,83 | 1,67 | 2,55 |
| Δ RB _x (%) Aufgabegut | 10,17 | 10,90 | 11,25 | 11,17 | 13,00 | 11,00 | 11,76 | 10,37 | 9,62 | 10,47 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,05 | 0,42 | 0,18 | 0,09 | 0,05 | 0,17 | 0,04 | 0,08 | 0,10 | 0,12 |
| 2000-4000 µm | 29,17 | 21,85 | 26,74 | 21,25 | 20,10 | 28,84 | 22,71 | 19,65 | 20,68 | 20,20 |
| 1000-2000 µm | 40,43 | 31,83 | 32,16 | 35,80 | 33,91 | 34,56 | 36,55 | 36,37 | 36,54 | 34,22 |
| 500-1000 µm | 25,33 | 27,88 | 25,75 | 29,04 | 29,35 | 23,98 | 28,05 | 28,40 | 29,18 | 29,87 |
| 250-500 µm | 4,52 | 14,21 | 12,23 | 11,86 | 13,99 | 10,33 | 11,02 | 12,20 | 11,44 | 14,61 |
| 125-250 µm | 0,36 | 3,24 | 2,46 | 1,67 | 2,20 | 1,84 | 1,31 | 2,89 | 1,68 | 0,68 |
| 100-125 µm | | 0,18 | 0,03 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02 | 0,05 | 0,07 | 0,05 |
| 63-100 µm | 0,06 | 0,12 | 0,23 | 0,12 | 0,19 | 0,13 | 0,12 | 0,19 | 0,13 | 0,08 |
| < 63 µm | 0,09 | 0,25 | 0,21 | 0,12 | 0,16 | 0,11 | 0,18 | 0,17 | 0,19 | 0,16 |
| Δ RB _x (%) Schwergut | 75,46 | 42,20 | 50,08 | 52,16 | 46,89 | 60,20 | 54,41 | 49,71 | 53,11 | 49,82 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,02 | 0,04 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2000-4000 µm | 7,19 | 7,58 | 1,27 | 2,72 | 1,73 | 2,25 | 1,63 | 0,54 | 1,22 | 0,66 |
| 1000-2000 µm | 8,12 | 16,72 | 5,12 | 8,12 | 6,49 | 7,88 | 7,39 | 3,39 | 5,02 | 3,52 |
| 500-1000 µm | 21,93 | 20,98 | 16,94 | 20,68 | 18,21 | 21,30 | 22,15 | 25,12 | 22,49 | 17,14 |
| 250-500 µm | 36,08 | 27,76 | 38,36 | 41,13 | 40,61 | 41,24 | 40,24 | 44,64 | 44,33 | 45,81 |
| 125-250 µm | 21,97 | 20,69 | 31,61 | 23,85 | 29,19 | 24,17 | 25,39 | 23,64 | 24,64 | 29,54 |
| 100-125 µm | n.b. | 2,33 | 2,76 | 1,09 | 1,32 | 0,92 | 1,03 | 0,97 | 0,65 | 1,25 |
| 63-100 µm | 3,35 | 2,41 | 2,18 | 1,27 | 1,33 | 1,20 | 1,23 | 0,77 | 0,83 | 0,96 |
| < 63 µm | 1,34 | 1,50 | 1,74 | 1,13 | 1,12 | 1,04 | 0,95 | 0,93 | 0,81 | 1,12 |
| Δ RB _x (%) Leichtgut | 84,72 | 67,55 | 125,11 | 100,09 | 114,44 | 101,38 | 104,68 | 110,65 | 108,58 | 124,57 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (2)

| Versuchsnummer: | BS 14 | BS 15 | BS 16 | BS 17 | BS 19 | BS 18 | BS 20 | BS 21 | BS 22 | BS 23 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 94 | 629 | 629 | 629 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 82 | 82 | 110 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 217 | 60 | 60 | 60 | 40 | 60 | 40 | 40 | 40 | 69 |
| Druckluftzufuhr [U] | 6 | 6 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 9 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 6,80 | 6,80 | 7,90 | 7,30 | 5,30 | 5,30 | 20,50 | 9,20 | 9,40 | 6,60 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 70,34 | 64,32 | 75,65 | 64,86 | 54,87 | 67,86 | 56,11 | 47,43 | 63,81 | 78,15 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 17,34 | 22,67 | 11,50 | 22,88 | 34,74 | 21,06 | 34,19 | 39,24 | 25,03 | 10,58 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 12,32 | 13,01 | 12,86 | 12,26 | 10,39 | 11,08 | 9,70 | 13,33 | 11,16 | 11,27 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 578,3 | 643,0 | 650,5 | 605,0 | 610,9 | 610,2 | 636,4 | 621,3 | 679,9 | 663,6 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 7,20 | 6,74 | n.b. | 8,45 | 9,59 | 9,13 | 9,12 | 7,33 | 7,33 | n.b. |
| Schwergut [%] | 11,37 | 10,99 | n.b. | 13,49 | 12,73 | 12,65 | 10,40 | 12,43 | 9,64 | n.b. |
| Leichtgut [%] | 28,96 | 24,33 | n.b. | 26,05 | 24,15 | 27,01 | 16,63 | 24,45 | 24,51 | n.b. |
| Feinstgut [%] | 32,97 | 31,57 | n.b. | 32,79 | 32,96 | 35,11 | 31,97 | 35,29 | 33,95 | n.b. |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 22,20 | 21,86 | n.b. | 22,34 | 21,58 | 21,47 | 21,50 | 23,01 | 23,01 | 22,70 |
| Schwergut [% TS] | 16,14 | 15,75 | n.b. | 15,46 | 17,84 | 16,90 | 18,84 | 14,49 | 15,56 | 16,80 |
| Leichtgut [% TS] | 24,81 | 22,15 | n.b. | 23,56 | 22,98 | 27,31 | 21,15 | 22,29 | 27,55 | 26,13 |
| Feinfraktion [% TS] | 43,37 | 40,09 | n.b. | 36,67 | 43,30 | 43,87 | 37,07 | 45,25 | 45,96 | n.b. |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -27,30 | -27,95 | | -30,80 | -17,33 | -21,29 | -12,37 | -37,03 | -32,38 | -25,99 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,89 | 0,60 | 0,81 | 0,48 | 0,94 | 0,84 | 1,00 | 0,78 | 0,78 | n.b. |
| 2000-4000 µm | 20,28 | 19,72 | 20,88 | 20,35 | 20,50 | 21,33 | 18,50 | 18,13 | 18,13 | 25,12 |
| 1000-2000 µm | 23,84 | 24,89 | 23,86 | 24,51 | 24,55 | 23,23 | 22,70 | 23,43 | 23,43 | 27,37 |
| 500-1000 µm | 21,42 | 22,48 | 21,55 | 22,32 | 22,01 | 20,42 | 22,34 | 22,36 | 22,36 | 20,79 |
| 250-500 µm | 16,93 | 16,71 | 16,31 | 16,76 | 16,57 | 16,08 | 17,41 | 17,24 | 17,24 | 14,05 |
| 125-250 µm | 9,81 | 9,11 | 9,04 | 8,90 | 8,98 | 9,92 | 10,11 | 9,76 | 9,76 | n.b. |
| 100-125 µm | 1,97 | 1,66 | 1,93 | 1,82 | 1,89 | 2,24 | 2,05 | 2,03 | 2,03 | 8,26 |
| 63-100 µm | 2,31 | 2,20 | 2,44 | 2,26 | 2,03 | 2,98 | 2,82 | 2,67 | 2,67 | 4,41 |
| < 63 µm | 2,55 | 2,64 | 3,16 | 2,61 | 2,53 | 2,96 | 3,06 | 3,59 | 3,59 | n.b. |
| Δ RB _x (%) Aufgabegut | 10,47 | 11,75 | 11,13 | 11,32 | 11,54 | 10,71 | 10,16 | 10,78 | 10,78 | 20,36 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,05 | 0,09 | 0,15 | 0,07 | 0,20 | 0,04 | 0,07 | 0,06 | 0,12 | n.b. |
| 2000-4000 µm | 19,64 | 21,78 | 23,39 | 21,88 | 29,25 | 23,36 | 28,43 | 26,98 | 25,00 | 22,90 |
| 1000-2000 µm | 35,97 | 35,11 | 30,79 | 32,78 | 33,64 | 34,74 | 29,37 | 40,25 | 31,63 | 29,33 |
| 500-1000 µm | 28,97 | 26,41 | 24,21 | 25,34 | 20,15 | 24,10 | 19,07 | 21,69 | 24,63 | 24,71 |
| 250-500 µm | 13,20 | 12,83 | 15,58 | 15,15 | 10,56 | 13,11 | 13,08 | 8,31 | 13,71 | 15,99 |
| 125-250 µm | 1,88 | 3,34 | 5,24 | 4,20 | 4,90 | 4,04 | 7,82 | 2,33 | 4,30 | 6,66 |
| 100-125 µm | 0,02 | 0,15 | 0,25 | 0,19 | 0,66 | 0,26 | 1,33 | 0,19 | 0,29 | 0,32 |
| 63-100 µm | 0,13 | 0,10 | 0,19 | 0,14 | 0,33 | 0,13 | 0,39 | 0,08 | 0,16 | n.b. |
| < 63 µm | 0,14 | 0,19 | 0,21 | 0,24 | 0,31 | 0,23 | 0,43 | 0,11 | 0,16 | n.b. |
| Δ RB _x (%) Schwergut | 50,57 | 46,86 | 35,58 | 40,24 | 51,72 | 44,46 | 35,52 | 62,74 | 40,48 | 31,61 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,02 | 0,03 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | n.b. |
| 2000-4000 µm | 1,05 | 1,21 | 2,27 | 4,62 | 6,28 | 1,94 | 7,36 | 4,80 | 6,10 | 4,37 |
| 1000-2000 µm | 5,21 | 8,56 | 12,12 | 18,99 | 22,78 | 15,46 | 25,59 | 17,07 | 17,57 | 13,85 |
| 500-1000 µm | 17,31 | 31,44 | 25,79 | 30,69 | 31,72 | 30,76 | 31,78 | 31,99 | 26,35 | 29,80 |
| 250-500 µm | 43,83 | 38,04 | 34,67 | 29,21 | 25,06 | 30,64 | 23,29 | 29,44 | 28,67 | 33,59 |
| 125-250 µm | 29,13 | 18,10 | 21,69 | 14,37 | 10,48 | 16,65 | 9,24 | 12,84 | 16,29 | 16,49 |
| 100-125 µm | 1,14 | 0,61 | 1,09 | 0,61 | 1,19 | 1,51 | 0,87 | 1,30 | 1,67 | 1,91 |
| 63-100 µm | 1,05 | 1,02 | 0,98 | 0,52 | 1,35 | 1,52 | 1,18 | 1,38 | 1,84 | n.b. |
| < 63 µm | 1,28 | 1,04 | 1,39 | 0,99 | 1,10 | 1,51 | 0,69 | 1,19 | 1,52 | n.b. |
| Δ RB _x (%) Leichtgut | 119,58 | 86,52 | 86,17 | 51,84 | 36,09 | 71,53 | 30,30 | 54,08 | 59,43 | 65,69 |

n.a.: nicht auswertbar

n.b.: nicht bestimmt

kursiv: Wert ging nicht in alle Auswertungen ein

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (3)

| Versuchsnummer: | BS_24 | BS_25 | BS_26 | BS_27 | BS_28 | BS_29 | BS_31 | BS_32 | BS_33 | BS_34 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 629 | 629 | 96 | 629 | 625 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 313 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | n.b. | n.b. | n.b. | 45,38 | 37,62 | 42,70 | 31,64 | 37,69 | 39,33 | 33,25 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 82 | 115 | 115 | 82 | 82 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 69 | 69 | 69 | 69 | 69 | 62 | 60 | 60 | 115 | 60 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 6 | 7,75 | 7,75 | 4 | 6 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 15 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 6,60 | 6,60 | 28,80 | 21,75 | 7,10 | 7,53 | 3,60 | 7,20 | 9,50 | 109,74 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 72,66 | 73,70 | 70,00 | 79,65 | 69,89 | 73,60 | 78,45 | 79,25 | 72,54 | 61,04 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 16,07 | 15,03 | 22,31 | 12,24 | 22,13 | 15,76 | 16,64 | 10,66 | 13,45 | 28,10 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 11,27 | 11,27 | 7,69 | 8,11 | 7,98 | 10,64 | 4,91 | 10,08 | 14,00 | 10,85 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 642,2 | 639,1 | 631,9 | 649,7 | 591,0 | 620,7 | 836,84 ? | 628,0 | 557,9 | 584,5 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | n.b. | n.b. | 7,20 | 8,29 | 8,02 | 6,78 | 8,39 | 7,85 | 8,97 | 7,08 |
| Schwergut [%] | n.b. | n.b. | 11,82 | 11,44 | 13,35 | 10,41 | 12,86 | 11,07 | 12,67 | 12,61 |
| Leichtgut [%] | n.b. | n.b. | 30,51 | 33,37 | 28,44 | 30,04 | 33,61 | 35,50 | 31,01 | 24,51 |
| Feinstgut [%] | n.b. | n.b. | 35,66 | 35,04 | 35,92 | 34,38 | 43,67 | 35,48 | 35,01 | 35,98 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 22,52 | 22,23 | 22,51 | 22,64 | 21,80 | 22,87 | 23,64 | 22,20 | 21,86 | 22,18 |
| Schwergut [% TS] | 17,01 | 16,35 | 16,60 | 17,47 | 16,32 | 15,53 | 16,19 | 16,08 | 15,53 | 15,52 |
| Leichtgut [% TS] | 29,91 | 27,92 | 25,15 | 29,59 | 28,07 | 30,18 | 37,02 | 31,43 | 33,43 | 23,75 |
| Feinfraktion [% TS] | n.b. | n.b. | 48,99 | n.b. | 45,14 | 41,53 | 51,03 | 49,25 | 44,08 | 42,39 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -24,47 | -26,45 | -26,25 | -22,84 | -25,14 | -32,09 | -31,51 | -27,57 | -28,96 | -30,03 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | n.b. | n.b. | 1,11 | 0,80 | 0,74 | 0,66 | 0,80 | 1,17 | 1,10 | 1,09 |
| 2000-4000 µm | 21,44 | 23,50 | 20,48 | 21,49 | 18,82 | 20,07 | 19,47 | 23,91 | 23,62 | 21,35 |
| 1000-2000 µm | 23,63 | 24,79 | 23,42 | 24,20 | 24,26 | 24,18 | 23,40 | 25,59 | 24,89 | 23,29 |
| 500-1000 µm | 21,54 | 20,93 | 20,80 | 21,46 | 23,05 | 22,32 | 22,07 | 20,83 | 20,51 | 20,70 |
| 250-500 µm | 16,68 | 15,38 | 16,20 | 16,04 | 17,31 | 16,51 | 16,93 | 14,27 | 14,90 | 16,02 |
| 125-250 µm | n.b. | n.b. | 9,49 | 8,70 | 9,01 | 8,82 | 9,45 | 7,83 | 8,46 | 9,22 |
| 100-125 µm | 10,74 | 9,81 | 2,07 | 1,72 | 1,58 | 1,76 | 1,87 | 1,68 | 1,69 | 1,59 |
| 63-100 µm | 5,98 | 5,61 | 2,84 | 2,46 | 2,13 | 2,37 | 2,63 | 2,09 | 2,16 | 3,17 |
| < 63 µm | n.b. | n.b. | 3,59 | 3,14 | 3,10 | 3,30 | 3,38 | 2,64 | 2,67 | 3,57 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 10,52 | 12,99 | 10,78 | 11,73 | 10,51 | 11,24 | 10,03 | 15,13 | 13,55 | 10,83 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | n.b. | n.b. | 0,17 | 0,11 | 0,04 | 0,16 | 0,08 | 0,07 | 0,07 | 0,18 |
| 2000-4000 µm | 23,24 | 30,70 | 30,00 | 24,93 | 22,81 | 25,13 | 20,18 | 20,42 | 23,88 | 24,61 |
| 1000-2000 µm | 27,20 | 33,83 | 32,82 | 29,96 | 36,37 | 33,09 | 31,32 | 32,61 | 33,48 | 35,12 |
| 500-1000 µm | 23,38 | 19,88 | 21,44 | 23,79 | 25,10 | 24,45 | 26,01 | 28,19 | 25,63 | 23,54 |
| 250-500 µm | 16,59 | 10,84 | 10,94 | 14,61 | 11,80 | 13,34 | 16,69 | 14,80 | 13,41 | 12,27 |
| 125-250 µm | 8,88 | 4,54 | 3,97 | 5,70 | 3,52 | 3,41 | 5,11 | 3,52 | 3,19 | 3,62 |
| 100-125 µm | 0,74 | 0,24 | 0,28 | 0,38 | 0,04 | 0,17 | 0,19 | 0,16 | 0,08 | 0,12 |
| 63-100 µm | n.b. | n.b. | 0,17 | 0,24 | 0,12 | 0,11 | 0,23 | 0,09 | 0,12 | 0,15 |
| < 63 µm | n.b. | n.b. | 0,20 | 0,28 | 0,18 | 0,15 | 0,20 | 0,14 | 0,14 | 0,18 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 23,54 | 56,94 | 55,15 | 34,37 | 49,01 | 44,78 | 35,32 | 42,13 | 45,15 | 47,06 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | n.b. | n.b. | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2000-4000 µm | 2,24 | 4,03 | 2,33 | 0,87 | 1,63 | 4,10 | 1,49 | 1,26 | 1,92 | 4,72 |
| 1000-2000 µm | 11,26 | 16,24 | 10,27 | 5,78 | 9,42 | 12,11 | 4,26 | 5,32 | 6,62 | 14,68 |
| 500-1000 µm | 29,09 | 29,55 | 29,21 | 23,99 | 30,14 | 21,77 | 17,27 | 19,53 | 21,07 | 28,66 |
| 250-500 µm | 34,18 | 29,99 | 35,97 | 40,87 | 36,50 | 35,09 | 35,79 | 40,64 | 42,58 | 32,59 |
| 125-250 µm | 19,85 | 17,49 | 18,04 | 23,59 | 17,04 | 23,45 | 29,16 | 29,32 | 25,41 | 16,17 |
| 100-125 µm | 3,40 | 2,72 | 1,25 | 1,96 | 1,75 | 1,36 | 4,70 | 1,75 | 0,94 | 0,68 |
| 63-100 µm | n.b. | n.b. | 1,34 | 1,56 | 1,81 | 1,09 | 4,75 | 1,10 | 0,66 | 1,38 |
| < 63 µm | n.b. | n.b. | 1,58 | 1,36 | 1,69 | 1,03 | 2,59 | 1,07 | 0,79 | 1,13 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 82,86 | 64,03 | 83,31 | 108,12 | 86,24 | 86,50 | 128,84 | 117,13 | 105,57 | 65,08 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (4)

| Versuchsnummer: | BS 35 | BS 36 | BS 37 | BS 38 | BS 39 | BS 40 | BS 41 | BS 42 | BS 43 | BS 44 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 313 | 311 | 626 | 1000 | 1000 | 627 | 312 | 95 | 627 | 1000 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 27,83 | 33,97 | 33,92 | 37,64 | 36,53 | 48,50 | 33,36 | 34,55 | 35,45 | 38,54 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 69 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 | 80 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 15,80 | 16,70 | 12,60 | 7,20 | 7,20 | 11,30 | 9,50 | 12,20 | 9,45 | 5,90 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 68,86 | 75,91 | 77,34 | 79,66 | 33,47 | 26,49 | 51,87 | 57,38 | 61,94 | 68,51 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 23,79 | 16,97 | 14,76 | 11,58 | 57,00 | 65,94 | 37,64 | 33,81 | 28,39 | 19,26 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 7,35 | 7,12 | 7,90 | 8,76 | 9,53 | 7,57 | 10,48 | 8,81 | 9,67 | 12,22 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 619,1 | 682,2 | 654,5 | 705,1 | 575,9 | 549,6 | 466,3 | 561,0 | 598,4 | 517,4 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 8,51 | 8,59 | 8,59 | 6,15 | 8,31 | 9,34 | 11,40 | 10,09 | 8,41 | 8,49 |
| Schwergut [%] | 12,44 | 12,07 | 10,23 | 10,54 | 17,14 | 14,07 | 13,90 | 12,71 | 13,42 | 11,36 |
| Leichtgut [%] | 26,66 | 29,25 | 26,19 | 30,19 | 14,88 | 14,34 | 25,56 | 27,95 | 26,09 | 27,16 |
| Feinstgut [%] | 36,61 | 36,50 | 36,71 | 35,38 | 39,00 | 35,96 | 35,15 | 33,73 | 34,73 | 35,10 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 23,00 | 21,73 | 22,82 | 21,46 | 19,11 | 21,50 | 19,58 | 20,75 | 23,08 | 22,37 |
| Schwergut [% TS] | 16,84 | 17,08 | 15,96 | 16,04 | 17,91 | 18,17 | 16,05 | 16,36 | 16,21 | 15,68 |
| Leichtgut [% TS] | 25,46 | 28,27 | 28,96 | 30,23 | 21,31 | 23,53 | 23,25 | 24,56 | 21,04 | 27,17 |
| Feinfraktion [% TS] | 41,54 | 43,83 | 43,60 | 41,69 | 45,51 | 34,10 | 22,91 | 40,97 | 46,05 | 39,46 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -26,78 | -21,40 | -30,06 | -25,26 | -6,28 | -15,49 | -18,03 | -21,16 | -29,77 | -29,91 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,85 | 1,10 | 1,10 | 0,87 | 0,84 | 0,93 | 0,96 | 0,71 | 1,25 | 0,79 |
| 2000-4000 µm | 18,65 | 24,47 | 24,47 | 22,34 | 21,69 | 20,58 | 18,70 | 17,18 | 19,99 | 18,55 |
| 1000-2000 µm | 22,53 | 25,36 | 25,36 | 24,90 | 26,30 | 23,95 | 23,28 | 22,83 | 23,22 | 24,66 |
| 500-1000 µm | 21,42 | 20,10 | 20,10 | 21,34 | 22,11 | 21,48 | 22,07 | 22,55 | 21,36 | 22,72 |
| 250-500 µm | 16,66 | 14,36 | 14,36 | 15,60 | 15,36 | 16,65 | 17,58 | 18,16 | 16,89 | 17,44 |
| 125-250 µm | 9,22 | 7,70 | 7,70 | 8,20 | 7,84 | 8,78 | 9,95 | 10,13 | 9,85 | 9,12 |
| 100-125 µm | 1,92 | 1,39 | 1,39 | 1,56 | 1,32 | 1,54 | 1,90 | 2,06 | 1,92 | 1,76 |
| 63-100 µm | 3,25 | 2,34 | 2,34 | 2,16 | 1,97 | 2,43 | 2,54 | 2,82 | 2,60 | 2,19 |
| < 63 µm | 5,52 | 3,19 | 3,19 | 3,04 | 2,76 | 3,67 | 3,02 | 3,57 | 3,22 | 2,78 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 12,87 | 15,69 | 15,69 | 12,87 | 15,71 | 10,87 | 9,26 | 14,60 | 9,89 | 10,79 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,17 | 0,17 | 0,14 | 0,21 | 0,12 | 0,19 | 0,09 | 0,15 | 0,19 | 0,02 |
| 2000-4000 µm | 25,25 | 23,45 | 24,33 | 21,12 | 19,74 | 26,85 | 20,91 | 23,22 | 23,90 | 17,76 |
| 1000-2000 µm | 33,21 | 34,87 | 31,55 | 30,12 | 26,62 | 26,01 | 35,94 | 36,83 | 34,48 | 32,51 |
| 500-1000 µm | 23,70 | 24,78 | 24,87 | 25,55 | 22,00 | 18,55 | 27,60 | 25,45 | 25,85 | 28,38 |
| 250-500 µm | 12,93 | 12,78 | 14,39 | 16,85 | 19,15 | 16,83 | 12,08 | 10,94 | 12,10 | 16,43 |
| 125-250 µm | 3,90 | 3,30 | 4,09 | 5,45 | 10,38 | 9,53 | 2,83 | 2,93 | 2,90 | 4,13 |
| 100-125 µm | 0,29 | 0,16 | 0,23 | 0,11 | 1,20 | 0,58 | 0,16 | 0,05 | 0,14 | 0,20 |
| 63-100 µm | 0,26 | 0,19 | 0,12 | 0,33 | 0,40 | 0,92 | 0,18 | 0,18 | 0,15 | 0,22 |
| < 63 µm | 0,28 | 0,29 | 0,27 | 0,26 | 0,40 | 0,55 | 0,20 | 0,25 | 0,28 | 0,34 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 43,83 | 46,36 | 39,89 | 33,11 | 14,86 | 22,23 | 49,27 | 51,21 | 47,59 | 38,45 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,09 | 0,04 | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,02 |
| 2000-4000 µm | 2,85 | 2,55 | 1,85 | 0,68 | 14,37 | 13,22 | 5,67 | 3,22 | 7,23 | 1,06 |
| 1000-2000 µm | 11,16 | 9,44 | 8,09 | 4,70 | 27,28 | 26,25 | 15,63 | 12,51 | 14,43 | 6,63 |
| 500-1000 µm | 26,80 | 24,68 | 22,32 | 18,70 | 26,72 | 26,88 | 27,92 | 27,77 | 24,41 | 22,97 |
| 250-500 µm | 33,80 | 35,19 | 36,39 | 38,59 | 19,74 | 20,94 | 32,96 | 35,17 | 33,45 | 41,89 |
| 125-250 µm | 19,80 | 22,16 | 25,14 | 29,51 | 8,58 | 9,54 | 15,07 | 17,83 | 17,86 | 24,03 |
| 100-125 µm | 1,73 | 1,71 | 2,23 | 3,13 | 0,91 | 0,80 | 0,77 | 0,80 | 0,89 | 1,10 |
| 63-100 µm | 2,15 | 2,60 | 2,05 | 2,77 | 1,14 | 1,16 | 0,87 | 1,31 | 0,95 | 1,17 |
| < 63 µm | 1,71 | 1,67 | 1,93 | 1,92 | 1,16 | 1,17 | 1,08 | 1,39 | 0,73 | 1,13 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 85,59 | 94,79 | 105,16 | 125,05 | 18,33 | 18,81 | 59,38 | 76,74 | 63,18 | 105,82 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (5)

| Versuchsnummer: | BS 45 | BS 46 | BS 47 | BS 49 | BS 50 | BS 51 | BS 52 | BS 53 | BS 54 | BS 55 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 1000 | 1000 | 1000 | 96 | 312 | 626 | 312 | 629 | 629 | 94 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 41,16 | 38,78 | 20,34 | 35,84 | 36,07 | 36,29 | 34,60 | 35,64 | 37,61 | 26,66 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 133 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 | 100 | 100 | 100 | 53 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,25 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 13,50 | 13,50 | 13,50 | 16,70 | 18,00 | 10,40 | 13,50 | 14,73 | 14,73 | 26,10 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 68,99 | 70,14 | 66,70 | 62,43 | 66,91 | 63,92 | 76,93 | 75,44 | 80,40 | 55,10 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 21,15 | 16,84 | 25,23 | 27,74 | 25,01 | 26,35 | 13,75 | 15,03 | 10,28 | 35,20 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 9,86 | 13,03 | 8,08 | 9,83 | 8,08 | 9,72 | 9,31 | 9,53 | 9,32 | 9,70 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 636,4 | 593,7 | 628,0 | 564,3 | 574,4 | 593,5 | 521,1 | 585,4 | 669,3 | 520,9 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 8,57 | 8,57 | 8,57 | 8,17 | 9,00 | 8,85 | 9,60 | 8,62 | 8,62 | 12,37 |
| Schwergut [%] | 11,33 | 14,74 | 12,80 | 11,69 | 11,20 | 10,03 | 12,51 | 12,67 | 9,79 | 15,09 |
| Leichtgut [%] | 27,22 | 25,11 | 26,38 | 27,22 | 24,43 | 26,84 | 32,17 | 26,17 | 35,79 | 28,51 |
| Feinstgut [%] | 36,34 | 34,71 | 35,52 | 37,21 | 38,47 | 37,47 | 37,09 | 37,63 | 36,87 | 36,88 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 22,15 | 22,15 | 22,15 | 20,39 | 20,81 | 20,24 | 19,37 | 19,55 | 19,55 | 22,43 |
| Schwergut [% TS] | 15,10 | 16,62 | 17,06 | 16,72 | 16,37 | 16,38 | 16,16 | 15,85 | 16,11 | 15,98 |
| Leichtgut [% TS] | 24,17 | 25,20 | 24,68 | 23,35 | 24,51 | 23,14 | 26,80 | 24,27 | 30,25 | 23,20 |
| Feinfraktion [% TS] | 45,94 | 39,16 | 46,31 | 39,07 | 39,25 | 40,85 | 39,52 | 37,48 | 36,77 | 37,64 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -31,83 | -24,97 | -22,98 | -18,00 | -21,34 | -19,07 | -16,57 | -18,93 | -17,60 | -28,76 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 1,02 | 1,02 | 1,02 | 0,94 | 1,11 | 0,92 | 1,23 | 1,01 | 1,01 | 0,83 |
| 2000-4000 µm | 22,81 | 22,81 | 22,81 | 26,21 | 24,48 | 19,19 | 21,26 | 21,90 | 21,90 | 18,02 |
| 1000-2000 µm | 25,02 | 25,02 | 25,02 | 24,86 | 24,55 | 23,97 | 23,93 | 24,74 | 24,74 | 23,52 |
| 500-1000 µm | 21,32 | 21,32 | 21,32 | 19,60 | 20,03 | 22,28 | 20,79 | 21,52 | 21,52 | 22,35 |
| 250-500 µm | 15,41 | 15,41 | 15,41 | 13,78 | 14,63 | 16,75 | 15,84 | 15,58 | 15,58 | 17,87 |
| 125-250 µm | 7,86 | 7,86 | 7,86 | 7,65 | 8,15 | 9,04 | 9,10 | 8,16 | 8,16 | 10,09 |
| 100-125 µm | 1,29 | 1,29 | 1,29 | 1,54 | 1,59 | 1,71 | 1,75 | 1,57 | 1,57 | 1,68 |
| 63-100 µm | 2,31 | 2,31 | 2,31 | 2,25 | 2,46 | 2,48 | 2,55 | 2,20 | 2,20 | 2,73 |
| < 63 µm | 2,96 | 2,96 | 2,96 | 3,18 | 3,00 | 3,66 | 3,54 | 3,32 | 3,32 | 2,92 |
| Δ RB _x (%) Aufgabegut | 13,17 | 13,17 | 13,17 | 18,93 | 14,66 | 10,78 | 11,66 | 12,72 | 12,72 | 10,22 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,13 | 0,23 | 0,20 | 0,20 | 0,17 | 0,11 | 0,11 | 0,04 | 0,09 | 0,05 |
| 2000-4000 µm | 24,33 | 19,84 | 23,96 | 26,99 | 26,79 | 27,50 | 17,75 | 23,21 | 23,26 | 18,33 |
| 1000-2000 µm | 33,16 | 30,07 | 33,45 | 34,05 | 34,60 | 35,57 | 30,27 | 34,27 | 31,05 | 34,31 |
| 500-1000 µm | 25,16 | 25,80 | 24,27 | 23,32 | 23,27 | 23,65 | 27,64 | 26,18 | 26,09 | 26,95 |
| 250-500 µm | 12,93 | 16,78 | 12,49 | 11,45 | 11,20 | 10,29 | 16,92 | 12,97 | 15,01 | 14,23 |
| 125-250 µm | 3,66 | 6,21 | 4,63 | 3,33 | 3,37 | 2,46 | 5,95 | 2,84 | 3,88 | 5,15 |
| 100-125 µm | 0,09 | 0,45 | 0,28 | 0,21 | 0,21 | 0,12 | 0,44 | 0,13 | 0,14 | 0,39 |
| 63-100 µm | 0,26 | 0,32 | 0,42 | 0,20 | 0,17 | 0,11 | 0,53 | 0,16 | 0,18 | 0,30 |
| < 63 µm | 0,28 | 0,30 | 0,30 | 0,26 | 0,21 | 0,18 | 0,39 | 0,20 | 0,28 | 0,30 |
| Δ RB _x (%) Schwergut | 43,79 | 30,87 | 41,84 | 51,11 | 51,57 | 56,93 | 30,87 | 46,78 | 39,24 | 39,95 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,02 | 0,00 | 0,05 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,03 | 0,00 | 0,02 |
| 2000-4000 µm | 3,07 | 7,39 | 3,82 | 4,96 | 6,11 | 3,62 | 1,00 | 8,50 | 1,42 | 7,66 |
| 1000-2000 µm | 11,61 | 16,47 | 12,09 | 12,76 | 15,91 | 12,53 | 6,40 | 12,57 | 4,97 | 17,93 |
| 500-1000 µm | 26,45 | 23,78 | 27,25 | 25,70 | 28,14 | 27,61 | 23,07 | 19,80 | 17,85 | 24,98 |
| 250-500 µm | 36,86 | 31,43 | 36,63 | 34,53 | 31,42 | 35,04 | 41,28 | 34,97 | 41,76 | 29,38 |
| 125-250 µm | 18,77 | 17,93 | 17,92 | 18,65 | 15,37 | 18,02 | 24,36 | 21,23 | 30,14 | 16,55 |
| 100-125 µm | 1,07 | 0,87 | 0,65 | 1,02 | 0,78 | 0,84 | 0,91 | 0,94 | 1,27 | 0,94 |
| 63-100 µm | 1,18 | 1,14 | 0,84 | 1,19 | 1,16 | 1,29 | 1,43 | 0,86 | 1,47 | 1,58 |
| < 63 µm | 0,97 | 0,98 | 0,75 | 1,18 | 1,11 | 1,05 | 1,56 | 1,10 | 1,11 | 0,95 |
| Δ RB _x (%) Leichtgut | 80,91 | 59,87 | 74,98 | 73,78 | 58,00 | 75,53 | 107,29 | 71,46 | 119,78 | 53,98 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (6)

| Versuchsnummer: | BS 56 | BS 58 | BS 59 | BS 60 | BS 61 | BS 62 | BS 63 | BS 64 | BS 65 | BS 66 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 629 | 629 | 629 | 628 | 628 | 628 | 628 | 94 | 94 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 35,80 | 53,88 | 32,43 | 34,93 | 29,42 | 30,12 | 31,52 | 36,10 | 31,21 | 32,18 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 133 | 121 | 125 | 125 | 128 | 131 | 124 | 127 | 127 | 130 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 216 | 69 | 69 | 115 | 183 | 215 | 53 | 53 | 115 | 115 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 16,65 | 28,40 | 13,50 | 16,65 | 13,95 | 13,95 | 18,45 | 18,45 | 21,32 | 21,32 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 65,50 | 87,18 | 79,35 | 83,14 | 80,73 | 76,65 | 80,92 | 63,03 | 77,33 | 62,45 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 26,22 | 7,42 | 16,05 | 10,81 | 14,39 | 17,48 | 11,32 | 26,23 | 16,95 | 30,74 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 8,28 | 5,40 | 4,60 | 6,05 | 4,88 | 5,87 | 7,76 | 10,74 | 5,73 | 6,81 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 588,8 | 588,2 | 617,7 | 618,6 | 555,8 | 540,6 | 589,9 | 604,9 | 544,4 | 553,0 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 9,33 | 8,53 | 8,92 | 9,19 | 10,82 | 9,33 | 8,73 | 8,73 | 8,19 | 10,35 |
| Schwergut [%] | 12,52 | 14,61 | 12,74 | 13,43 | 15,45 | 15,44 | 15,34 | 14,51 | 13,80 | 14,57 |
| Leichtgut [%] | 30,18 | 39,70 | 32,14 | 39,92 | 38,48 | 36,68 | 32,77 | 28,10 | 37,08 | 28,67 |
| Feinstgut [%] | 36,78 | 40,89 | 41,99 | 42,91 | 42,32 | 41,82 | 34,90 | 30,62 | 42,83 | 42,71 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 19,35 | 20,81 | 19,99 | 20,12 | 19,32 | 19,43 | 19,55 | 19,55 | 21,45 | 19,04 |
| Schwergut [% TS] | 16,84 | 18,30 | 17,54 | 15,28 | 17,74 | 16,23 | 15,49 | 15,94 | 16,07 | 15,98 |
| Leichtgut [% TS] | 25,30 | 39,87 | 27,60 | 36,44 | 33,19 | 32,84 | 30,91 | 25,71 | 31,86 | 24,50 |
| Feinfraktion [% TS] | 40,25 | 44,41 | 42,80 | 42,74 | 45,21 | 46,08 | 37,77 | 33,77 | 42,78 | 41,80 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -12,97 | -12,06 | -12,26 | -24,06 | -8,18 | -16,47 | -20,77 | -18,47 | -25,08 | -16,07 |
| Siebgangen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,85 | 0,88 | 0,93 | 0,71 | 0,90 | 0,89 | 0,58 | 0,58 | 1,00 | 1,01 |
| 2000-4000 µm | 18,21 | 18,54 | 21,52 | 18,91 | 19,48 | 21,56 | 17,15 | 17,15 | 22,10 | 20,91 |
| 1000-2000 µm | 23,56 | 23,28 | 23,84 | 23,94 | 23,78 | 25,01 | 22,71 | 22,71 | 24,09 | 24,06 |
| 500-1000 µm | 22,45 | 21,92 | 21,38 | 22,16 | 21,83 | 21,66 | 22,52 | 22,52 | 23,54 | 21,77 |
| 250-500 µm | 17,77 | 16,86 | 16,37 | 16,97 | 17,17 | 15,65 | 18,46 | 18,46 | 15,25 | 16,89 |
| 125-250 µm | 9,86 | 9,66 | 9,01 | 9,61 | 9,65 | 8,21 | 10,12 | 10,12 | 7,50 | 9,41 |
| 100-125 µm | 1,52 | 1,74 | 1,83 | 1,63 | 1,94 | 1,58 | 2,00 | 2,00 | 1,12 | 1,75 |
| 63-100 µm | 2,82 | 3,05 | 2,45 | 3,04 | 2,65 | 2,37 | 2,96 | 2,96 | 2,34 | 2,30 |
| < 63 µm | 2,95 | 4,08 | 2,68 | 3,04 | 2,61 | 3,08 | 3,49 | 3,49 | 3,05 | 1,90 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 9,82 | 10,33 | 11,04 | 10,54 | 10,18 | 12,93 | 15,28 | 15,28 | 12,97 | 10,73 |
| Siebgangen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,16 | 0,17 | 0,09 | 0,08 | 0,08 | 0,15 | 0,01 | 0,04 | 0,07 | 0,11 |
| 2000-4000 µm | 19,58 | 22,26 | 18,83 | 15,07 | 21,20 | 22,17 | 18,59 | 24,41 | 21,06 | 23,54 |
| 1000-2000 µm | 29,93 | 29,75 | 32,61 | 26,93 | 32,22 | 31,04 | 31,45 | 34,91 | 30,19 | 31,49 |
| 500-1000 µm | 27,13 | 24,60 | 28,21 | 28,35 | 26,04 | 26,14 | 26,79 | 23,91 | 25,53 | 23,12 |
| 250-500 µm | 17,42 | 16,00 | 15,05 | 20,82 | 15,22 | 15,50 | 16,54 | 11,69 | 16,70 | 15,41 |
| 125-250 µm | 4,93 | 6,08 | 4,18 | 7,74 | 4,45 | 4,34 | 5,67 | 4,10 | 5,56 | 5,48 |
| 100-125 µm | 0,22 | 0,39 | 0,17 | 0,30 | 0,09 | 0,12 | 0,37 | 0,37 | 0,17 | 0,13 |
| 63-100 µm | 0,28 | 0,41 | 0,46 | 0,39 | 0,36 | 0,26 | 0,22 | 0,27 | 0,36 | 0,39 |
| < 63 µm | 0,34 | 0,34 | 0,40 | 0,32 | 0,34 | 0,28 | 0,36 | 0,31 | 0,36 | 0,32 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 33,12 | 31,45 | 39,28 | 22,31 | 38,66 | 37,68 | 33,81 | 45,27 | 32,73 | 35,59 |
| Leichtgut / Siebgangen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,02 | 0,00 | 0,03 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2000-4000 µm | 7,74 | 0,18 | 11,55 | 1,08 | 2,15 | 3,11 | 0,22 | 3,76 | 1,25 | 4,28 |
| 1000-2000 µm | 18,01 | 0,86 | 12,68 | 2,55 | 5,85 | 8,16 | 2,66 | 8,39 | 6,91 | 16,30 |
| 500-1000 µm | 22,96 | 7,33 | 14,48 | 11,84 | 13,93 | 14,56 | 15,29 | 22,36 | 17,38 | 27,39 |
| 250-500 µm | 27,61 | 25,58 | 23,18 | 25,69 | 28,71 | 26,79 | 32,29 | 31,55 | 26,51 | 24,94 |
| 125-250 µm | 19,63 | 40,61 | 24,83 | 35,51 | 31,60 | 30,28 | 31,67 | 22,30 | 30,45 | 17,75 |
| 100-125 µm | 1,61 | 13,73 | 6,83 | 11,79 | 9,18 | 8,50 | 8,41 | 5,04 | 8,98 | 4,19 |
| 63-100 µm | 1,46 | 9,30 | 4,88 | 8,99 | 6,95 | 6,89 | 7,46 | 4,49 | 6,50 | 3,54 |
| < 63 µm | 0,98 | 2,42 | 1,53 | 2,52 | 1,63 | 1,72 | 2,00 | 2,10 | 2,02 | 1,61 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 59,36 | 174,37 | 81,33 | 156,42 | 135,14 | 125,08 | 146,13 | 101,35 | 130,86 | 72,12 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (7)

| Versuchsnummer: | BS 67 | BS 68 | BS 69 | BS 70 | BS 71 | BS 72 | BS 73 | BS 74 | BS 75 | BS 76 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 628 | 628 | 628 | 628 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 31,41 | 32,16 | 33,35 | 31,29 | 31,60 | 32,75 | 34,84 | 32,92 | 22,67 | 30,60 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 122 | 122 | 125 | 128 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,5 | 7,0 | 8,3 | 6,5 | 6,0 | 5,0 | 6,0 | 4,0 | 5,0 | 4,0 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 19,08 | 19,08 | 21,93 | 21,93 | 45,35 | 45,35 | 10,29 | 10,29 | 9,28 | 9,28 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 75,84 | 76,04 | 72,97 | 80,21 | 74,67 | 80,48 | 77,38 | 87,26 | 80,00 | 75,34 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 18,61 | 17,64 | 21,72 | 14,11 | 19,77 | 14,16 | 17,69 | 7,53 | 15,09 | 19,27 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 5,55 | 6,33 | 5,30 | 5,68 | 5,55 | 5,36 | 4,93 | 5,21 | 4,91 | 5,40 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 584,4 | 525,0 | 569,1 | 574,6 | 585,9 | 595,1 | 592,2 | 564,4 | 531,3 | 547,1 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 11,75 | 8,03 | 8,42 | 9,05 | 9,07 | 9,07 | 9,09 | 9,09 | 10,63 | 10,34 |
| Schwergut [%] | 13,89 | 13,01 | 14,22 | 12,54 | 11,99 | 12,61 | 14,19 | 15,36 | 15,83 | 14,93 |
| Leichtgut [%] | 33,92 | 35,10 | 32,17 | 35,18 | 30,57 | 36,39 | 31,85 | 40,76 | 39,11 | 33,70 |
| Feinstgut [%] | 41,94 | 40,75 | 42,53 | 42,42 | 42,90 | 43,41 | 42,28 | 42,43 | 42,87 | 41,39 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 22,08 | 23,13 | 20,41 | 22,05 | 19,50 | 23,36 | 22,53 | 22,53 | 21,64 | 19,82 |
| Schwergut [% TS] | 15,06 | 17,26 | 15,31 | 16,83 | 15,63 | 16,16 | 17,77 | 18,19 | 16,94 | 15,86 |
| Leichtgut [% TS] | 31,22 | 31,90 | 30,29 | 32,40 | 26,35 | 30,67 | 26,49 | 30,17 | 36,43 | 33,95 |
| Feinfraktion [% TS] | 43,55 | 43,00 | 44,42 | 44,14 | 44,52 | 44,76 | 41,67 | 41,98 | 51,87 | 51,87 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -31,79 | -25,38 | -24,99 | -23,67 | -19,85 | -30,82 | -21,13 | -19,26 | -21,72 | -19,98 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 1,00 | 0,94 | 0,87 | 0,94 | 0,94 | 0,94 | 0,61 | 0,61 | 1,35 | 0,82 |
| 2000-4000 µm | 23,02 | 20,50 | 20,49 | 22,75 | 20,59 | 20,59 | 17,58 | 17,58 | 19,86 | 20,66 |
| 1000-2000 µm | 24,31 | 23,48 | 23,26 | 26,97 | 24,33 | 24,33 | 23,49 | 23,49 | 24,05 | 24,66 |
| 500-1000 µm | 20,63 | 21,94 | 21,73 | 22,08 | 22,17 | 22,17 | 22,79 | 22,79 | 21,88 | 21,93 |
| 250-500 µm | 15,42 | 16,49 | 16,88 | 14,80 | 16,54 | 16,54 | 18,38 | 18,38 | 16,86 | 16,20 |
| 125-250 µm | 8,67 | 8,74 | 9,10 | 7,08 | 8,23 | 8,23 | 10,22 | 10,22 | 8,87 | 8,61 |
| 100-125 µm | 1,40 | 1,33 | 1,86 | 1,19 | 1,37 | 1,37 | 1,79 | 1,79 | 1,74 | 1,34 |
| 63-100 µm | 2,72 | 2,87 | 2,64 | 1,75 | 2,57 | 2,57 | 2,39 | 2,39 | 2,38 | 2,74 |
| < 63 µm | 2,83 | 3,72 | 3,17 | 2,43 | 3,26 | 3,26 | 2,76 | 2,76 | 3,01 | 3,04 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 12,46 | 10,55 | 9,94 | 19,42 | 11,35 | 11,35 | 11,06 | 11,06 | 10,75 | 12,02 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,17 | 0,21 | 0,11 | 0,03 | 0,05 | 0,03 | 0,04 | 0,05 | 0,04 | 0,01 |
| 2000-4000 µm | 22,23 | 20,88 | 19,22 | 18,57 | 17,03 | 23,70 | 19,45 | 17,26 | 17,25 | 20,19 |
| 1000-2000 µm | 31,64 | 29,99 | 29,66 | 29,10 | 30,78 | 31,30 | 29,03 | 26,81 | 27,83 | 31,89 |
| 500-1000 µm | 25,04 | 25,91 | 26,60 | 26,44 | 28,60 | 25,08 | 25,92 | 25,78 | 27,72 | 25,91 |
| 250-500 µm | 15,09 | 16,68 | 17,88 | 18,05 | 17,72 | 14,91 | 17,41 | 20,06 | 18,75 | 16,05 |
| 125-250 µm | 5,00 | 5,53 | 5,64 | 6,47 | 4,98 | 4,25 | 6,67 | 8,33 | 7,10 | 4,95 |
| 100-125 µm | 0,18 | 0,26 | 0,27 | 0,27 | 0,25 | 0,19 | 0,42 | 0,50 | 0,45 | 0,18 |
| 63-100 µm | 0,35 | 0,25 | 0,26 | 0,76 | 0,27 | 0,23 | 0,56 | 0,58 | 0,41 | 0,40 |
| < 63 µm | 0,28 | 0,28 | 0,36 | 0,33 | 0,31 | 0,29 | 0,50 | 0,62 | 0,46 | 0,42 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 37,05 | 32,80 | 30,86 | 27,55 | 33,59 | 38,63 | 27,46 | 18,84 | 24,39 | 36,08 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,00 | 0,02 |
| 2000-4000 µm | 2,37 | 2,59 | 4,02 | 1,38 | 5,66 | 1,10 | 3,64 | 0,27 | 1,00 | 3,95 |
| 1000-2000 µm | 9,55 | 8,86 | 11,29 | 7,03 | 15,87 | 4,67 | 12,31 | 1,25 | 3,92 | 11,05 |
| 500-1000 µm | 19,74 | 17,58 | 18,62 | 16,25 | 22,01 | 12,96 | 22,78 | 6,25 | 12,16 | 19,97 |
| 250-500 µm | 27,09 | 27,11 | 26,72 | 26,91 | 24,65 | 31,12 | 28,04 | 21,95 | 26,00 | 26,42 |
| 125-250 µm | 26,89 | 28,43 | 25,56 | 29,99 | 20,15 | 33,14 | 21,48 | 40,41 | 34,61 | 25,29 |
| 100-125 µm | 7,32 | 7,74 | 6,59 | 8,92 | 5,35 | 8,44 | 5,63 | 14,56 | 11,44 | 7,01 |
| 63-100 µm | 5,18 | 5,84 | 4,45 | 6,99 | 4,33 | 6,54 | 4,46 | 11,81 | 8,45 | 4,74 |
| < 63 µm | 1,86 | 1,84 | 1,75 | 2,52 | 1,98 | 2,03 | 1,65 | 3,49 | 2,43 | 1,53 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 113,16 | 118,58 | 100,95 | 131,81 | 78,94 | 142,41 | 92,73 | 178,54 | 151,83 | 102,41 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (8)

| Versuchsnummer: | BS 77 | BS 78 | BS 79 | BS 80 | BS 81 | BS 82 | BS 83 | BS 84 | BS 85 | BS 86 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 628 | 628 | 628 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 29,29 | 25,92 | 33,19 | 34,89 | 48,42 | 39,78 | 39,35 | 29,42 | 29,43 | 33,11 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 127 | 127 | 127 | 127 | 120 | 115 | 115 | 115 | 115 | 120 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 115 | 115 | 115 | 69 | 60 | 60 | 60 | 60 | 60 |
| Druckluftzufuhr [U] | 6,0 | 5,0 | 6,0 | 6,0 | 6,5 | 6,5 | 8 | 7 | 7,5 | 5,5 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 9 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 11,57 | 10,41 | 9,57 | 10,16 | 15,35 | 10,02 | 8,81 | 10,50 | 10,50 | 11,38 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 76,40 | 77,28 | 81,72 | 78,34 | 87,32 | 89,41 | 69,89 | 84,99 | 83,07 | 79,80 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 19,57 | 18,02 | 13,61 | 16,79 | 7,45 | 6,41 | 24,64 | 10,13 | 11,26 | 16,16 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 4,02 | 4,69 | 4,67 | 4,88 | 5,22 | 4,45 | 5,47 | 4,87 | 5,67 | 4,04 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 511,9 | 507,9 | 540,5 | 513,6 | 603,6 | 526,5 | 505,8 | 475,9 | 498,8 | 550,0 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 10,10 | 10,10 | n.b. | n.b. | n.b. | 10,02 | 9,41 | 12,30 | 12,30 | 10,31 |
| Schwergut [%] | 12,86 | 12,78 | n.b. | n.b. | n.b. | 16,08 | 17,54 | 16,21 | 16,67 | 14,95 |
| Leichtgut [%] | 32,20 | 32,80 | n.b. | n.b. | n.b. | 40,83 | 28,04 | 41,82 | 39,96 | 36,97 |
| Feinstgut [%] | 40,38 | 38,51 | n.b. | n.b. | n.b. | 43,11 | 44,22 | 44,23 | 44,24 | 45,05 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 19,11 | 19,11 | 22,26 | 20,20 | 22,59 | 22,01 | 19,49 | 21,28 | 21,28 | 19,59 |
| Schwergut [% TS] | 16,56 | 16,66 | 16,15 | 15,27 | 18,09 | 15,39 | 17,99 | 17,18 | 17,61 | 16,67 |
| Leichtgut [% TS] | 30,43 | 31,84 | 40,44 | 39,26 | 43,26 | 39,25 | 22,81 | 37,92 | 36,56 | 35,32 |
| Feinfraktion [% TS] | 50,20 | 50,51 | 47,03 | 47,77 | 50,16 | 43,56 | 44,15 | 46,56 | 47,19 | 47,97 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -13,34 | -12,82 | -27,45 | -24,41 | -19,92 | -30,08 | -7,70 | -19,27 | -17,25 | -14,91 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 1,17 | 1,17 | 1,10 | 1,01 | 0,83 | 0,94 | 0,73 | 0,93 | 0,93 | 1,14 |
| 2000-4000 µm | 21,63 | 21,63 | 22,14 | 21,58 | 18,34 | 19,89 | 19,83 | 22,68 | 22,68 | 21,29 |
| 1000-2000 µm | 24,35 | 24,35 | 23,48 | 24,96 | 24,04 | 23,56 | 23,49 | 24,53 | 24,53 | 24,89 |
| 500-1000 µm | 21,06 | 21,06 | 20,70 | 21,15 | 22,50 | 21,40 | 21,54 | 20,49 | 20,49 | 21,26 |
| 250-500 µm | 15,84 | 15,84 | 16,03 | 15,78 | 17,22 | 16,83 | 17,14 | 15,41 | 15,41 | 15,75 |
| 125-250 µm | 8,61 | 8,61 | 9,00 | 8,54 | 9,29 | 9,58 | 9,69 | 8,75 | 8,75 | 8,64 |
| 100-125 µm | 1,36 | 1,36 | 1,80 | 1,56 | 2,00 | 1,59 | 1,59 | 1,22 | 1,22 | 1,26 |
| 63-100 µm | 2,85 | 2,85 | 2,65 | 2,46 | 2,44 | 3,10 | 2,98 | 2,88 | 2,88 | 2,87 |
| < 63 µm | 3,11 | 3,11 | 3,09 | 2,96 | 3,34 | 3,12 | 3,00 | 3,12 | 3,12 | 2,92 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 12,09 | 12,09 | 11,02 | 12,74 | 10,38 | 10,30 | 9,92 | 12,69 | 12,69 | 12,72 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,03 | 0,09 | 0,07 | 0,02 | 0,04 | 0,05 | 0,11 | 0,07 | 0,01 | 0,08 |
| 2000-4000 µm | 22,71 | 24,74 | 20,75 | 23,62 | 20,84 | 21,47 | 19,25 | 19,33 | 19,37 | 20,64 |
| 1000-2000 µm | 32,54 | 30,31 | 31,35 | 30,50 | 28,78 | 27,84 | 26,28 | 30,35 | 28,73 | 31,28 |
| 500-1000 µm | 24,10 | 23,62 | 25,74 | 25,73 | 24,95 | 23,50 | 25,55 | 26,92 | 26,02 | 26,56 |
| 250-500 µm | 14,75 | 14,97 | 16,48 | 15,13 | 17,45 | 17,68 | 19,56 | 17,25 | 17,90 | 16,00 |
| 125-250 µm | 4,88 | 5,26 | 4,73 | 4,23 | 6,67 | 7,75 | 7,85 | 5,08 | 6,80 | 4,57 |
| 100-125 µm | 0,13 | 0,16 | 0,06 | 0,06 | 0,25 | 0,54 | 0,51 | 0,21 | 0,37 | 0,06 |
| 63-100 µm | 0,44 | 0,46 | 0,38 | 0,39 | 0,56 | 0,60 | 0,44 | 0,39 | 0,41 | 0,46 |
| < 63 µm | 0,43 | 0,40 | 0,44 | 0,32 | 0,44 | 0,56 | 0,43 | 0,39 | 0,39 | 0,34 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 38,18 | 34,93 | 35,79 | 37,51 | 27,65 | 23,41 | 20,42 | 33,11 | 27,03 | 36,57 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,03 | 0,10 | 0,01 | 0,01 | 0,00 |
| 2000-4000 µm | 4,36 | 4,52 | 0,42 | 1,15 | 0,20 | 1,02 | 20,76 | 0,19 | 0,64 | 0,32 |
| 1000-2000 µm | 13,19 | 12,22 | 2,37 | 4,36 | 0,56 | 3,89 | 22,00 | 1,09 | 3,65 | 1,87 |
| 500-1000 µm | 20,53 | 20,28 | 8,62 | 12,42 | 3,87 | 6,25 | 14,75 | 5,51 | 11,77 | 11,51 |
| 250-500 µm | 23,71 | 24,62 | 24,37 | 29,11 | 16,24 | 10,63 | 12,73 | 19,63 | 23,37 | 27,68 |
| 125-250 µm | 23,01 | 24,23 | 37,11 | 31,59 | 39,14 | 32,53 | 15,73 | 40,09 | 33,74 | 32,49 |
| 100-125 µm | 7,30 | 7,05 | 11,12 | 8,88 | 17,28 | 19,85 | 5,63 | 15,04 | 11,00 | 10,14 |
| 63-100 µm | 5,69 | 5,51 | 12,55 | 9,56 | 18,39 | 21,21 | 6,46 | 15,99 | 13,31 | 12,55 |
| < 63 µm | 2,21 | 1,56 | 3,46 | 2,93 | 4,30 | 4,60 | 1,84 | 2,45 | 2,52 | 3,44 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 96,08 | 97,91 | 167,56 | 146,23 | 191,33 | 178,91 | 26,19 | 183,14 | 157,45 | 160,27 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (9)

| Versuchsnummer: | BS_87 | BS_88 | BS_89 | BS_90 | BS_91 | BS_92 | BS_93 | BS_94 | BS_95 | BS_96 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 1000 | 1000 | 1000 | 94 | 94 | 628 | 628 | 628 | 628 | 94 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 32,22 | 32,20 | 35,29 | 30,60 | 30,99 | 32,50 | 32,56 | 36,36 | 34,55 | 29,14 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 120 | 120 | 120 | 127 | 130 | 90 | 90 | 90 | 90 | 127 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 60 | 60 | 60 | 115 | 115 | 60 | 60 | 60 | 60 | 115 |
| Druckluftzufuhr [U] | 6 | 5 | 4 | 6 | 7,5 | 7 | 7,5 | 6,5 | 6 | 6 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 9 | 9 | 9 | 3 | 3 | 9 | 9 | 9 | 9 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 11,38 | 13,67 | 13,67 | 15,98 | 15,98 | 10,93 | 10,93 | 12,28 | 11,36 | 25,89 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 82,63 | 83,24 | 83,01 | 73,00 | 61,48 | 77,90 | 79,32 | 77,32 | 72,53 | 71,79 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 13,17 | 12,84 | 13,01 | 22,39 | 32,68 | 18,45 | 16,39 | 17,89 | 21,69 | 21,40 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 4,20 | 3,92 | 3,97 | 4,62 | 5,84 | 3,65 | 4,29 | 4,79 | 5,78 | 6,81 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 560,3 | 590,7 | 602,8 | 596,0 | 563,7 | 606,0 | 586,5 | 499,4 | 481,0 | 394,8 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 10,31 | 7,58 | 7,58 | 7,52 | 9,39 | 9,39 | 8,43 | 11,64 | 11,64 | n.b. |
| Schwergut [%] | 14,73 | 13,86 | 12,00 | 14,51 | 15,58 | 13,25 | 13,79 | 13,74 | 16,17 | n.b. |
| Leichtgut [%] | 37,65 | 38,90 | 38,07 | 34,22 | 31,17 | 35,15 | 37,38 | 35,75 | 32,60 | n.b. |
| Feinstgut [%] | 44,03 | 42,53 | 42,10 | 42,56 | 44,43 | 40,64 | 40,96 | 42,18 | 41,28 | n.b. |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 19,59 | 20,23 | 20,23 | 19,36 | 19,58 | 19,58 | 21,32 | 22,09 | 22,09 | n.b. |
| Schwergut [% TS] | 17,09 | 16,39 | 16,00 | 15,81 | 14,83 | 17,99 | 15,22 | 17,19 | 17,87 | n.b. |
| Leichtgut [% TS] | 37,25 | 38,04 | 36,31 | 30,79 | 26,59 | 30,16 | 35,02 | 31,03 | 28,04 | n.b. |
| Feinfraktion [% TS] | 50,45 | 45,99 | 45,19 | 45,59 | 51,08 | 44,09 | 45,42 | 46,20 | 50,09 | n.b. |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -12,76 | -18,98 | -20,91 | -18,34 | -24,26 | -8,12 | -28,61 | -22,18 | -19,10 | |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 1,14 | 1,29 | 1,29 | 1,00 | 0,80 | 0,80 | 0,71 | 1,06 | 1,06 | n.b. |
| 2000-4000 µm | 21,29 | 26,53 | 26,53 | 18,65 | 17,58 | 17,58 | 19,75 | 22,21 | 22,21 | n.b. |
| 1000-2000 µm | 24,89 | 24,61 | 24,61 | 23,98 | 24,20 | 24,20 | 24,89 | 24,90 | 24,90 | n.b. |
| 500-1000 µm | 21,26 | 19,75 | 19,75 | 22,50 | 22,83 | 22,83 | 22,53 | 20,90 | 20,90 | n.b. |
| 250-500 µm | 15,75 | 13,86 | 13,86 | 17,53 | 17,85 | 17,85 | 16,45 | 15,43 | 15,43 | n.b. |
| 125-250 µm | 8,64 | 7,71 | 7,71 | 9,09 | 9,77 | 9,77 | 8,52 | 8,47 | 8,47 | n.b. |
| 100-125 µm | 1,26 | 1,25 | 1,25 | 1,46 | 1,71 | 1,71 | 1,48 | 1,49 | 1,49 | n.b. |
| 63-100 µm | 2,87 | 2,35 | 2,35 | 2,54 | 2,47 | 2,47 | 2,59 | 2,58 | 2,58 | n.b. |
| < 63 µm | 2,92 | 2,65 | 2,65 | 3,26 | 2,80 | 2,80 | 3,06 | 2,96 | 2,96 | n.b. |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 12,72 | 20,61 | 20,61 | 10,02 | 10,50 | 10,50 | 12,02 | 13,03 | 13,03 | n.b. |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,08 | 0,07 | 0,11 | 0,03 | 0,02 | 0,10 | 0,07 | 0,04 | 0,06 | n.b. |
| 2000-4000 µm | 21,01 | 22,85 | 27,69 | 18,77 | 20,09 | 21,10 | 20,29 | 23,30 | 23,99 | n.b. |
| 1000-2000 µm | 29,71 | 30,76 | 30,77 | 30,68 | 33,19 | 31,78 | 31,52 | 33,59 | 31,25 | n.b. |
| 500-1000 µm | 25,46 | 25,44 | 22,47 | 27,99 | 25,93 | 25,60 | 26,75 | 24,19 | 23,77 | n.b. |
| 250-500 µm | 16,99 | 15,44 | 13,46 | 17,12 | 15,29 | 15,12 | 15,57 | 13,67 | 14,25 | n.b. |
| 125-250 µm | 5,74 | 4,55 | 4,51 | 4,83 | 4,68 | 5,09 | 4,77 | 4,25 | 5,42 | n.b. |
| 100-125 µm | 0,32 | 0,21 | 0,23 | 0,11 | 0,09 | 0,38 | 0,07 | 0,04 | 0,10 | n.b. |
| 63-100 µm | 0,35 | 0,31 | 0,37 | 0,23 | 0,37 | 0,44 | 0,55 | 0,49 | 0,63 | n.b. |
| < 63 µm | 0,35 | 0,37 | 0,39 | 0,23 | 0,34 | 0,40 | 0,40 | 0,44 | 0,54 | n.b. |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 31,35 | 36,58 | 44,05 | 34,91 | 39,08 | 36,19 | 36,52 | 41,63 | 35,77 | n.b. |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | n.b. |
| 2000-4000 µm | 0,17 | 0,12 | 1,91 | 1,74 | 4,07 | 0,69 | 0,65 | 0,63 | 1,66 | n.b. |
| 1000-2000 µm | 0,70 | 1,03 | 3,94 | 7,22 | 14,94 | 4,73 | 3,57 | 5,23 | 7,70 | n.b. |
| 500-1000 µm | 7,22 | 8,00 | 9,72 | 17,39 | 26,29 | 18,09 | 14,53 | 17,93 | 19,83 | n.b. |
| 250-500 µm | 25,24 | 26,43 | 22,46 | 26,77 | 26,31 | 31,08 | 30,64 | 28,74 | 28,48 | n.b. |
| 125-250 µm | 38,28 | 36,34 | 33,37 | 27,30 | 17,73 | 26,80 | 30,50 | 27,73 | 25,00 | n.b. |
| 100-125 µm | 10,92 | 10,80 | 11,57 | 6,94 | 3,51 | 6,62 | 7,18 | 7,66 | 6,92 | n.b. |
| 63-100 µm | 13,88 | 13,42 | 13,48 | 9,19 | 5,03 | 8,80 | 9,57 | 9,36 | 8,03 | n.b. |
| < 63 µm | 3,60 | 3,85 | 3,55 | 3,44 | 2,12 | 3,19 | 3,35 | 2,73 | 2,38 | n.b. |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 175,45 | 171,83 | 156,50 | 127,66 | 77,88 | 133,65 | 144,82 | 135,10 | 119,99 | n.b. |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (10)

| Versuchsnummer: | BS 97 | BS 98 | BS 99 | BS 101 | BS 100 | BS 103 | BS 102 | BS 105 | BS 104 | BS 107 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 94 | 94 | 628 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 629 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 28,71 | 29,91 | 30,74 | 31,94 | 28,77 | 29,97 | 29,00 | 27,25 | 31,41 | 31,60 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 127 | 127 | 127 | 90 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 115 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 115 | 115 | 60 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 69 |
| Druckluftzufuhr [U] | 6 | 6 | 6 | 7,5 | 6 | 6,5 | 6 | 7,5 | 7 | 7,75 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 15 | 15 | 15 | 15 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 25,89 | 21,60 | 21,60 | 11,35 | 11,35 | 11,03 | 11,03 | 9,79 | 10,58 | 15,25 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 77,63 | 73,60 | 70,83 | 71,29 | 74,38 | 75,90 | 70,42 | 75,62 | 76,59 | 82,67 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 16,31 | 18,96 | 22,17 | 20,66 | 18,46 | 16,01 | 22,29 | 11,27 | 10,83 | 10,58 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 6,06 | 7,43 | 7,01 | 8,05 | 7,16 | 8,09 | 7,28 | 13,11 | 12,58 | 6,75 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 501,4 | 415,0 | 442,3 | 495,8 | 459,2 | 550,6 | 548,7 | 553,5 | 573,1 | 492,4 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 11,42 | 13,85 | 13,85 | 11,64 | 11,64 | 9,26 | 9,26 | 10,01 | 10,01 | 13,35 |
| Schwergut [%] | 12,98 | 15,16 | 15,21 | 12,56 | 13,47 | 13,22 | 13,24 | 13,06 | 13,36 | 13,47 |
| Leichtgut [%] | 38,62 | 38,25 | 33,85 | 34,92 | 36,28 | 34,74 | 30,01 | 38,21 | 38,30 | 40,00 |
| Feinstgut [%] | 39,59 | 41,60 | 40,81 | 38,11 | 38,08 | 37,72 | 36,60 | 31,71 | 32,27 | 43,62 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 19,20 | 21,31 | 21,31 | 22,19 | 22,19 | 18,78 | 18,78 | 21,80 | 21,80 | 21,52 |
| Schwergut [% TS] | 16,09 | 15,48 | 14,91 | 16,1 | 16,29 | 16,04 | 15,84 | 15,34 | 15,57 | 15,85 |
| Leichtgut [% TS] | 37,05 | 31,96 | 28,54 | 27,2 | 31,21 | 31,67 | 30,11 | 31,35 | 31,9 | 32,78 |
| Feinfraktion [% TS] | 41,26 | 47,50 | 43,03 | 39,45 | 40,16 | 33,86 | 38,80 | 35,67 | 39,96 | 47,08 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -16,20 | -27,36 | -30,03 | -27,44 | -26,59 | -14,59 | -15,65 | -29,63 | -28,58 | -26,35 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 1,13 | 1,29 | 1,29 | 1,15 | 1,15 | 0,66 | 0,66 | 1,06 | 1,06 | 2,33 |
| 2000-4000 µm | 22,46 | 23,16 | 23,16 | 22,28 | 22,28 | 19,68 | 19,68 | 19,77 | 19,77 | 21,96 |
| 1000-2000 µm | 24,32 | 25,19 | 25,19 | 24,52 | 24,52 | 24,32 | 24,32 | 23,27 | 23,27 | 24,28 |
| 500-1000 µm | 20,94 | 20,74 | 20,74 | 21,23 | 21,23 | 21,97 | 21,97 | 21,32 | 21,32 | 20,97 |
| 250-500 µm | 15,66 | 14,84 | 14,84 | 15,47 | 15,47 | 16,71 | 16,71 | 16,81 | 16,81 | 15,30 |
| 125-250 µm | 8,55 | 8,18 | 8,18 | 8,30 | 8,30 | 8,90 | 8,90 | 9,77 | 9,77 | 8,32 |
| 100-125 µm | 1,53 | 1,03 | 1,03 | 1,35 | 1,35 | 1,49 | 1,49 | 1,28 | 1,28 | 1,21 |
| 63-100 µm | 2,41 | 2,72 | 2,72 | 2,67 | 2,67 | 2,90 | 2,90 | 3,31 | 3,31 | 2,62 |
| < 63 µm | 2,99 | 2,84 | 2,84 | 3,03 | 3,03 | 3,38 | 3,38 | 3,42 | 3,42 | 3,02 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 12,23 | 13,92 | 13,92 | 12,61 | 12,61 | 11,18 | 11,18 | 10,03 | 10,03 | 12,55 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,10 | 0,06 | 0,04 | 0,17 | 0,07 | 0,08 | 0,07 | 0,11 | 0,03 | 0,05 |
| 2000-4000 µm | 21,19 | 21,69 | 24,76 | 24,06 | 21,46 | 22,95 | 24,57 | 26,34 | 24,13 | 23,50 |
| 1000-2000 µm | 33,50 | 32,62 | 34,68 | 34,43 | 34,45 | 32,69 | 34,31 | 33,47 | 34,40 | 30,12 |
| 500-1000 µm | 27,06 | 26,86 | 24,74 | 25,60 | 27,46 | 25,98 | 25,70 | 24,70 | 24,63 | 25,27 |
| 250-500 µm | 14,01 | 14,64 | 12,21 | 12,37 | 13,53 | 14,42 | 12,16 | 12,36 | 13,08 | 15,67 |
| 125-250 µm | 3,52 | 3,45 | 2,91 | 2,79 | 2,51 | 3,26 | 2,52 | 2,53 | 3,06 | 4,69 |
| 100-125 µm | 0,17 | 0,14 | 0,13 | 0,12 | 0,07 | 0,11 | 0,11 | 0,07 | 0,12 | 0,03 |
| 63-100 µm | 0,21 | 0,27 | 0,20 | 0,21 | 0,19 | 0,23 | 0,21 | 0,19 | 0,21 | 0,37 |
| < 63 µm | 0,23 | 0,27 | 0,34 | 0,25 | 0,26 | 0,28 | 0,34 | 0,25 | 0,35 | 0,29 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 43,38 | 41,86 | 47,46 | 47,46 | 47,00 | 42,65 | 47,94 | 50,05 | 45,99 | 35,84 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,00 |
| 2000-4000 µm | 0,50 | 1,46 | 1,33 | 1,96 | 0,61 | 0,57 | 2,18 | 0,41 | 0,65 | 1,36 |
| 1000-2000 µm | 3,40 | 6,01 | 7,73 | 7,45 | 3,63 | 3,44 | 8,41 | 3,26 | 3,66 | 4,55 |
| 500-1000 µm | 15,71 | 16,19 | 20,90 | 19,91 | 15,23 | 15,83 | 20,95 | 16,24 | 17,10 | 11,53 |
| 250-500 µm | 32,14 | 27,86 | 28,05 | 29,86 | 31,54 | 30,80 | 31,07 | 32,26 | 32,30 | 26,41 |
| 125-250 µm | 30,76 | 30,17 | 25,54 | 25,32 | 30,48 | 30,41 | 23,82 | 31,02 | 30,36 | 37,51 |
| 100-125 µm | 6,95 | 7,46 | 6,38 | 6,10 | 7,47 | 7,40 | 4,03 | 7,04 | 6,25 | 11,61 |
| 63-100 µm | 8,28 | 8,48 | 7,75 | 7,12 | 8,49 | 8,61 | 7,15 | 7,91 | 7,84 | 5,67 |
| < 63 µm | 2,25 | 2,36 | 2,32 | 2,27 | 2,56 | 2,94 | 2,39 | 1,87 | 1,83 | 1,36 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 142,07 | 133,72 | 119,50 | 117,96 | 142,58 | 142,80 | 110,94 | 141,75 | 137,74 | 149,30 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (11)

| Versuchsnummer: | BS 106 | BS 109 | BS 108 | BS 110 | BS 111 | BS 112 | BS 113 | BS 115 | BS 114 | BS 116 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 28,24 | 30,79 | 31,50 | 31,69 | 32,02 | n.b. | n.b. | 32,47 | 32,20 | n.b. |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,5 | 7 | 5 | 5 | 4 | 4 | 6,5 | 4 | 5 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 13,35 | 16,93 | 16,83 | 34,04 | 35,74 | 14,40 | 14,40 | 11,80 | 11,80 | 14,66 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 73,38 | 72,33 | 76,60 | 77,96 | 70,64 | 77,11 | 72,50 | 74,11 | 78,99 | 77,52 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 19,89 | 21,11 | 17,11 | 17,03 | 23,48 | 16,58 | 20,94 | 19,60 | 14,99 | 17,49 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 6,73 | 6,56 | 6,29 | 5,01 | 5,88 | 6,30 | 6,56 | 6,29 | 6,02 | 4,99 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 426,6 | 482,3 | 459,7 | 578,3 | 469,4 | 570,9 | 490,0 | 515,7 | 501,5 | 545,6 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 13,35 | 14,26 | 14,26 | 8,08 | 8,20 | 7,90 | 6,16 | 10,47 | 10,47 | n.b. |
| Schwergut [%] | 13,31 | 13,01 | 14,52 | 13,37 | 12,70 | 13,78 | 13,21 | 14,03 | 13,35 | n.b. |
| Leichtgut [%] | 37,14 | 34,46 | 34,20 | 35,40 | 33,58 | 38,45 | 34,91 | 34,50 | 40,14 | n.b. |
| Feinstgut [%] | 44,32 | 42,44 | 41,70 | 42,65 | 42,97 | 46,22 | 36,53 | 41,88 | 41,37 | n.b. |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 21,52 | 21,08 | 21,08 | 22,12 | 20,45 | 22,94 | 21,66 | 20,38 | 20,38 | 19,65 |
| Schwergut [% TS] | 15,12 | 15,04 | 15,16 | 15,94 | 16,29 | 15,43 | 14,32 | 15,69 | 15,62 | 15,81 |
| Leichtgut [% TS] | 30,08 | 31,6 | 32,18 | 35,13 | 30,52 | 34,45 | 34,16 | 31,73 | 34,42 | 33,56 |
| Feinfraktion [% TS] | 49,95 | 47,12 | 45,75 | 45,13 | 45,09 | 48,35 | 46,03 | 44,59 | 44,17 | 47,40 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -29,74 | -28,65 | -28,08 | -27,94 | -20,34 | -32,74 | -33,89 | -23,01 | -23,36 | -19,54 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 2,33 | 2,71 | 2,71 | 1,10 | 1,05 | 1,49 | 2,16 | 1,00 | 1,00 | 0,95 |
| 2000-4000 µm | 21,96 | 21,51 | 21,51 | 20,00 | 20,51 | 24,63 | 18,88 | 22,34 | 22,34 | 21,24 |
| 1000-2000 µm | 24,28 | 23,99 | 23,99 | 24,46 | 23,53 | 25,55 | 23,08 | 24,41 | 24,41 | 24,62 |
| 500-1000 µm | 20,97 | 21,08 | 21,08 | 22,06 | 21,42 | 20,67 | 22,06 | 20,94 | 20,94 | 21,43 |
| 250-500 µm | 15,30 | 15,67 | 15,67 | 16,35 | 16,82 | 14,33 | 16,97 | 15,54 | 15,54 | 15,79 |
| 125-250 µm | 8,32 | 8,21 | 8,21 | 8,60 | 9,52 | 7,49 | 9,30 | 8,50 | 8,50 | 8,87 |
| 100-125 µm | 1,21 | 1,25 | 1,25 | 1,56 | 1,16 | 1,01 | 1,40 | 1,18 | 1,18 | 1,55 |
| 63-100 µm | 2,62 | 2,57 | 2,57 | 2,45 | 3,19 | 2,31 | 2,89 | 2,91 | 2,91 | 2,48 |
| < 63 µm | 3,02 | 3,03 | 3,03 | 3,42 | 2,79 | 2,52 | 3,26 | 3,16 | 3,16 | 3,08 |
| Δ RB_x (%) Aufgabegut | 12,55 | 11,90 | 11,90 | 11,67 | 10,28 | 18,94 | 9,67 | 12,45 | 12,45 | 12,40 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,06 | 0,05 | 0,04 | 0,04 | 0,08 | 0,02 | 0,06 | 0,08 | 0,06 | 0,04 |
| 2000-4000 µm | 23,00 | 23,75 | 22,78 | 22,70 | 21,93 | 21,37 | 20,01 | 22,88 | 22,11 | 20,46 |
| 1000-2000 µm | 36,31 | 33,36 | 34,84 | 32,70 | 31,27 | 32,04 | 30,76 | 33,48 | 32,18 | 32,21 |
| 500-1000 µm | 26,17 | 25,99 | 26,12 | 26,78 | 27,64 | 27,27 | 28,72 | 26,35 | 26,99 | 28,04 |
| 250-500 µm | 12,01 | 13,67 | 13,35 | 14,72 | 15,84 | 15,33 | 16,49 | 13,89 | 15,14 | 15,53 |
| 125-250 µm | 2,01 | 2,67 | 2,42 | 2,56 | 2,82 | 3,24 | 3,37 | 2,81 | 2,92 | 2,97 |
| 100-125 µm | 0,06 | 0,08 | 0,10 | 0,06 | 0,05 | 0,09 | 0,06 | 0,04 | 0,06 | 0,09 |
| 63-100 µm | 0,13 | 0,16 | 0,14 | 0,20 | 0,16 | 0,26 | 0,22 | 0,22 | 0,22 | 0,28 |
| < 63 µm | 0,24 | 0,28 | 0,23 | 0,25 | 0,21 | 0,39 | 0,32 | 0,25 | 0,33 | 0,37 |
| Δ RB_x (%) Schwergut | 51,57 | 45,46 | 47,87 | 43,99 | 41,09 | 40,90 | 38,48 | 45,09 | 42,13 | 41,41 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 |
| 2000-4000 µm | 0,61 | 0,29 | 0,25 | 0,19 | 0,79 | 0,28 | 0,57 | 0,54 | 0,23 | 0,37 |
| 1000-2000 µm | 3,99 | 3,47 | 2,19 | 1,23 | 3,74 | 1,75 | 3,22 | 3,29 | 1,33 | 2,03 |
| 500-1000 µm | 17,14 | 16,93 | 11,93 | 7,35 | 13,00 | 9,72 | 13,08 | 14,07 | 8,17 | 11,37 |
| 250-500 µm | 34,11 | 34,73 | 32,29 | 29,42 | 30,27 | 30,64 | 32,03 | 33,43 | 29,16 | 32,43 |
| 125-250 µm | 32,51 | 32,84 | 38,47 | 43,10 | 35,56 | 40,45 | 35,25 | 34,36 | 42,24 | 37,82 |
| 100-125 µm | 6,91 | 7,58 | 9,21 | 10,12 | 9,06 | 9,58 | 7,58 | 7,01 | 10,21 | 9,05 |
| 63-100 µm | 3,76 | 3,35 | 4,57 | 6,80 | 5,54 | 6,07 | 6,16 | 5,39 | 6,93 | 5,23 |
| < 63 µm | 0,97 | 0,82 | 1,08 | 1,80 | 2,04 | 1,51 | 2,10 | 1,91 | 1,73 | 1,70 |
| Δ RB_x (%) Leichtgut | 135,06 | 137,75 | 154,11 | 169,34 | 147,21 | 161,41 | 147,70 | 144,26 | 167,45 | 155,12 |

Tabelle A 10: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material BS (12)

| Versuchsnummer: | BS 117 | BS 118 | BS 119 | BS 120 | BS 121 | BS 122 | BS 123 | MW BS | STABWN BS |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-----------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | 94 | | |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 31,88 | 32,05 | 60,92 | n.b. | n.b. | 28,25 | 27,84 | 33,71 | 5,84 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 127 | 82 | | |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 115 | 215 | | |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 4 | 4,5 | 3,5 | 3,5 | 4 | | |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. I.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 9 | | |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | | |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 11,79 | 11,79 | 10,62 | 16,34 | n.b. | 16,07 | 16,07 | 14,96 | 11,66 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 75,22 | 76,76 | 75,57 | 74,32 | n.b. | 70,81 | 84,64 | 72,48 | 9,56 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 19,27 | 17,97 | 16,59 | 20,66 | n.b. | 23,78 | 8,82 | 19,70 | 8,61 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 5,51 | 5,26 | 7,84 | 5,02 | n.b. | 5,41 | 6,55 | 7,83 | 2,77 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 468,6 | 535,3 | 486,2 | 503,3 | n.b. | 472,2 | 496,4 | 568,5 | 71,3 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | n.b. | n.b. | 12,14 | 10,33 | 10,33 | 9,79 | 9,79 | 9,35 | 1,75 |
| Schwergut [%] | n.b. | n.b. | 5,04 | 12,38 | 21,28 | 12,24 | 12,78 | 12,94 | 2,22 |
| Leichtgut [%] | n.b. | n.b. | 32,28 | 32,07 | 34,53 | 33,91 | 41,96 | 31,89 | 5,58 |
| Feinstgut [%] | n.b. | n.b. | 33,54 | 42,62 | n.b. | 42,54 | 43,31 | 38,54 | 4,07 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 21,84 | 20,70 | 20,09 | 19,29 | 19,29 | 18,73 | 18,73 | 21,17 | 1,43 |
| Schwergut [% TS] | 14,92 | 15,18 | 15,11 | 15,62 | 15,38 | 15,58 | 14,49 | 16,18 | 0,96 |
| Leichtgut [% TS] | 32,28 | 30,70 | 32,42 | 29,54 | 32,08 | 28,45 | 37,20 | 29,74 | 4,84 |
| Feinfraktion [% TS] | 40,27 | 40,16 | 32,68 | 45,12 | n.b. | 46,52 | 44,42 | 43,38 | 4,68 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -31,68 | -26,67 | -24,79 | -19,03 | -20,27 | -16,82 | -22,64 | -23,26 | 6,69 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,83 | 1,06 | 1,03 | 0,97 | 0,97 | 0,91 | 0,91 | 1,01 | 0,36 |
| 2000-4000 µm | 21,69 | 21,43 | 22,36 | 22,30 | 22,30 | 22,35 | 22,35 | 21,00 | 2,02 |
| 1000-2000 µm | 24,96 | 24,25 | 24,85 | 24,88 | 24,88 | 24,45 | 24,45 | 24,22 | 0,80 |
| 500-1000 µm | 21,65 | 21,57 | 21,84 | 20,96 | 20,96 | 21,33 | 21,33 | 21,54 | 0,77 |
| 250-500 µm | 16,02 | 16,00 | 15,67 | 15,42 | 15,42 | 15,71 | 15,71 | 16,18 | 1,03 |
| 125-250 µm | 8,49 | 8,51 | 8,03 | 8,44 | 8,44 | 8,33 | 8,33 | 8,87 | 0,74 |
| 100-125 µm | 0,99 | 1,43 | 1,38 | 1,31 | 1,31 | 1,50 | 1,50 | 1,86 | 1,51 |
| 63-100 µm | 2,68 | 2,59 | 2,25 | 2,64 | 2,64 | 2,40 | 2,40 | 2,66 | 0,55 |
| < 63 µm | 2,70 | 3,16 | 2,59 | 3,08 | 3,08 | 3,02 | 3,02 | 3,08 | 0,42 |
| Δ RB_s (%) Aufgabegut | 12,51 | 11,81 | 12,82 | 13,02 | 13,02 | 12,30 | 12,30 | 12,21 | 2,28 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,11 | 0,03 | 0,06 | 0,02 | 0,04 | 0,07 | 0,03 | 0,09 | 0,06 |
| 2000-4000 µm | 22,33 | 22,72 | 23,00 | 22,59 | 19,26 | 22,76 | 19,19 | 22,41 | 2,92 |
| 1000-2000 µm | 34,12 | 33,07 | 31,23 | 32,97 | 30,66 | 35,39 | 28,77 | 32,28 | 2,67 |
| 500-1000 µm | 26,49 | 26,22 | 26,97 | 26,49 | 29,00 | 27,80 | 27,68 | 25,68 | 2,08 |
| 250-500 µm | 13,84 | 14,33 | 15,04 | 14,27 | 16,39 | 11,89 | 19,80 | 14,53 | 2,52 |
| 125-250 µm | 2,60 | 3,02 | 2,98 | 3,08 | 3,93 | 1,53 | 4,77 | 4,25 | 1,80 |
| 100-125 µm | 0,04 | 0,12 | 0,04 | 0,07 | 0,26 | 0,08 | 0,06 | 0,21 | 0,20 |
| 63-100 µm | 0,22 | 0,19 | 0,29 | 0,24 | 0,21 | 0,19 | 0,38 | 0,28 | 0,15 |
| < 63 µm | 0,25 | 0,29 | 0,39 | 0,28 | 0,24 | 0,28 | 0,33 | 0,30 | 0,10 |
| Δ RB_s (%) Schwergut | 46,20 | 43,65 | 40,93 | 43,51 | 37,14 | 51,49 | 31,04 | 40,66 | 9,55 |
| Leichtgut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,01 | 0,02 |
| 2000-4000 µm | 0,32 | 1,40 | 2,22 | 4,33 | 2,69 | 0,52 | 0,07 | 2,80 | 3,18 |
| 1000-2000 µm | 2,81 | 4,80 | 4,34 | 8,06 | 5,20 | 2,81 | 0,21 | 8,39 | 5,97 |
| 500-1000 µm | 13,99 | 14,71 | 11,07 | 14,89 | 13,45 | 14,68 | 0,98 | 19,01 | 7,03 |
| 250-500 µm | 33,61 | 31,61 | 28,88 | 28,10 | 27,41 | 36,43 | 13,05 | 30,86 | 6,61 |
| 125-250 µm | 35,02 | 32,68 | 36,50 | 30,27 | 33,54 | 32,31 | 52,12 | 26,65 | 8,26 |
| 100-125 µm | 7,60 | 7,14 | 8,67 | 6,90 | 8,80 | 6,32 | 17,72 | 5,52 | 4,35 |
| 63-100 µm | 5,22 | 5,63 | 6,43 | 5,55 | 6,92 | 5,40 | 12,87 | 5,16 | 4,19 |
| < 63 µm | 1,42 | 2,02 | 1,87 | 1,88 | 1,99 | 1,53 | 2,98 | 1,83 | 0,81 |
| Δ RB_s (%) Leichtgut | 146,53 | 136,80 | 144,88 | 118,42 | 137,19 | 141,56 | 201,95 | 112,81 | 39,77 |

Tabelle A 11: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material REM (1)

| Versuchsnummer: | REM 1 | REM 2 | REM 3 | REM 4 | REM 5 | REM 6 | REM 8 | REM 9 | REM 10 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 96 | 1000 | 1000 | 629 | 629 | 1000 | 1000 | 1000 | 1000 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 34,76 | 42,37 | 53,15 | 62,99 | 55,37 | 36,99 | 46,5 | 58,08 | 31,91 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 115 | 82 | 82 | 82 | 115 | 115 | 115 | 115 | 82 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 69 | 60 | 115 | 174 | 69 | 40 | 80 | 80 | 60 |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 6 | 4 | 8 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 6 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 15 | 15 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 9 | 9 | 9 | 3 | 3 | 3 | 6 | 9 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | n.b. | 103 | 159 | 179 | 195 | 172 | 173 | 163 | 150 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 64,41 | 42,30 | 81,52 | 83,98 | 85,23 | 52,77 | 30,31 | 25,86 | 85,61 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 23,99 | 42,29 | 6,27 | 5,20 | 3,98 | 32,11 | 60,88 | 63,18 | 2,12 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 11,60 | 15,59 | 12,21 | 10,81 | 10,78 | 15,12 | 8,81 | 10,96 | 12,26 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 517,5 | 486,3 | 469,2 | 469,2 | 453,8 | 444,7 | 460,6 | 442,3 | 485,6 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 6,74 | 6,46 | 6,88 | 7,40 | 7,01 | n.b. | n.b. | n.b. | 6,23 |
| Schwergut [%] | 12,72 | 12,13 | 10,21 | 13,36 | 11,97 | n.b. | n.b. | 15,42 | 15,04 |
| Leichtgut [%] | 20,45 | 18,70 | 34,19 | 35,52 | 33,50 | n.b. | n.b. | 19,62 | 40,16 |
| Feinstgut [%] | 31,85 | 32,18 | 37,74 | 36,78 | 39,81 | n.b. | n.b. | 37,67 | 37,54 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 17,77 | 17,00 | 16,21 | 16,22 | 17,18 | 18,79 | 18,19 | 18,19 | 17,64 |
| Schwergut [% TS] | 13,79 | 13,60 | 14,39 | 14,56 | 15,79 | 15,51 | 12,33 | 11,93 | 16,64 |
| Leichtgut [% TS] | 22,14 | 19,47 | 33,15 | 35,36 | 33,85 | 21,02 | 20,75 | 19,66 | 37,19 |
| Feinfraction [% TS] | 28,60 | 31,07 | 35,14 | 35,15 | 39,52 | 37,97 | 41,98 | 43,42 | 43,48 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -22,40 | -20,00 | -11,23 | -10,23 | -8,09 | -17,46 | -32,22 | -34,41 | -5,67 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 24,33 | 22,26 | 24,27 | 22,52 | 26,09 | 22,50 | 20,45 | 20,45 | 21,60 |
| 2000-4000 µm | 25,38 | 23,66 | 25,13 | 24,27 | 24,75 | 20,73 | 22,50 | 22,50 | 24,68 |
| 1000-2000 µm | 17,58 | 18,37 | 18,23 | 18,07 | 17,83 | 16,72 | 19,12 | 19,12 | 18,58 |
| 500-1000 µm | 14,24 | 15,82 | 14,41 | 15,38 | 13,99 | 16,05 | 17,16 | 17,16 | 15,16 |
| 250-500 µm | 9,34 | 10,47 | 9,25 | 10,19 | 8,93 | 11,89 | 11,29 | 11,29 | 10,32 |
| 125-250 µm | 4,54 | 4,86 | 4,38 | 4,86 | 4,21 | 6,15 | 5,02 | 5,02 | 5,03 |
| 100-125 µm | 0,76 | 0,89 | 0,79 | 0,70 | 0,90 | 1,26 | 0,69 | 0,69 | 0,62 |
| 63-100 µm | 1,61 | 1,48 | 1,38 | 1,75 | 1,30 | 2,01 | 1,64 | 1,64 | 1,90 |
| < 63 µm | 2,21 | 2,20 | 2,15 | 2,25 | 1,99 | 2,69 | 2,13 | 2,13 | 2,11 |
| Δ RB_s (%) Aufgabegut | 71,59 | 63,01 | 72,55 | 64,51 | 75,95 | 49,21 | 56,91 | 56,91 | 63,64 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,57 | 0,44 | 0,49 | 0,42 | 0,41 | 0,81 | 1,34 | 0,35 | 0,43 |
| 2000-4000 µm | 28,10 | 27,28 | 26,87 | 28,99 | 28,12 | 42,08 | 52,81 | 25,12 | 23,35 |
| 1000-2000 µm | 32,43 | 36,28 | 29,12 | 28,76 | 29,84 | 27,75 | 20,39 | 22,25 | 27,95 |
| 500-1000 µm | 24,66 | 26,59 | 24,29 | 23,40 | 22,23 | 15,13 | 12,10 | 21,25 | 24,60 |
| 250-500 µm | 11,70 | 8,43 | 14,86 | 14,20 | 14,06 | 9,97 | 10,41 | 22,84 | 17,35 |
| 125-250 µm | 2,12 | 0,65 | 3,88 | 3,55 | 4,71 | 3,46 | 2,57 | 7,34 | 5,58 |
| 100-125 µm | 0,05 | 0,06 | 0,11 | 0,14 | 0,23 | 0,27 | 0,12 | 0,27 | 0,07 |
| 63-100 µm | 0,21 | 0,11 | 0,17 | 0,23 | 0,21 | 0,26 | 0,11 | 0,32 | 0,34 |
| < 63 µm | 0,17 | 0,17 | 0,20 | 0,31 | 0,19 | 0,27 | 0,14 | 0,27 | 0,32 |
| Δ RB_s (%) Schwergut | 55,10 | 63,44 | 42,43 | 47,06 | 44,30 | 77,18 | 94,57 | 16,08 | 30,13 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,06 | 0,49 | 0,07 | 0,05 | 0,08 | 0,15 | 0,17 | 0,22 | 0,03 |
| 2000-4000 µm | 10,18 | 19,75 | 0,67 | 0,70 | 1,89 | 9,89 | 16,47 | 22,06 | 1,33 |
| 1000-2000 µm | 20,01 | 20,55 | 2,61 | 3,34 | 13,02 | 20,07 | 30,04 | 30,25 | 6,10 |
| 500-1000 µm | 26,80 | 23,99 | 20,29 | 16,52 | 25,39 | 31,90 | 27,3 | 25,23 | 13,55 |
| 250-500 µm | 28,83 | 25,12 | 47,10 | 46,04 | 35,10 | 25,36 | 18,31 | 14,92 | 30,12 |
| 125-250 µm | 12,22 | 8,75 | 27,35 | 31,39 | 22,20 | 9,94 | 6,72 | 5,42 | 45,73 |
| 100-125 µm | 0,33 | 0,19 | 0,32 | 0,39 | 0,64 | 0,77 | 0,23 | 0,39 | 1,30 |
| 63-100 µm | 0,91 | 0,59 | 0,77 | 0,78 | 0,75 | 0,99 | 0,38 | 0,79 | 1,1 |
| < 63 µm | 0,67 | 0,56 | 0,81 | 0,8 | 0,93 | 0,93 | 0,37 | 0,72 | 0,74 |
| Δ RB_s (%) Leichtgut | 34,81 | 11,52 | 119,36 | 125,81 | 85,04 | 31,65 | 28,48 | 32,83 | 136,9 |

Tabelle A 11: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material REM (2)

| Versuchsnummer: | REM 11 | REM 12 | REM 13 | REM 14 | REM 15 | REM 16 | REM 18 | REM 19 | REM 20 |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 1000 | 628 | 628 | 628 | 628 | 628 | 628 | 94 | 94 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 42,7 | 32,91 | 33,69 | 34,12 | 34,43 | 34,43 | 34,8 | 51,94 | 30,22 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 105 | 130 | 130 | 135 | 137 | 140 | 140 | 137 | 130 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 60 | 60 | 215 | 53 | 128 | 183 | 53 | 183 | 128 |
| Druckluftzufuhr [U] | 6 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 178 | 200 | 181 | 192 | 211 | 211 | 208 | 144 | 203 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 48,75 | 64,05 | 79,20 | 52,91 | 45,46 | 40,23 | 68,51 | 38,79 | 65,94 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 37,81 | 24,93 | 10,66 | 37,09 | 45,96 | 49,62 | 21,54 | 51,89 | 27,10 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 13,44 | 11,02 | 10,14 | 10,00 | 8,58 | 10,15 | 9,95 | 9,33 | 6,97 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 495,5 | 465,8 | 485,8 | 471,3 | 456,6 | 448,4 | 429,6 | 466,0 | 425,3 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | n.b. | 7,32 | 6,10 | 6,50 | 6,22 | 2,74 | 6,97 | 6,40 | 6,49 |
| Schwergut [%] | n.b. | 12,24 | 12,98 | 10,67 | 15,00 | 13,77 | 13,00 | 13,36 | 12,67 |
| Leichtgut [%] | n.b. | 23,42 | 31,82 | 22,17 | 18,44 | 19,43 | 26,44 | 17,66 | 25,67 |
| Feinstgut [%] | n.b. | 38,63 | 37,60 | 36,98 | 36,58 | 37,12 | 36,41 | 38,44 | 36,48 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 16,93 | 17,36 | 18,59 | 15,97 | 17,33 | 16,42 | 18,55 | 17,17 | 17,39 |
| Schwergut [% TS] | 13,91 | 14,74 | 15,74 | 14,24 | 14,11 | 8,61 | 15,43 | 13,32 | 14,69 |
| Leichtgut [% TS] | 19,99 | 21,72 | 28,85 | 19,92 | 20,73 | 25,62 | 21,90 | 21,00 | 20,62 |
| Feinfraktion [% TS] | 28,92 | 43,45 | 36,97 | 36,36 | 35,59 | 39,19 | 37,39 | 36,30 | 40,96 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -17,84 | -15,09 | -15,33 | -10,83 | -18,58 | -47,56 | -16,82 | -22,42 | -15,53 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 22,44 | 28,80 | 32,24 | 28,58 | 18,07 | 44,64 | 29,30 | 30,28 | 21,65 |
| 2000-4000 µm | 23,96 | 24,52 | 22,84 | 26,46 | 21,90 | 26,16 | 24,44 | 26,03 | 23,29 |
| 1000-2000 µm | 18,80 | 16,29 | 15,28 | 16,68 | 19,87 | 11,71 | 16,03 | 15,55 | 19,14 |
| 500-1000 µm | 15,77 | 13,23 | 13,22 | 12,63 | 17,84 | 7,71 | 13,01 | 12,51 | 16,02 |
| 250-500 µm | 10,08 | 8,85 | 8,79 | 8,00 | 11,82 | 4,67 | 8,77 | 8,08 | 10,56 |
| 125-250 µm | 4,64 | 4,35 | 4,03 | 3,81 | 5,60 | 2,31 | 4,32 | 3,85 | 4,91 |
| 100-125 µm | 0,83 | 0,86 | 0,64 | 0,56 | 0,92 | 0,35 | 0,64 | 0,65 | 0,97 |
| 63-100 µm | 1,44 | 1,33 | 1,27 | 1,41 | 1,73 | 1,00 | 1,53 | 1,32 | 1,43 |
| < 63 µm | 2,05 | 1,78 | 1,70 | 1,87 | 2,26 | 1,46 | 1,95 | 1,72 | 2,04 |
| Δ RB ₄ (%) Aufgabegut | 65,73 | 79,57 | 83,50 | 85,60 | 49,10 | 120,53 | 80,03 | 87,18 | 61,89 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,36 | 0,29 | 0,28 | 0,34 | 0,38 | 0,72 | 0,49 | 0,64 | 0,48 |
| 2000-4000 µm | 32,54 | 31,10 | 27,00 | 35,07 | 33,23 | 28,03 | 30,18 | 28,00 | 33,16 |
| 1000-2000 µm | 30,75 | 28,69 | 28,12 | 28,66 | 28,24 | 26,60 | 28,45 | 27,01 | 27,40 |
| 500-1000 µm | 19,89 | 21,47 | 23,91 | 18,88 | 17,79 | 23,12 | 21,83 | 23,54 | 19,68 |
| 250-500 µm | 12,67 | 13,55 | 15,19 | 12,52 | 13,80 | 15,82 | 13,90 | 15,25 | 13,78 |
| 125-250 µm | 3,16 | 4,29 | 4,65 | 3,83 | 5,60 | 4,90 | 4,32 | 4,82 | 4,80 |
| 100-125 µm | 0,17 | 0,20 | 0,14 | 0,22 | 0,40 | 0,27 | 0,15 | 0,32 | 0,23 |
| 63-100 µm | 0,23 | 0,20 | 0,37 | 0,26 | 0,28 | 0,23 | 0,35 | 0,18 | 0,22 |
| < 63 µm | 0,23 | 0,22 | 0,32 | 0,23 | 0,29 | 0,32 | 0,35 | 0,25 | 0,26 |
| Δ RB ₄ (%) Schwergut | 58,44 | 50,23 | 38,73 | 60,01 | 50,65 | 38,97 | 47,67 | 40,03 | 52,01 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,14 | 0,14 | 0,01 | 0,10 | 0,10 | 0,25 | 0,15 | 0,36 | 0,13 |
| 2000-4000 µm | 10,32 | 11,31 | 5,84 | 14,17 | 17,72 | 21,95 | 9,50 | 24,23 | 14,55 |
| 1000-2000 µm | 26,17 | 22,71 | 14,61 | 26,51 | 28,20 | 27,86 | 22,78 | 28,94 | 28,11 |
| 500-1000 µm | 31,47 | 27,99 | 24,26 | 27,34 | 28,42 | 24,67 | 28,54 | 22,74 | 28,81 |
| 250-500 µm | 22,35 | 24,33 | 33,48 | 21,20 | 17,81 | 17,04 | 24,68 | 15,64 | 18,69 |
| 125-250 µm | 8,25 | 11,77 | 19,75 | 8,84 | 6,18 | 6,24 | 12,35 | 6,29 | 8,11 |
| 100-125 µm | 0,27 | 0,43 | 0,86 | 0,41 | 0,27 | 0,57 | 0,50 | 0,49 | 0,40 |
| 63-100 µm | 0,45 | 0,66 | 0,6 | 0,6 | 0,63 | 0,67 | 0,78 | 0,6 | 0,57 |
| < 63 µm | 0,58 | 0,66 | 0,57 | 0,81 | 0,67 | 0,76 | 0,71 | 0,7 | 0,62 |
| Δ RB ₄ (%) Leichtgut | 29,32 | 25,16 | 68,57 | 20,27 | 27,03 | 26,49 | 29,13 | 29,29 | 22,29 |

Tabelle A 11: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material REM (3)

| Versuchsnummer: | REM 21 | REM 23 | REM 24 | REM 25 | MW REM | s REM |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 94 | 629 | 628 | | |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 35,81 | 25,77 | 32,96 | 33,14 | 39,96 | 9,98 |
| Setzmaschine: | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 130 | 137 | 125 | 131 | | |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 215 | 69 | 183 | | |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 6,5 | 6,5 | | |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | | |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 192 | 194 | 108 | 187 | 176,33 | 29,49 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 73,77 | 60,89 | 83,64 | 79,92 | 61,55 | 18,56 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 15,51 | 30,13 | 11,07 | 15,26 | 28,12 | 18,21 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 10,72 | 8,89 | 5,29 | 4,82 | 10,34 | 2,58 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 453,4 | 275,5 | 468,5 | 444,3 | 455,2 | 44,57 |
| Körnungsanalysen | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 7,26 | 5,58 | 5,18 | 4,96 | 6,25 | 1,08 |
| Schwergut [%] | 12,45 | 15,95 | 13,83 | 12,38 | 13,11 | 1,46 |
| Leichtgut [%] | 28,97 | 23,24 | 34,31 | 34,10 | 26,73 | 6,90 |
| Feinstgut [%] | 37,44 | 36,30 | 37,63 | 36,80 | 36,84 | 1,86 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 16,14 | 18,50 | 20,81 | 18,01 | 17,56 | 1,10 |
| Schwergut [% TS] | 15,30 | 14,84 | 17,16 | 15,68 | 14,38 | 1,76 |
| Leichtgut [% TS] | 26,18 | 19,01 | 32,75 | 35,99 | 25,31 | 6,24 |
| Feinfraktion [% TS] | 43,42 | 38,09 | 41,77 | 41,92 | 38,03 | 4,39 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -5,20 | -19,78 | -17,54 | -12,94 | -18,05 | 9,56 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | |
| > 4000 µm | 20,86 | 23,24 | 26,40 | 26,02 | 25,32 | 5,53 |
| 2000-4000 µm | 22,22 | 22,01 | 22,49 | 24,61 | 23,84 | 1,51 |
| 1000-2000 µm | 18,19 | 16,60 | 14,57 | 16,81 | 17,23 | 1,84 |
| 500-1000 µm | 16,79 | 15,08 | 13,44 | 13,58 | 14,55 | 2,15 |
| 250-500 µm | 11,68 | 11,39 | 11,01 | 9,51 | 9,83 | 1,63 |
| 125-250 µm | 5,63 | 6,13 | 6,61 | 4,80 | 4,78 | 0,91 |
| 100-125 µm | 1,01 | 1,03 | 0,77 | 0,74 | 0,79 | 0,19 |
| 63-100 µm | 1,50 | 2,05 | 2,44 | 1,84 | 1,59 | 0,31 |
| < 63 µm | 2,12 | 2,48 | 2,26 | 2,09 | 2,07 | 0,26 |
| Δ RB₄ (%) Aufgabegut | 54,29 | 54,46 | 59,35 | 71,76 | 69,42 | 15,84 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,41 | 0,36 | 0,28 | 0,27 | 0,48 | 0,23 |
| 2000-4000 µm | 25,93 | 18,04 | 21,93 | 27,22 | 29,73 | 6,95 |
| 1000-2000 µm | 30,54 | 21,49 | 28,64 | 30,20 | 28,16 | 3,37 |
| 500-1000 µm | 24,10 | 27,24 | 26,19 | 23,51 | 22,06 | 3,60 |
| 250-500 µm | 13,88 | 24,60 | 16,33 | 13,56 | 14,49 | 3,56 |
| 125-250 µm | 4,39 | 7,30 | 5,19 | 4,11 | 4,33 | 1,47 |
| 100-125 µm | 0,26 | 0,39 | 0,34 | 0,26 | 0,21 | 0,10 |
| 63-100 µm | 0,21 | 0,32 | 0,62 | 0,51 | 0,27 | 0,12 |
| < 63 µm | 0,28 | 0,26 | 0,47 | 0,36 | 0,27 | 0,07 |
| Δ RB₄ (%) Schwergut | 41,20 | 18,43 | 31,22 | 43,28 | 47,33 | 17,08 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,08 | 0,29 | 0,03 | 0,01 | 0,14 | 0,12 |
| 2000-4000 µm | 5,22 | 23,08 | 0,57 | 1,86 | 11,06 | 7,93 |
| 1000-2000 µm | 16,04 | 34,55 | 4,90 | 8,14 | 19,80 | 9,59 |
| 500-1000 µm | 30,08 | 22,61 | 19,96 | 20,23 | 24,91 | 4,59 |
| 250-500 µm | 31,76 | 12,93 | 30,71 | 30,92 | 26,02 | 9,03 |
| 125-250 µm | 14,74 | 4,87 | 29,44 | 26,78 | 15,15 | 10,66 |
| 100-125 µm | 0,66 | 0,40 | 8,64 | 6,95 | 1,16 | 2,13 |
| 63-100 µm | 0,74 | 0,57 | 4,54 | 4,1 | 1,03 | 1,06 |
| < 63 µm | 0,68 | 0,7 | 1,21 | 1,02 | 0,74 | 0,17 |
| Δ RB₄ (%) Leichtgut | 56,62 | 40,68 | 130,13 | 114,63 | 55,73 | 41,09 |

Tabelle A 12: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material VS (1)

| Versuchsnummer: | VS_01 | VS_02 | VS_03 | VS_04 | VS_05 | VS_06 | VS_07 | VS_11 | VS_12 |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 95 | 629 | 1005 | 1005 | 629 | 629 | 625 | 626 | 626 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. | n.b. |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 86 | 82 | 115 | 82 | 130 | 130 | 130 | 130 | 130 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 175 | 174 | 60 | 60 | 40 | 40 | 40 | 100 | 100 |
| Druckluftzufuhr [U] | 8 | 8 | 7,75 | 4 | 7,75 | 7,75 | 6,5 | 8 | 8 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 9 | 9 | 3 | 9 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 75/75 | 75/75 | 75/75 | 75/75 | 75/75 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 20 | 59 | 89 | 81 | 105 | 87 | 106 | 91 | 81 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 47,70 | 79,00 | 75,97 | 75,18 | 35,13 | 46,58 | 57,70 | 55,50 | 30,40 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 36,90 | 2,31 | 2,74 | 4,65 | 49,34 | 34,99 | 25,62 | 28,66 | 48,52 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 15,40 | 18,69 | 21,29 | 20,17 | 15,53 | 18,44 | 16,68 | 15,83 | 21,08 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 357,6 | 484,7 | 502,1 | 503,9 | 511,1 | 717,6 | 682,6 | 632,5 | 963,2 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 14,80 | 11,33 | 11,40 | 11,14 | 11,14 | 10,86 | 11,62 | 4,67 | 12,61 |
| Schwergut [%] | 15,77 | 11,83 | 12,17 | 12,18 | 17,06 | 15,65 | 11,67 | 12,02 | 9,34 |
| Leichtgut [%] | 20,88 | 41,00 | 39,50 | 31,87 | 16,42 | 15,64 | 20,57 | 19,14 | 12,23 |
| Feinstgut [%] | 37,84 | 41,86 | 41,39 | 40,95 | 43,17 | 44,11 | 45,42 | 40,13 | 37,09 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 17,02 | 16,99 | 17,63 | 16,55 | 16,55 | 16,38 | 16,54 | 16,35 | 16,44 |
| Schwergut [% TS] | 14,42 | 10,62 | 11,86 | 12,20 | 12,98 | 13,71 | 12,00 | 9,88 | 9,59 |
| Leichtgut [% TS] | 22,41 | 37,74 | 32,60 | 23,94 | 13,79 | 11,91 | 15,75 | 16,96 | 13,94 |
| Feinfraktion [% TS] | 40,96 | 35,18 | 35,09 | 34,80 | 35,63 | 37,18 | 37,63 | 36,44 | 30,55 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -15,29 | -37,49 | -32,73 | -26,28 | -21,57 | -16,30 | -27,45 | -39,57 | -41,67 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 10,90 | 7,69 | 11,24 | 9,10 | 9,10 | 6,61 | 6,82 | 8,78 | 8,23 |
| 2000-4000 µm | 23,07 | 22,26 | 23,88 | 22,99 | 22,99 | 19,34 | 20,11 | 21,83 | 22,13 |
| 1000-2000 µm | 21,03 | 22,55 | 20,98 | 21,52 | 21,52 | 22,46 | 22,95 | 20,60 | 23,67 |
| 500-1000 µm | 17,46 | 18,88 | 17,48 | 18,18 | 18,18 | 21,33 | 19,70 | 17,45 | 20,37 |
| 250-500 µm | 12,29 | 14,51 | 13,08 | 14,28 | 14,28 | 16,61 | 15,54 | 14,71 | 13,40 |
| 125-250 µm | 5,88 | 6,07 | 5,79 | 6,17 | 6,17 | 6,98 | 6,78 | 6,92 | 5,42 |
| 100-125 µm | 1,46 | 1,37 | 1,24 | 1,41 | 1,41 | 1,28 | 1,70 | 1,83 | 1,45 |
| 63-100 µm | 2,53 | 2,02 | 1,91 | 2,15 | 2,15 | 2,12 | 2,33 | 3,13 | 1,96 |
| < 63 µm | 5,38 | 4,65 | 4,40 | 4,21 | 4,21 | 3,27 | 4,07 | 4,75 | 3,37 |
| Δ RB₄ (%) Aufgabegut | 30,24 | 21,86 | 33,60 | 25,67 | 25,67 | 12,59 | 14,83 | 20,67 | 28,73 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,10 | 0,53 | 0,21 | 0,23 | 0,05 | 0,13 | 0,36 | 0,04 | 0,48 |
| 2000-4000 µm | 24,94 | 21,70 | 23,38 | 24,01 | 15,45 | 22,32 | 25,74 | 18,37 | 37,99 |
| 1000-2000 µm | 29,81 | 29,29 | 29,22 | 29,94 | 26,06 | 27,64 | 33,85 | 28,03 | 43,82 |
| 500-1000 µm | 28,80 | 25,64 | 23,93 | 23,89 | 25,79 | 20,26 | 21,41 | 26,40 | 9,94 |
| 250-500 µm | 13,05 | 17,07 | 17,36 | 15,89 | 21,55 | 16,72 | 11,14 | 18,25 | 5,28 |
| 125-250 µm | 2,94 | 5,26 | 5,42 | 5,46 | 9,68 | 9,89 | 5,76 | 7,39 | 1,91 |
| 100-125 µm | 0,16 | 0,18 | 0,11 | 0,23 | 0,84 | 2,07 | 1,01 | 1,05 | 0,30 |
| 63-100 µm | 0,09 | 0,12 | 0,19 | 0,13 | 0,25 | 0,49 | 0,45 | 0,23 | 0,13 |
| < 63 µm | 0,13 | 0,21 | 0,19 | 0,23 | 0,32 | 0,48 | 0,29 | 0,25 | 0,16 |
| Δ RB₄ (%) Schwergut | 42,32 | 32,82 | 32,19 | 34,10 | 17,06 | 17,20 | 42,02 | 24,09 | 92,61 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,15 | 0,08 | 0,12 | 0,09 | 0,04 | 0,00 | 0,00 | 0,06 | 0,03 |
| 2000-4000 µm | 18,65 | 2,94 | 2,40 | 1,75 | 14,90 | 9,78 | 5,07 | 16,11 | 11,18 |
| 1000-2000 µm | 23,81 | 6,87 | 5,74 | 8,69 | 30,68 | 29,54 | 13,98 | 26,34 | 25,77 |
| 500-1000 µm | 22,82 | 13,08 | 10,02 | 25,50 | 27,21 | 31,06 | 30,21 | 23,02 | 31,62 |
| 250-500 µm | 19,46 | 34,98 | 30,99 | 41,56 | 17,56 | 20,83 | 32,46 | 20,82 | 21,15 |
| 125-250 µm | 11,40 | 36,47 | 45,87 | 20,33 | 6,03 | 6,63 | 12,31 | 8,89 | 7,26 |
| 100-125 µm | 1,24 | 1,07 | 1,33 | 0,44 | 0,75 | 0,63 | 1,51 | 0,88 | 0,67 |
| 63-100 µm | 1,09 | 1,48 | 1,20 | 0,39 | 1,15 | 0,73 | 2,03 | 1,51 | 0,90 |
| < 63 µm | 1,38 | 3,04 | 2,32 | 1,26 | 1,70 | 0,80 | 2,43 | 2,37 | 1,42 |
| Δ RB₄ (%) Leichtgut | 8,41 | 124,08 | 139,50 | 91,92 | 26,02 | 30,35 | 62,76 | 11,06 | 28,02 |

Tabelle A 12: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material VS (2)

| | | | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Versuchsnummer: | VS 14 | VS 15 | VS 16 | VS 17 | VS 18 | VS 19 | VS 20 | VS 21 | VS 22 |
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 626 | 625 | 96 | 312 | 625 | 1000 | 312 | 312 | 1000 |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | n.b. | 34,87 | 41,73 | 42,74 | 45,65 | 46,64 | 43,9 | 43,27 | 47,45 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 130 | 115 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 100 | 100 | 80 | 80 | 80 | 80 | 100 | 175 | 175 |
| Druckluftzufuhr [U] | 8 | 8 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 |
| Wasserschieber K1/K2 | 75/75 | 75/75 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 69 | 74 | 63 | 63 | 59 | 55 | 89 | 94 | 82 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 25,76 | 78,90 | 72,84 | 70,64 | 72,86 | 70,74 | 67,28 | 76,03 | 69,68 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 56,08 | 2,86 | 7,18 | 10,40 | 8,06 | 9,52 | 12,14 | 4,88 | 6,38 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 18,16 | 18,24 | 19,98 | 18,96 | 19,08 | 19,74 | 20,58 | 19,09 | 23,94 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 608,7 | 626,0 | 510,0 | 540,4 | 555,1 | 482,7 | 561,1 | 558,4 | 468,3 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 7,72 | 11,65 | 10,53 | 5,50 | 3,00 | 7,51 | 7,08 | 7,32 | 4,14 |
| Schwergut [%] | 9,59 | 10,60 | 11,34 | 9,59 | 9,68 | 10,03 | 8,26 | 10,55 | 9,39 |
| Leichtgut [%] | 13,05 | 38,93 | 33,98 | 28,35 | 27,98 | 28,30 | 26,53 | 36,44 | 30,31 |
| Feinstgut [%] | 40,75 | 41,99 | 41,01 | 37,68 | 36,15 | 38,83 | 35,50 | 36,56 | 36,47 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 15,67 | 16,46 | 16,61 | 16,55 | 15,65 | 16,38 | 17,92 | 16,93 | 16,57 |
| Schwergut [% TS] | 9,62 | 11,42 | 10,15 | 11,03 | 10,13 | 10,20 | 10,62 | 12,09 | 11,22 |
| Leichtgut [% TS] | 14,25 | 30,14 | 25,18 | 22,79 | 21,40 | 21,34 | 23,81 | 26,98 | 25,08 |
| Feinfraktion [% TS] | 34,98 | 34,51 | 34,61 | 34,09 | 34,07 | 34,22 | 32,31 | 32,87 | 33,90 |
| Abnahme SLB im Schwergut [% SLB A] | -38,61 | -30,62 | -38,89 | -33,35 | -35,27 | -37,73 | -40,74 | -28,59 | -32,29 |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 6,47 | 7,65 | 8,64 | 7,01 | 7,19 | 10,68 | 12,38 | 10,78 | 12,01 |
| 2000-4000 µm | 17,97 | 20,02 | 21,95 | 20,43 | 19,31 | 21,14 | 20,46 | 20,87 | 24,06 |
| 1000-2000 µm | 19,70 | 22,58 | 21,03 | 21,26 | 19,93 | 19,21 | 18,56 | 19,15 | 19,40 |
| 500-1000 µm | 20,26 | 20,69 | 19,12 | 19,91 | 20,41 | 18,63 | 18,44 | 18,84 | 16,66 |
| 250-500 µm | 17,57 | 15,63 | 13,09 | 14,06 | 14,48 | 14,04 | 13,77 | 13,69 | 11,62 |
| 125-250 µm | 8,27 | 5,74 | 6,49 | 7,20 | 7,52 | 6,91 | 6,87 | 6,96 | 6,21 |
| 100-125 µm | 1,84 | 1,27 | 1,42 | 1,73 | 2,31 | 1,63 | 1,60 | 1,38 | 1,53 |
| 63-100 µm | 2,67 | 1,83 | 3,70 | 3,58 | 3,91 | 3,36 | 3,32 | 3,20 | 2,96 |
| < 63 µm | 5,24 | 4,60 | 4,58 | 4,82 | 4,94 | 4,40 | 4,61 | 5,13 | 5,54 |
| Δ RB₄ (%) Aufgabegut | 5,70 | 17,54 | 22,66 | 15,64 | 12,01 | 22,37 | 24,02 | 22,32 | 33,51 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,25 | 0,31 | 0,20 | 0,36 | 0,39 | 0,41 | 0,61 | 0,44 | 0,27 |
| 2000-4000 µm | 25,29 | 20,23 | 20,17 | 22,59 | 19,61 | 20,55 | 24,14 | 24,12 | 20,08 |
| 1000-2000 µm | 34,13 | 25,89 | 29,69 | 27,86 | 27,11 | 27,35 | 27,66 | 27,68 | 29,09 |
| 500-1000 µm | 20,02 | 24,67 | 26,75 | 25,02 | 26,68 | 26,05 | 24,40 | 24,28 | 26,46 |
| 250-500 µm | 12,76 | 19,06 | 17,37 | 17,77 | 19,17 | 18,28 | 17,00 | 17,46 | 18,25 |
| 125-250 µm | 6,49 | 8,51 | 5,21 | 5,54 | 6,22 | 6,55 | 5,32 | 5,08 | 5,31 |
| 100-125 µm | 0,62 | 0,70 | 0,08 | 0,21 | 0,22 | 0,37 | 0,15 | 0,13 | 0,14 |
| 63-100 µm | 0,24 | 0,36 | 0,32 | 0,30 | 0,28 | 0,19 | 0,34 | 0,36 | 0,18 |
| < 63 µm | 0,20 | 0,27 | 0,22 | 0,34 | 0,32 | 0,25 | 0,38 | 0,45 | 0,23 |
| Δ RB₄ (%) Schwergut | 39,49 | 19,29 | 32,81 | 29,46 | 26,00 | 26,49 | 30,42 | 30,32 | 31,27 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,04 | 0,11 | 0,10 | 0,06 | 0,16 | 0,07 | 0,07 | 0,10 | 0,23 |
| 2000-4000 µm | 10,69 | 4,58 | 3,61 | 3,98 | 7,22 | 4,05 | 3,12 | 2,96 | 12,04 |
| 1000-2000 µm | 23,86 | 13,01 | 11,22 | 11,09 | 13,42 | 11,09 | 8,89 | 5,79 | 15,74 |
| 500-1000 µm | 30,97 | 22,39 | 22,82 | 24,47 | 22,67 | 24,78 | 20,48 | 13,17 | 17,34 |
| 250-500 µm | 23,20 | 33,67 | 37,75 | 38,09 | 34,61 | 38,17 | 38,10 | 40,24 | 31,55 |
| 125-250 µm | 8,26 | 21,61 | 21,54 | 19,12 | 18,96 | 19,13 | 24,09 | 32,90 | 20,50 |
| 100-125 µm | 0,70 | 1,16 | 0,71 | 0,81 | 0,88 | 0,61 | 1,34 | 1,63 | 0,46 |
| 63-100 µm | 0,90 | 1,32 | 0,76 | 1,00 | 0,83 | 0,87 | 1,77 | 1,50 | 0,88 |
| < 63 µm | 1,39 | 2,15 | 1,51 | 1,37 | 1,26 | 1,23 | 2,14 | 1,71 | 1,27 |
| Δ RB₄ (%) Leichtgut | 26,87 | 81,62 | 86,07 | 81,37 | 68,18 | 80,38 | 99,37 | 121,67 | 55,38 |

Tabelle A 12: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material VS (3)

| | | | | | | | |
|---|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Versuchsnummer: | VS_23 | VS_24 | VS_25 | VS_26 | VS_27 | MW VS | s VS |
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 1000 | 312 | 312 | 312 | 312 | | |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 48,95 | 33,45 | 34,99 | 35,22 | n.b. | 41,57 | 5,29 |
| Setzmaschine: | | | | | | | |
| Setzbetthöhe/Schichtdicke [mm] | 100 | 120 | 120 | 120 | 120 | | |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 100 | 100 | 175 | 175 | 175 | | |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | 7,75 | | |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 15 | 15 | 15 | 15 | 15 | | |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. L.] | 6 | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | | |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | |
| Abseibung > 4mm [kg TS/h] | 47 | 73 | 23 | 72 | 181 | 76,67 | 30,97 |
| Schwertgut [% TS Anteil < 4mm] | 62,93 | 55,67 | 65,92 | 56,71 | 55,58 | 61,07 | 15,12 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 13,08 | 23,49 | 15,04 | 20,65 | 19,66 | 19,27 | 15,87 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 23,99 | 20,84 | 19,03 | 22,63 | 24,76 | 19,66 | 2,52 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 533,5 | 481,2 | 634,4 | 519,1 | 430,6 | 559,34 | 117,60 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 9,64 | 7,33 | 3,57 | 5,99 | n.b. | 8,66 | 3,21 |
| Schwertgut [%] | 9,43 | 10,26 | 10,30 | 12,27 | n.b. | 11,32 | 2,23 |
| Leichtgut [%] | 26,71 | 21,00 | 28,64 | 22,57 | n.b. | 26,37 | 8,30 |
| Feinstgut [%] | 37,90 | 35,59 | 32,25 | 35,58 | n.b. | 39,01 | 3,23 |
| HCL-lösliche Bestandteile | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 13,73 | 19,05 | 16,11 | 18,13 | 18,13 | 16,71 | 1,02 |
| Schwertgut [% TS] | 11,22 | 10,22 | 10,36 | 10,67 | 11,31 | 11,20 | 1,24 |
| Leichtgut [% TS] | 19,87 | 21,30 | 18,76 | 20,51 | 19,65 | 21,74 | 6,11 |
| Feinfraktion [% TS] | 34,78 | 30,11 | 28,95 | 24,62 | 29,05 | 33,76 | 3,32 |
| Abnahme SLB im Schwertgut [% SLB A] | -18,28 | -46,35 | -35,69 | -41,15 | -37,62 | -32,76 | 8,36 |
| Siebben/ Aufgabegut | | | | | | | |
| > 4000 µm | 9,57 | 6,23 | 8,26 | 10,14 | 10,14 | 8,94 | 1,80 |
| 2000-4000 µm | 23,60 | 18,45 | 17,64 | 22,35 | 22,35 | 21,27 | 1,84 |
| 1000-2000 µm | 21,26 | 20,74 | 19,78 | 20,98 | 20,98 | 20,95 | 1,29 |
| 500-1000 µm | 17,50 | 21,95 | 20,91 | 18,34 | 18,34 | 19,09 | 1,39 |
| 250-500 µm | 11,29 | 15,46 | 14,79 | 12,29 | 12,29 | 14,03 | 1,51 |
| 125-250 µm | 6,49 | 7,21 | 7,41 | 6,06 | 6,06 | 6,59 | 0,67 |
| 100-125 µm | 1,32 | 1,98 | 1,79 | 1,42 | 1,42 | 1,56 | 0,26 |
| 63-100 µm | 3,63 | 3,16 | 3,44 | 3,09 | 3,09 | 2,84 | 0,64 |
| < 63 µm | 5,34 | 4,82 | 5,99 | 5,32 | 5,32 | 4,74 | 0,64 |
| Δ RB_s (%) Aufgabegut | 29,87 | 8,84 | 10,34 | 27,26 | 27,26 | 21,44 | 7,80 |
| Siebben / Schwertgut | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,28 | 0,32 | 0,45 | 0,44 | 0,32 | 0,31 | 0,15 |
| 2000-4000 µm | 20,36 | 24,20 | 25,88 | 25,39 | 26,25 | 23,16 | 4,17 |
| 1000-2000 µm | 28,97 | 33,86 | 31,13 | 31,02 | 32,05 | 30,05 | 3,73 |
| 500-1000 µm | 27,83 | 26,06 | 25,35 | 25,58 | 24,31 | 24,33 | 3,71 |
| 250-500 µm | 17,45 | 12,74 | 13,66 | 14,06 | 13,23 | 15,85 | 3,39 |
| 125-250 µm | 4,59 | 2,38 | 2,86 | 2,87 | 3,08 | 5,38 | 2,10 |
| 100-125 µm | 0,14 | 0,05 | 0,15 | 0,14 | 0,13 | 0,40 | 0,46 |
| 63-100 µm | 0,13 | 0,18 | 0,22 | 0,19 | 0,25 | 0,24 | 0,10 |
| < 63 µm | 0,26 | 0,21 | 0,31 | 0,30 | 0,40 | 0,28 | 0,09 |
| Δ RB_s (%) Schwertgut | 33,43 | 47,62 | 45,18 | 43,79 | 46,36 | 35,49 | 15,00 |
| Leichtgut | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,15 | 0,04 | 0,07 | 0,25 | 0,25 | 0,10 | 0,07 |
| 2000-4000 µm | 8,08 | 5,84 | 7,47 | 11,73 | 11,62 | 7,82 | 4,72 |
| 1000-2000 µm | 16,92 | 15,07 | 12,38 | 15,77 | 16,42 | 15,74 | 7,30 |
| 500-1000 µm | 25,83 | 26,41 | 19,23 | 20,30 | 22,15 | 22,94 | 5,63 |
| 250-500 µm | 32,25 | 34,87 | 36,92 | 32,40 | 32,03 | 31,46 | 7,11 |
| 125-250 µm | 14,65 | 14,67 | 20,76 | 16,22 | 14,68 | 18,36 | 9,56 |
| 100-125 µm | 0,37 | 0,63 | 0,75 | 0,60 | 0,52 | 0,86 | 0,35 |
| 63-100 µm | 0,72 | 1,06 | 1,10 | 1,14 | 1,08 | 1,10 | 0,36 |
| < 63 µm | 1,04 | 1,41 | 1,32 | 1,61 | 1,24 | 1,62 | 0,52 |
| Δ RB_s (%) Leichtgut | 50,32 | 61,44 | 75,18 | 49,73 | 44,76 | 65,41 | 34,96 |

Tabelle A 13: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material SAL

| Versuchsnummer: | SAL 1 | SAL 2 | SAL 3 | SAL 4 | SAL 5 | SAL 6 | MW SAL | s SAL |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 628 | 628 | 94 | 94 | 1000 | 1000 | | |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | 37,73 | 47,37 | 31,48 | 27,7 | 33,73 | 31,62 | 34,94 | 6,31 |
| Setzmaschine: | | | | | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 133 | 133 | 138 | 138 | 138 | 138 | | |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 69 | 69 | 115 | 115 | 115 | 115 | | |
| Druckluftzufuhr [U] | 7,75 | 6 | 6 | 5 | 5 | 4 | | |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | 20 | | |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 | | |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | 100/50 | | |
| Eintrag/Austrag: | | | | | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 5 | 5 | 38 | 34 | 4 | 4 | 14,90 | 14,77 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 68,60 | 71,51 | 53,03 | 70,67 | 71,02 | 62,62 | 66,24 | 6,63 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 20,67 | 15,20 | 33,73 | 17,38 | 19,09 | 27,18 | 22,21 | 6,35 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 10,73 | 13,29 | 13,23 | 11,95 | 9,89 | 10,20 | 11,55 | 1,37 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 733,80 | 674,50 | 612,80 | 628,00 | 744,90 | 691,90 | 680,98 | 49,15 |
| Körnungsanalysen | | | | | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | | | | | |
| Aufgabegut [%] | 7,24 | 6,31 | 6,24 | 6,36 | 6,35 | 6,17 | 6,45 | 0,36 |
| Schwergut [%] | 5,35 | 5,98 | 8,19 | 9,54 | 8,13 | 8,83 | 7,67 | 1,50 |
| Leichtgut [%] | 23,96 | 22,75 | 15,98 | 23,12 | 21,52 | 32,03 | 23,23 | 4,72 |
| Feinstgut [%] | 33,27 | 33,58 | 32,47 | 33,45 | 32,62 | 32,82 | 33,04 | 0,42 |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 71,70 | 70,59 | 70,61 | 70,55 | 69,67 | 69,58 | | |
| Schwergut [% TS] | 71,58 | 70,71 | 70,50 | 70,85 | 69,74 | 70,41 | | |
| Leichtgut [% TS] | 70,56 | 70,17 | 70,36 | 69,92 | 69,20 | 69,15 | | |
| Feinfraktion [% TS] | 72,17 | 71,98 | 70,93 | 70,02 | 69,64 | 69,57 | | |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,59 | 0,68 | 0,55 | 0,39 | 0,57 | 0,48 | 0,54 | 0,09 |
| 2000-4000 µm | 29,40 | 30,44 | 33,96 | 34,11 | 32,17 | 31,87 | 31,99 | 1,71 |
| 1000-2000 µm | 28,87 | 29,12 | 27,53 | 27,97 | 28,33 | 29,16 | 28,50 | 0,61 |
| 500-1000 µm | 15,96 | 16,00 | 14,47 | 14,22 | 14,97 | 15,12 | 15,12 | 0,68 |
| 250-500 µm | 9,02 | 8,94 | 7,96 | 7,82 | 8,17 | 8,04 | 8,33 | 0,48 |
| 125-250 µm | 5,90 | 5,78 | 5,42 | 5,27 | 5,48 | 5,05 | 5,48 | 0,29 |
| 100-125 µm | 0,80 | 1,08 | 1,20 | 1,06 | 0,97 | 0,84 | 0,99 | 0,14 |
| 63-100 µm | 3,28 | 3,34 | 3,59 | 3,78 | 3,82 | 3,96 | 3,63 | 0,25 |
| < 63 µm | 6,18 | 4,62 | 5,32 | 5,38 | 5,53 | 5,48 | 5,42 | 0,46 |
| Δ RB₂ (%) Aufgabegut | 33,39 | 35,98 | 42,15 | 42,71 | 39,19 | 39,38 | 38,80 | 3,27 |
| Siebungen / Schwergut | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,03 | 0,12 | 0,28 | 0,10 | 0,06 | 0,25 | 0,14 | 0,09 |
| 2000-4000 µm | 41,29 | 38,71 | 43,62 | 31,83 | 40,50 | 45,41 | 40,23 | 4,33 |
| 1000-2000 µm | 40,63 | 36,68 | 34,86 | 39,48 | 38,02 | 35,57 | 37,54 | 2,06 |
| 500-1000 µm | 11,73 | 15,28 | 12,26 | 17,92 | 14,53 | 12,21 | 13,99 | 2,19 |
| 250-500 µm | 4,00 | 6,04 | 5,68 | 6,80 | 4,37 | 4,22 | 5,19 | 1,05 |
| 125-250 µm | 1,80 | 2,61 | 2,80 | 3,26 | 1,85 | 1,80 | 2,35 | 0,57 |
| 100-125 µm | 0,07 | 0,20 | 0,11 | 0,30 | 0,16 | 0,19 | 0,17 | 0,07 |
| 63-100 µm | 0,28 | 0,21 | 0,22 | 0,18 | 0,27 | 0,15 | 0,22 | 0,05 |
| < 63 µm | 0,16 | 0,15 | 0,18 | 0,14 | 0,24 | 0,21 | 0,18 | 0,04 |
| Δ RB₂ (%) Schwergut | 96,82 | 84,10 | 92,49 | 70,91 | 91,87 | 100,10 | 89,38 | 9,62 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | | | | | |
| > 4000 µm | 0,01 | 0,00 | 0,05 | 0,02 | 0,00 | 0,00 | 0,01 | 0,02 |
| 2000-4000 µm | 2,50 | 2,46 | 18,83 | 7,93 | 7,42 | 13,84 | 8,83 | 5,90 |
| 1000-2000 µm | 17,08 | 10,99 | 27,74 | 21,47 | 19,02 | 26,01 | 20,39 | 5,60 |
| 500-1000 µm | 32,91 | 27,95 | 23,09 | 25,24 | 24,98 | 23,86 | 26,34 | 3,30 |
| 250-500 µm | 23,19 | 26,60 | 14,66 | 21,87 | 21,70 | 16,87 | 20,82 | 3,97 |
| 125-250 µm | 14,71 | 19,98 | 9,84 | 14,72 | 15,64 | 11,21 | 14,35 | 3,26 |
| 100-125 µm | 4,34 | 5,78 | 2,01 | 4,14 | 4,19 | 3,21 | 3,95 | 1,15 |
| 63-100 µm | 3,48 | 4,65 | 2,6 | 3,45 | 5,03 | 3,15 | 3,73 | 0,85 |
| < 63 µm | 1,79 | 1,59 | 1,17 | 1,15 | 2,02 | 1,85 | 1,60 | 0,33 |
| Δ RB₂ (%) Leichtgut | 67,62 | 92,55 | 16,65 | 49,27 | 59,46 | 19,88 | 50,91 | 26,54 |

Tabelle A 14: Versuchsübersicht Anlageneinstellungen, Massenbilanzen und Ergebnisse der Körnungsanalysen: Material HAL

| Versuchsnummer: | HAL 1 | HAL 2 | MW HAL | s HAL |
|--|--------|--------|--------|-------|
| Eirichmischer Drehzahl [Upm]: | 94 | 94 | | |
| Energieaufnahme gesamt (kWh) | n.b. | n.b. | | |
| Setzmaschine: | | | | |
| Setzbethöhe/Schichtdicke [mm] | 138 | 130 | | |
| Setzfrequenz [Hubzahl] | 115 | 115 | | |
| Druckluftzufuhr [U] | 5 | 7,75 | | |
| max. Austrittsöffnung Wehr [mm] | 20 | 20 | | |
| Schwimmersteuerung [Einheiten v. l.] | 3 | 3 | | |
| Wasserschieber K1/K2 | 100/50 | 100/50 | | |
| Eintrag/Austrag: | | | | |
| Absiebung > 4mm [kg TS/h] | 66,40 | 52,18 | 59,29 | 7,11 |
| Schwergut [% TS Anteil < 4mm] | 70,64 | 70,79 | 70,72 | 0,08 |
| Leichtgut [% TS Anteil < 4mm] | 26,18 | 24,33 | 25,26 | 0,92 |
| Feinstgut [% TS Anteil < 4mm] | 3,18 | 4,89 | 4,04 | 0,85 |
| Durchsatz [kgTS/h] | 568,60 | 597,70 | 583,15 | 14,55 |
| Körnungsanalysen | | | | |
| Feuchtebestimmungen | | | | |
| Aufgabegut [%] | n.b. | n.b. | | |
| Schwergut [%] | n.b. | n.b. | | |
| Leichtgut [%] | n.b. | n.b. | | |
| Feinstgut [%] | n.b. | n.b. | | |
| HCL-lösliche Bestandteile (SLB) | | | | |
| Aufgabegut [% TS] | 69,59 | 69,57 | | |
| Schwergut [% TS] | 70,26 | 69,99 | | |
| Leichtgut [% TS] | 68,82 | 69,59 | | |
| Feinfraktion [% TS] | 68,99 | 67,34 | | |
| Siebungen/ Aufgabegut | | | | |
| > 4000 µm | 1,91 | 1,63 | 1,77 | 0,14 |
| 2000-4000 µm | 33,29 | 33,49 | 33,39 | 0,10 |
| 1000-2000 µm | 31,62 | 30,56 | 31,09 | 0,53 |
| 500-1000 µm | 17,86 | 18,27 | 18,07 | 0,21 |
| 250-500 µm | 9,15 | 9,89 | 9,52 | 0,37 |
| 125-250 µm | 4,10 | 4,28 | 4,19 | 0,09 |
| 100-125 µm | 0,31 | 0,34 | 0,33 | 0,02 |
| 63-100 µm | 0,93 | 0,84 | 0,89 | 0,04 |
| < 63 µm | 0,83 | 0,70 | 0,77 | 0,07 |
| Δ RB _s (%) Aufgabegut | 62,67 | 60,73 | 61,70 | 0,97 |
| Siebungen / Schwergut | | | | |
| > 4000 µm | 0,22 | 0,33 | 0,28 | 0,05 |
| 2000-4000 µm | 37,60 | 38,47 | 38,04 | 0,44 |
| 1000-2000 µm | 39,52 | 39,02 | 39,27 | 0,25 |
| 500-1000 µm | 16,20 | 14,76 | 15,48 | 0,72 |
| 250-500 µm | 4,73 | 5,45 | 5,09 | 0,36 |
| 125-250 µm | 1,42 | 1,66 | 1,54 | 0,12 |
| 100-125 µm | 0,03 | 0,04 | 0,04 | 0,01 |
| 63-100 µm | 0,14 | 0,14 | 0,14 | 0,00 |
| < 63 µm | 0,13 | 0,14 | 0,14 | 0,01 |
| Δ RB _s (%) Schwergut | 89,16 | 89,34 | 89,25 | 0,09 |
| Leichtgut / Siebungen | | | | |
| > 4000 µm | 0,04 | 0,02 | 0,03 | 0,01 |
| 2000-4000 µm | 12,20 | 17,72 | 14,96 | 2,76 |
| 1000-2000 µm | 24,99 | 36,60 | 30,80 | 5,80 |
| 500-1000 µm | 26,42 | 27,27 | 26,85 | 0,43 |
| 250-500 µm | 21,04 | 11,73 | 16,39 | 4,66 |
| 125-250 µm | 10,82 | 4,88 | 7,85 | 2,97 |
| 100-125 µm | 1,59 | 0,36 | 0,98 | 0,62 |
| 63-100 µm | 2,05 | 1,12 | 1,59 | 0,47 |
| < 63 µm | 0,86 | 0,31 | 0,59 | 0,28 |
| Δ RB _s (%) Leichtgut | 20,10 | 43,68 | 31,89 | 11,79 |

Tabelle A 15: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen - Gesteinskörnungen und Mörtel, Material BS (1)

| Versuchsnummer: | BS_05 | BS_07 | BS_08 | BS_09 | BS_10 | BS_11 | BS_12 | BS_13 | BS_14 | BS_15 | BS_17 | BS_18 | BS_19 | BS_25 | BS_26 | BS_27 | BS_28 | BS_29 | BS_32 | |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| Körnungsziffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial | 2,17 | 2,06 | 2,42 | 2,21 | 2,21 | 2,04 | 2,10 | 2,20 | n.b. | 2,11 | 2,21 | 2,23 | 2,14 | 2,31 | 2,10 | 1,95 | 1,97 | 2,03 | 2,29 | |
| Schwergut | 2,64 | 2,42 | 2,42 | 2,57 | 2,53 | 2,53 | 2,59 | 2,45 | 2,54 | 2,63 | 2,53 | 2,63 | 2,69 | 2,51 | 2,57 | 2,44 | 2,71 | 2,49 | 2,30 | |
| Leichtgut | 0,90 | 1,18 | 0,87 | 1,09 | 1,16 | 1,06 | 1,07 | n.b. | 0,87 | n.b. | 1,31 | n.b. | n.b. | 0,57 | 1,29 | 0,96 | 1,19 | 1,15 | n.b. | |
| Wasseraufnahme | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 10,06 | 9,23 | 9,66 | 9,79 | 9,79 | 9,84 | 9,90 | 9,29 | n.b. | 9,97 | 10,67 | 11,49 | 9,26 | 9,15 | 10,19 | 8,09 | 8,94 | 8,14 | 7,47 | |
| Schwergut [%] | 4,92 | 6,21 | 6,95 | 6,00 | 6,00 | 8,00 | 6,20 | 6,37 | 6,80 | 7,67 | 7,39 | 7,35 | 6,64 | 7,81 | 7,46 | 5,54 | 5,06 | 5,18 | 5,49 | |
| Leichtgut [%] | 15,33 | 9,11 | 7,97 | 8,67 | 8,27 | 10,69 | 11,50 | n.b. | 14,12 | n.b. | 11,13 | n.b. | n.b. | 13,79 | 14,50 | 16,22 | 11,93 | 8,81 | n.b. | |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [cm] | 51,0 | 64,5 | 66,0 | 61,5 | 63,0 | 50,0 | 55,5 | 46,5 | n.b. | 47,0 | 53,5 | 54,5 | 44,5 | 42,0 | 50,0 | 50,5 | 66,5 | 62,5 | 55,0 | |
| Schwergut [cm] | 36,5 | n.b. | n.b. | 48,0 | 44,0 | 59,0 | 48,5 | 50,0 | 51,5 | 53,0 | 52,5 | 51,0 | 44,0 | 51,0 | 58,0 | 44,0 | 39,0 | 48,0 | 48,0 | |
| Leichtgut [cm] | 37,5 | 39,5 | 37,0 | 47,5 | 51,0 | 35,5 | 40,0 | n.b. | 47,0 | n.b. | 48,5 | n.b. | n.b. | 70,0 | 41,5 | 39,5 | 33,0 | n.a. | n.b. | |
| Luftigkeit (10 min.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 4,70 | 1,50 | 1,40 | 1,20 | 1,50 | 4,10 | 3,30 | 4,40 | n.b. | 3,50 | 2,50 | 2,00 | 3,40 | 6,30 | 4,60 | 2,00 | 2,50 | 2,00 | 2,20 | |
| Schwergut [%] | 7,10 | 5,60 | 2,40 | 5,30 | 5,40 | 3,60 | 6,60 | 3,00 | 3,30 | 3,20 | 2,00 | 2,40 | 5,60 | 4,30 | 4,70 | 8,40 | 4,60 | 3,40 | 4,80 | |
| Leichtgut [%] | 6,00 | 4,30 | 5,00 | 2,70 | 3,40 | 8,40 | 7,00 | n.b. | 6,40 | n.b. | 5,60 | n.b. | n.b. | 1,60 | 8,20 | 9,60 | 10,00 | 8,40 | n.b. | |
| Rohdichte (28 Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 1,82 | 1,88 | 1,92 | 1,87 | 1,88 | 1,83 | 1,84 | 1,85 | n.b. | 1,84 | 1,84 | 1,85 | 1,85 | 1,82 | 1,82 | 1,85 | 1,84 | 1,88 | 1,85 | |
| Schwergut [g/cm ³] | 1,89 | 1,85 | 1,93 | 1,92 | 1,93 | 1,89 | 1,83 | 1,94 | 1,88 | 1,95 | 1,93 | 1,92 | 1,93 | 1,93 | 1,87 | 1,84 | 1,92 | 1,93 | 1,92 | |
| Leichtgut [g/cm ³] | 1,58 | 1,63 | 1,60 | 1,70 | 1,71 | 1,67 | 1,67 | n.b. | 1,66 | n.b. | 1,74 | n.b. | n.b. | 1,73 | 1,63 | 1,55 | 1,68 | 1,71 | n.b. | |
| Druckfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 16,9 | 20,8 | 24,2 | 17,5 | 18,1 | 17,6 | 15,3 | 16,0 | n.b. | 17,8 | 16,8 | 15,8 | 20,0 | 17,6 | 13,6 | 15,5 | 15,4 | 18,4 | 13,3 | |
| Schwergut [N/mm ²] | 15,9 | 18,2 | 17,2 | 21,2 | 22,9 | 15,6 | 12,1 | 20,8 | 16,3 | 21,6 | 19,3 | 19,0 | 20,5 | 22,2 | 12,9 | 16,6 | 17,5 | 15,0 | 17,6 | |
| Leichtgut [N/mm ²] | 11,8 | 12,7 | 10,1 | 14,8 | 13,0 | 17,4 | 13,8 | n.b. | 16,6 | n.b. | 19,5 | n.b. | n.b. | 22,2 | 12,2 | 9,9 | 16,8 | 17,0 | n.b. | |
| Biegezugfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 3,30 | 4,00 | 4,50 | 3,60 | 3,70 | 3,10 | 3,10 | 3,90 | n.b. | 3,10 | 3,40 | 3,40 | 3,70 | 3,10 | 2,60 | 2,80 | 3,30 | 3,60 | 2,80 | |
| Schwergut [N/mm ²] | 2,90 | 3,80 | 2,70 | 3,90 | 4,40 | 3,20 | 2,20 | 4,10 | 3,40 | 4,90 | 4,20 | 4,10 | 3,80 | 4,40 | 2,50 | 3,20 | 3,40 | 3,30 | 2,90 | |
| Leichtgut [N/mm ²] | 2,20 | 2,10 | 2,00 | 3,00 | 2,40 | 3,30 | 2,50 | n.b. | 3,20 | n.b. | 4,00 | n.b. | n.b. | 4,30 | 2,70 | 2,00 | 3,40 | 3,10 | n.b. | |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 11,400 | 14,700 | 16,500 | 13,400 | 14,200 | 12,100 | 11,100 | 12,800 | n.b. | 12,700 | 12,600 | 11,400 | 13,300 | 12,000 | 10,400 | 10,585 | 11,935 | 13,532 | 10,635 | |
| Schwergut [N/mm ²] | 12,800 | 14,400 | 15,600 | 16,300 | 17,300 | 14,500 | 10,600 | 16,400 | 14,400 | 18,100 | 14,900 | 15,600 | 15,900 | 16,400 | 11,100 | 12,761 | 13,796 | 13,427 | 13,489 | |
| Leichtgut [N/mm ²] | 7,200 | 7,900 | 6,700 | 8,900 | 8,500 | 10,800 | 8,100 | 9,200 | n.b. | 9,200 | n.b. | 11,100 | n.b. | n.b. | 11,300 | 8,000 | 6,810 | 10,044 | 10,458 | |

Tabelle A 15: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen - Gesteinskörnungen und Mörtel, Material BS (2)

| Versuchsnummer: | BS_38 | BS_39 | BS_41 | BS_42 | BS_43 | BS_44 | BS_45 | BS_46 | BS_47 | BS_51 | BS_53 | BS_54 | BS_55 | BS_56 | BS_58 | BS_61 | BS_62 | BS_63 | BS_67 |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Körnungsziffer | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial | 2,09 | 1,80 | 1,90 | 1,99 | 1,79 | 1,92 | 1,90 | 1,90 | 1,90 | 2,07 | 2,24 | 2,24 | 1,96 | 1,87 | 2,09 | n.b. | 2,06 | 1,94 | 2,15 |
| Schwergut | 2,29 | 2,10 | 2,60 | 2,62 | 2,47 | 2,34 | 2,64 | 2,34 | 2,63 | 2,84 | 2,54 | 2,5 | 3,38 | 2,26 | 2,44 | 2,44 | 2,34 | 2,34 | 2,4 |
| Leichtgut | 0,91 | 2,03 | 1,68 | 1,22 | 1,55 | 1,06 | 1,33 | 1,51 | 1,36 | 1,29 | 1,38 | 1,00 | 1,53 | 1,45 | 0,4 | 0,72 | 0,85 | 0,61 | 1,02 |
| Wasseraufnahme | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 6,37 | 5,36 | 5,66 | 6,26 | 7,56 | 7,37 | 7,20 | 7,20 | 7,20 | 5,24 | 7,75 | 7,75 | 6,56 | 6,65 | 8,5 | n.b. | 2,63 | 2,87 | 2,58 |
| Schwergut [%] | 5,37 | 5,84 | 5,23 | 4,39 | 5,65 | 5,08 | 4,96 | 5,44 | 5,14 | 4,69 | 5,69 | 6,05 | 3,78 | 3,76 | 6,26 | 3,85 | 2,34 | 2,53 | 3,68 |
| Leichtgut [%] | 13,84 | 5,69 | 8,89 | 7,76 | 8,31 | 8,64 | 8,01 | 7,25 | 5,07 | 8,78 | 10,38 | 12,54 | n.b. | 9,52 | 15,78 | 7,33 | 6,95 | 9,73 | 11,78 |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [cm] | 32,0 | n.b. | 54,0 | 26,0 | 39,5 | 43,0 | 37,5 | 37,5 | 37,5 | 33,5 | 37,5 | 37,5 | 40,0 | 33,5 | 41,0 | n.b. | n.a. | n.a. | n.a. |
| Schwergut [cm] | 51,5 | 47,5 | 48,5 | 37,0 | 41,5 | 45,5 | 42,5 | 39,5 | 43,0 | 41,5 | 46,0 | 48,0 | 35,0 | 39,5 | 44,5 | 40,0 | 35,0 | n.a. | 32,0 |
| Leichtgut [cm] | 33,0 | n.b. | 33,0 | 39,5 | 36,5 | 38,5 | 29,0 | 30,0 | n.b. | 29,5 | 30,5 | 37,5 | 47,5 | 33,5 | 29,0 | 38,0 | 39,5 | n.a. | n.a. |
| Luftigheit (10 min.) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 9,00 | 8,80 | 3,20 | 7,40 | 6,40 | 6,40 | 6,40 | 6,40 | 6,40 | 8,80 | 9,90 | 9,50 | 5,20 | 8,00 | 8,00 | n.b. | 6,00 | 6,00 | 7,10 |
| Schwergut [%] | 6,60 | 5,10 | 2,70 | 10,50 | 5,80 | 5,20 | 9,00 | 12,50 | 10,50 | 9,00 | 8,00 | 9,60 | 9,50 | 8,70 | 6,50 | 7,80 | 6,00 | 8,00 | 9,20 |
| Leichtgut [%] | 11,80 | n.b. | 9,30 | 9,40 | 9,00 | 6,00 | 12,00 | 10,00 | n.b. | 12,00 | 11,00 | 12,00 | 7,60 | 10,50 | 11,00 | 11,50 | 11,00 | 15,50 | 7,60 |
| Rohdichte (28 Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 1,83 | 1,84 | 1,77 | 1,85 | 1,79 | 1,83 | 1,82 | 1,82 | 1,82 | 1,84 | 1,79 | 1,79 | 1,65 | 1,76 | 1,80 | n.b. | 1,92 | 1,93 | 1,90 |
| Schwergut [g/cm ³] | 1,90 | 1,90 | 1,85 | 1,88 | 1,86 | 1,89 | 1,85 | 1,86 | 1,86 | 1,87 | 1,86 | 1,84 | 1,97 | 1,94 | 1,84 | 1,89 | 1,94 | 1,93 | 1,89 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 1,55 | n.b. | 1,74 | 1,73 | 1,76 | 1,65 | 1,65 | 1,69 | n.b. | 1,62 | 1,62 | 1,56 | 1,56 | 1,66 | 1,43 | 1,40 | 1,47 | 1,48 | 1,61 |
| Druckfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 24,7 | 24,6 | 14,5 | 24,9 | 21,8 | 21,9 | 21,9 | 21,9 | 21,9 | 22,2 | 18,2 | 18,2 | 20,3 | 16,9 | 15,3 | n.b. | 27,5 | 25,6 | 22,8 |
| Schwergut [N/mm ²] | 22,0 | 21,9 | 12,9 | 19,1 | 18,3 | 17,9 | 18,7 | 23,3 | 20,5 | 19,3 | 16,7 | 17,7 | 23,4 | 24,0 | 12,0 | 24,0 | 28,2 | 27,0 | 23,0 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 15,0 | n.b. | 19,2 | 20,3 | 20,1 | 16,4 | 17,5 | 17,7 | n.b. | 16,9 | 15,6 | 13,7 | 10,2 | 13,3 | 10,6 | 9,6 | 9,0 | 8,5 | 13,9 |
| Biegezugfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 4,70 | 4,20 | 2,90 | 5,00 | 4,20 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 4,40 | 3,50 | 3,50 | 4,20 | 3,60 | 3,60 | n.b. | 4,60 | 4,90 | 3,40 |
| Schwergut [N/mm ²] | 4,40 | 3,60 | 2,10 | 4,20 | 3,20 | 3,10 | 3,60 | 4,60 | 4,10 | 3,10 | 3,00 | 3,70 | 4,10 | 4,10 | 2,40 | 4,00 | 4,30 | 4,50 | 3,90 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 2,80 | n.b. | 3,60 | 3,60 | 3,90 | 2,90 | 4,00 | 2,70 | n.b. | 2,90 | 2,60 | 2,40 | 2,20 | 2,50 | 1,70 | 2,20 | 2,10 | 1,70 | 2,70 |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 14,699 | 14,952 | 10,545 | 14,855 | 13,588 | 14,023 | 13,659 | 13,659 | 13,659 | 13,800 | 12,600 | 12,600 | 13,640 | 11,816 | 12,773 | n.b. | 16,128 | 15,881 | 14,422 |
| Schwergut [N/mm ²] | 15,984 | 14,919 | 9,412 | 14,410 | 13,955 | 13,616 | 14,798 | 15,700 | 14,900 | 14,800 | 13,600 | 13,600 | 16,374 | 16,723 | 10,388 | 15,800 | 16,468 | 17,206 | 15,708 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 8,724 | n.b. | 11,495 | 11,710 | 12,007 | 9,842 | 10,951 | 11,165 | n.b. | 10,000 | 9,500 | 7,900 | 7,190 | 8,542 | 5,993 | 5,992 | 5,652 | 5,811 | 8,562 |

Tabelle A 15: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen - Gesteinskörnungen und Mörtel, Material BS (3)

| Versuchsnummer: | BS_69 | BS_71 | BS_72 | BS_73 | BS_74 | BS_80 | BS_82 | BS_92 | BS_93 | BS_108 | BS_109 | BS_113 | BS_119 | BS_122 | BS_123 | MW BS | s BS |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Körnungsziffer | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial | 1,94 | 2,03 | 2,03 | 1,92 | 1,92 | 2,11 | 1,91 | 1,88 | 1,87 | 2,11 | 2,11 | 1,88 | 2,06 | 2,05 | 2,05 | 2,05 | 0,14 |
| Schwergut | 2,28 | 2,29 | 2,41 | 2,18 | 2,15 | 2,33 | 2,17 | 2,38 | 2,47 | 2,47 | 2,55 | 2,34 | 2,49 | 2,52 | 2,22 | 2,49 | 0,24 |
| Leichtgut | 0,87 | 0,81 | 0,72 | 1,00 | 0,33 | 0,77 | 0,82 | 0,75 | 0,71 | 0,75 | 0,77 | 0,81 | 1,06 | 0,80 | 0,17 | 1,01 | 0,36 |
| Wasseraufnahme | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 6,54 | 4,65 | 4,65 | 5,47 | 5,47 | 7,50 | 7,00 | n.b. | n.b. | n.b. | 7,18 | n.b. | 8,04 | 6,32 | 6,32 | 7,47 | 2,08 |
| Schwergut [%] | 2,80 | 4,85 | 4,68 | 5,55 | 4,37 | 5,20 | 6,30 | 4,62 | 5,30 | n.b. | 3,47 | 4,53 | 6,26 | n.b. | n.b. | 5,41 | 1,32 |
| Leichtgut [%] | 12,89 | 7,74 | 10,75 | 13,51 | 27,50 | 13,55 | 16,20 | 13,57 | 14,21 | n.b. | n.b. | 6,73 | n.b. | n.b. | n.b. | 11,07 | 3,95 |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [cm] | 33,0 | 35,0 | 35,0 | n.a. | 30,5 | 34,5 | 37,5 | 39,0 | 47,5 | n.b. | n.b. | 34,5 | 42,5 | 33,0 | 33,0 | 44,1 | 10,48 |
| Schwergut [cm] | 32,5 | 40,5 | 38,5 | 41,0 | 39,0 | 44,5 | 40,0 | 35,0 | 38,5 | 32,0 | 40,0 | 54,5 | 41,0 | n.a. | n.a. | 43,8 | 6,52 |
| Leichtgut [cm] | n.a. | n.a. | n.a. | 30,0 | 28,5 | 34,5 | 33,5 | n.a. | 42,5 | 34,0 | 35,0 | 31,5 | 33,0 | 39,5 | 34,5 | 37,7 | 7,78 |
| Luftgehalt (10 min.) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 8,80 | 8,20 | 8,20 | 7,00 | 7,00 | 7,80 | 7,40 | 7,60 | 5,60 | n.b. | n.b. | 7,60 | 6,40 | 8,50 | 8,50 | 5,72 | 2,52 |
| Schwergut [%] | 7,70 | 7,00 | 7,60 | 9,20 | 7,60 | 8,00 | 6,60 | 6,70 | 7,00 | 10,50 | 11,00 | 5,60 | 5,20 | 8,20 | 9,00 | 6,66 | 2,47 |
| Leichtgut [%] | 9,30 | 8,90 | 7,00 | 11,40 | 14,00 | 9,60 | 10,90 | 8,90 | 8,70 | 11,00 | 10,50 | 9,80 | 9,50 | 7,20 | 9,80 | 8,93 | 2,79 |
| Rohdichte (28 Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm³] | 1,83 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,86 | 1,83 | 1,85 | 1,81 | 1,81 | 1,81 | 1,81 | 1,86 | 1,85 | 1,84 | 1,84 | 1,84 | 0,03 |
| Schwergut [g/cm³] | 1,95 | 1,89 | 1,90 | 1,85 | 1,85 | 1,86 | 1,81 | 1,88 | 1,87 | 1,85 | 1,85 | 1,86 | 1,91 | 1,87 | 1,87 | 1,89 | 0,04 |
| Leichtgut [g/cm³] | 1,61 | 1,65 | 1,45 | 1,57 | 1,35 | 1,50 | 1,38 | 1,60 | 1,49 | 1,43 | 1,40 | 1,52 | 1,55 | 1,56 | 1,36 | 1,58 | 0,11 |
| Druckfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm²] | 19,8 | 21,9 | 21,9 | 19,2 | 19,2 | 19,1 | 19,3 | 16,3 | 14,0 | 18,3 | 18,3 | 20,1 | 19,3 | 21,1 | 21,1 | 19,4 | 3,20 |
| Schwergut [N/mm²] | 26,1 | 21,5 | 16,1 | 17,5 | 24,1 | 15,7 | 18,6 | 19,4 | 14,0 | 13,8 | 19,6 | 13,6 | 19,3 | 13,7 | 20,4 | 18,9 | 3,82 |
| Leichtgut [N/mm²] | 14,2 | 14,1 | 6,4 | 12,7 | 9,8 | 8,9 | 8,5 | 14,7 | 8,6 | 5,4 | 4,5 | 9,0 | 9,7 | 9,9 | 7,7 | 13,0 | 4,19 |
| Biegezugfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm²] | 3,40 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 4,00 | 3,60 | 3,50 | 3,20 | 2,80 | 3,40 | 3,40 | 3,70 | 3,80 | 4,00 | 4,00 | 3,72 | 0,58 |
| Schwergut [N/mm²] | 4,80 | 4,00 | 3,00 | 3,30 | 4,10 | 2,90 | 3,20 | 2,73 | 2,30 | 2,73 | 3,60 | 2,80 | 2,80 | 4,10 | 4,10 | 3,65 | 0,70 |
| Leichtgut [N/mm²] | 2,70 | 2,20 | 1,30 | 2,60 | 1,90 | 1,60 | 1,70 | 2,40 | 1,50 | 1,20 | 1,00 | 1,90 | 1,80 | 2,00 | 1,40 | 2,48 | 0,78 |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm²] | 12,711 | 14,095 | 14,095 | 12,979 | 12,979 | 12,338 | 11,990 | 11,092 | 9,803 | 11,953 | 11,953 | 12,681 | 12,835 | 13,121 | 13,121 | 12,950 | 1,458 |
| Schwergut [N/mm²] | 16,730 | 14,844 | 12,693 | 12,653 | 14,850 | 11,555 | 11,687 | 13,579 | 11,531 | 12,845 | 12,845 | 11,119 | 12,553 | 11,047 | 14,086 | 14,204 | 1,983 |
| Leichtgut [N/mm²] | 8,734 | 8,920 | 5,465 | 7,675 | 5,054 | 5,516 | 4,885 | 8,146 | 5,171 | 4,007 | 2,354 | 5,903 | 5,862 | 6,349 | 4,503 | 7,917 | 2,327 |

Tabelle A 16: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen - Gesteinskörnungen und Mörtel, Material REM

| Versuchsnummer: | REM_1 | REM_2 | REM_5 | REM_9 | REM_13 | REM_14 | REM_15 | REM_16 | REM_18 | REM_19 | REM_21 | REM_23 | REM_24 | REM_25 | MW REM | s REM |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Körnungsziffer | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial | 2,97 | 3,10 | 3,08 | 2,93 | 3,27 | 2,96 | 2,91 | 3,73 | 2,85 | 2,99 | 2,86 | 2,86 | 3,16 | 3,38 | 3,08 | 0,23 |
| Schwergut | 2,81 | 2,92 | 2,44 | 2,47 | 2,53 | 2,78 | 2,74 | 2,72 | 2,62 | 2,45 | 2,56 | 2,24 | 2,71 | 2,70 | 2,62 | 0,18 |
| Leichtgut | 1,85 | 2,22 | 1,31 | 2,44 | 1,62 | 2,16 | 2,20 | 2,40 | 1,91 | 2,41 | 1,65 | 2,31 | 0,80 | 0,98 | 1,88 | 0,52 |
| Wasseraufnahme | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 5,39 | 5,64 | 5,72 | 6,40 | 4,47 | 6,54 | 4,42 | 3,42 | 6,13 | 5,71 | 5,15 | 6,21 | 5,08 | 5,06 | 5,38 | 0,83 |
| Schwergut [%] | 3,22 | 3,15 | 4,80 | 3,10 | 4,13 | 3,58 | 3,34 | 3,42 | 4,80 | 4,24 | 4,67 | 3,75 | 4,88 | 4,54 | 3,96 | 0,64 |
| Leichtgut [%] | 5,94 | 6,22 | 9,97 | 5,38 | 9,49 | 7,03 | 6,58 | 6,59 | 7,79 | 5,86 | 9,51 | 6,69 | 13,12 | 11,66 | 7,99 | 2,29 |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [cm] | 44,50 | 44,00 | 44,50 | 44,00 | 43,50 | 48,00 | 31,50 | n.a. | 50,00 | 52,00 | 50,50 | 55,55 | 34,50 | 42,00 | 44,97 | 6,39 |
| Schwergut [cm] | 50,50 | 47,00 | 46,50 | 55,00 | 51,50 | 51,00 | 11,00 | 41,50 | 50,00 | 54,40 | 52,00 | 50,50 | 39,50 | 38,50 | 45,64 | 10,83 |
| Leichtgut [cm] | 43,00 | 49,50 | n.a. | 39,50 | 28,00 | 37,00 | 40,00 | 42,50 | 41,50 | 44,00 | 39,00 | 55,00 | n.a. | 33,50 | 41,04 | 6,66 |
| Luftgehalt (10 min.) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 9,00 | 10,50 | 2,70 | 2,50 | 10,00 | 5,50 | 5,40 | 4,50 | 10,00 | 5,40 | 8,50 | 8,20 | 6,40 | 5,80 | 6,74 | 2,55 |
| Schwergut [%] | 13,00 | 13,00 | 9,80 | 5,60 | 9,90 | 5,40 | 7,40 | 9,00 | 9,00 | 7,50 | 9,80 | 10,20 | 5,90 | 6,00 | 8,68 | 2,42 |
| Leichtgut [%] | 9,10 | 8,00 | 12,00 | 6,40 | 10,00 | 8,50 | 10,10 | 10,20 | 9,60 | 11,00 | 11,00 | 11,00 | 13,00 | 11,00 | 10,06 | 1,63 |
| Reibliche (28 Tage) | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 1,84 | 1,85 | 2,01 | 1,92 | 1,87 | 1,91 | 1,89 | 2,01 | 1,88 | 1,87 | 1,89 | 1,85 | 1,88 | 1,88 | 1,90 | 0,06 |
| Schwergut [g/cm ³] | 1,76 | 1,77 | 1,85 | 2,03 | 1,84 | 1,90 | 1,92 | 2,00 | 1,83 | 1,83 | 1,82 | 1,82 | 1,92 | 1,94 | 1,87 | 0,08 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 1,70 | 1,76 | 1,54 | 1,82 | 1,57 | 1,76 | 1,73 | 1,71 | 1,69 | 1,76 | 1,52 | 1,75 | 1,53 | 1,51 | 1,67 | 0,10 |
| Druckfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 14,30 | 13,90 | 21,00 | 16,90 | 11,10 | 15,50 | 24,10 | 21,60 | 15,00 | 12,90 | 13,80 | 11,20 | 13,60 | 13,40 | 15,59 | 3,81 |
| Schwergut [N/mm ²] | 12,20 | 11,90 | 16,60 | 17,30 | 14,90 | 15,90 | 14,70 | 21,40 | 14,10 | 14,90 | 13,10 | 17,70 | 21,90 | 22,00 | 16,33 | 3,28 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 16,90 | 15,30 | 12,70 | 18,30 | 10,50 | 15,10 | 13,00 | 11,90 | 12,70 | 14,90 | 9,10 | 13,80 | 13,80 | 13,10 | 13,65 | 2,31 |
| Biegezugfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 2,80 | 2,80 | 3,90 | 3,30 | 2,40 | 3,00 | 4,10 | 3,20 | 3,40 | 2,50 | 2,70 | 2,70 | 2,90 | 2,70 | 3,03 | 0,48 |
| Schwergut [N/mm ²] | 2,70 | 2,50 | 3,30 | 3,00 | 3,10 | 3,00 | 4,80 | 4,00 | 3,00 | 3,40 | 2,90 | 3,40 | 4,20 | 4,50 | 3,41 | 0,67 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 3,90 | 3,30 | 2,50 | 3,30 | 2,40 | 3,00 | 2,40 | 2,30 | 2,50 | 3,00 | 2,30 | 3,00 | 3,20 | 2,90 | 2,86 | 0,46 |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 12,300 | 12,300 | 15,769 | 13,711 | 12,145 | 13,090 | 17,264 | 16,838 | 12,909 | 12,888 | 12,764 | 11,653 | 11,892 | 12,015 | 13,367 | 1,798 |
| Schwergut [N/mm ²] | 12,000 | 12,100 | 13,480 | 15,957 | 13,179 | 14,010 | 13,993 | 17,215 | 12,863 | 13,642 | 11,890 | 13,869 | 15,669 | 15,796 | 13,963 | 1,582 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 11,500 | 12,300 | 7,895 | 12,962 | 7,845 | 10,957 | 10,185 | 10,225 | 9,203 | 13,942 | 7,240 | 10,991 | 8,232 | 7,626 | 10,057 | 2,028 |

Tabelle A 17: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen -
Gesteinskörnungen und Mörtel, Materialien VS und Natursand

| Versuchsnummer: | Natursand | VS 02 | VS 03 | VS 04 | VS 12 | VS 14 | VS 15 | VS 21 | VS 25 | VS 26 | VS 27 | MW VS | s VS |
|---------------------------------------|-----------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Körnungsziffer | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial | | 2,58 | 2,75 | 2,42 | 2,19 | 2,32 | 2,40 | 2,56 | 2,71 | 2,83 | 2,95 | 2,57 | 0,23 |
| Schwergut | | 2,29 | 2,33 | 2,37 | 3,08 | 2,73 | 2,32 | 2,50 | 2,60 | 2,54 | 2,64 | 2,54 | 0,23 |
| | 2,16 | | | | | | | | | | | | |
| Wasseraufnahme | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | | 5,82 | 8,56 | 8,63 | 6,06 | 5,67 | 6,61 | 8,94 | 8,02 | 7,92 | 7,82 | 7,41 | 1,18 |
| Schwergut [%] | | 4,17 | 4,14 | 4,18 | 2,73 | 2,89 | 3,47 | 3,64 | 3,78 | 3,93 | 3,17 | 3,62 | 0,49 |
| | n.b. | | | | | | | | | | | | |
| Ausbreitmaß (DN 1048, 10 min) | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [cm] | | 34,00 | 44,50 | 49,00 | 45,50 | 29,50 | 36,50 | 46,00 | 37,50 | 35,50 | 33,50 | 39,15 | 6,23 |
| Schwergut [cm] | | 52,50 | 47,00 | 55,00 | 42,50 | 59,00 | 51,50 | 49,00 | 49,00 | 48,50 | 41,50 | 49,55 | 5,04 |
| | 39,00 | | | | | | | | | | | | |
| Luftgehalt (10 min.) | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | | 4,50 | 4,00 | 3,60 | 5,40 | 4,30 | 4,60 | 3,90 | 3,00 | 3,45 | 3,90 | 4,07 | 0,64 |
| Schwergut [%] | | 2,80 | 3,40 | 6,90 | 4,80 | 4,40 | 5,80 | 5,80 | 4,30 | 4,50 | 6,00 | 4,87 | 1,19 |
| | 3,70 | | | | | | | | | | | | |
| Rohdichte (28 Tage) | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | | 1,96 | 1,88 | 1,85 | 1,86 | 1,94 | 1,91 | 1,87 | 1,92 | 1,92 | 1,91 | 1,90 | 0,03 |
| Schwergut [g/cm ³] | | 1,95 | 1,99 | 1,97 | 1,96 | 2,00 | 1,98 | 1,94 | 1,98 | 2,02 | 1,97 | 1,98 | 0,02 |
| | 2,11 | | | | | | | | | | | | |
| Druckfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | | 22,80 | 17,20 | 16,20 | 17,60 | 26,40 | 23,60 | 18,20 | 15,90 | 16,40 | 16,90 | 19,12 | 3,53 |
| Schwergut [N/mm ²] | | 13,50 | 13,90 | 17,10 | 12,30 | 18,70 | 20,60 | 23,30 | 19,00 | 19,90 | 21,30 | 17,96 | 3,48 |
| | 22,70 | | | | | | | | | | | | |
| Biegezugfestigkeit, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | | 4,00 | 3,10 | 3,30 | 3,40 | 4,90 | 4,80 | 3,70 | 2,80 | 3,05 | 3,30 | 3,64 | 0,69 |
| Schwergut [N/mm ²] | | 2,80 | 2,60 | 2,70 | 1,60 | 3,80 | 4,00 | 4,20 | 3,30 | 3,70 | 4,20 | 3,29 | 0,81 |
| | 4,60 | | | | | | | | | | | | |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | | 14,659 | 11,932 | 12,154 | 12,933 | 15,700 | 14,900 | 12,400 | 12,691 | 17,806 | 17,806 | 13,098 | 1,968 |
| Schwergut [N/mm ²] | | 12,970 | 13,266 | 14,776 | 12,812 | 17,900 | 16,300 | 17,386 | 15,891 | 16,159 | 16,290 | 15,375 | 1,736 |
| | 23,200 | | | | | | | | | | | | |

Tabelle A 18: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen - Gesteinskörnungen und Mörtel, Materialien HAL und SAL

| Versuchsnummer: | HAL 1 | SAL 4 | SAL 5 | MW SAL | s SAL |
|---------------------------------------|--------|--------|--------|--------|-------|
| Körnungsziffer | | | | | |
| Ausgangsmaterial | 2,62 | 2,54 | 2,56 | 2,55 | 0,0 |
| Schwergut | 2,94 | 2,92 | 3,04 | 2,98 | 0,1 |
| Leichtgut | 1,86 | 1,44 | 1,55 | 1,50 | 0,1 |
| Wasseraufnahme | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 4,02 | 5,65 | 5,54 | 5,60 | 0,1 |
| Schwergut [%] | 3,99 | 3,65 | 4,02 | 3,84 | 0,2 |
| Leichtgut [%] | 5,71 | 9,91 | 8,92 | 9,42 | 0,5 |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) | | | | | |
| Ausgangsmaterial [cm] | 40,0 | 52,0 | 54,0 | 53,00 | 1,0 |
| Schwergut [cm] | 41,5 | 48,0 | 49,0 | 48,50 | 0,5 |
| Leichtgut [cm] | 39,0 | 75,0 | 62,0 | 68,50 | 6,5 |
| Luftgehalt (10 min.) | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 9,40 | 3,20 | 2,80 | 3,00 | 0,2 |
| Schwergut [%] | 8,60 | 1,70 | 2,90 | 2,30 | 0,6 |
| Leichtgut [%] | 9,40 | 1,80 | 3,00 | 2,40 | 0,6 |
| Rohdichte (28 Tage) | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 1,89 | 2,01 | 2,03 | 2,02 | 0,0 |
| Schwergut [g/cm ³] | 2,02 | 2,11 | 2,13 | 2,12 | 0,0 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 1,70 | 1,88 | 1,87 | 1,88 | 0,0 |
| Druckfestigkeit, 28 Tage | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 15,8 | 21,0 | 17,9 | 19,45 | 1,6 |
| Schwergut [N/mm ²] | 14,3 | 18,3 | 19,0 | 18,65 | 0,4 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 13,1 | 16,9 | 18,2 | 17,55 | 0,7 |
| Biegezugfestigkeit, 28 Tage | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 2,80 | 4,50 | 3,30 | 3,90 | 0,6 |
| Schwergut [N/mm ²] | 2,70 | 3,90 | 3,70 | 3,80 | 0,1 |
| Leichtgut [N/mm ²] | n.b. | 3,10 | 3,40 | 3,25 | 0,2 |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage | | | | | |
| Ausgangsmaterial [N/mm ²] | 11.588 | 17.185 | 15.848 | 16.517 | 668,5 |
| Schwergut [N/mm ²] | 13.407 | 19.601 | 19.735 | 19.668 | 67,0 |
| Leichtgut [N/mm ²] | 8.514 | 12.454 | 12.661 | 12.558 | 103,5 |

Tabelle A 19: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Material BS (1)

| Versuchsnummer: | BS_05 | BS_07 | BS_08 | BS_09 | BS_10 | BS_11 | BS_12 | BS_13 | BS_14 | BS_15 | BS_17 | BS_18 | BS_19 | BS_25 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ausgangsmaterial | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,17 | 2,06 | 2,42 | 2,21 | 2,21 | 2,04 | 2,10 | 2,20 | 2,11 | 2,11 | 2,21 | 2,23 | 2,14 | 2,31 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 10,06 | 9,23 | 9,66 | 9,79 | 9,79 | 9,84 | 9,90 | 9,29 | 9,97 | 9,97 | 10,67 | 11,49 | 9,26 | 9,15 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,08 | 4,15 | 3,93 | 4,05 | 4,05 | 4,17 | 4,12 | 4,06 | 4,12 | 4,12 | 4,05 | 4,05 | 4,10 | 3,99 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,83 | 3,71 | 3,69 | 3,82 | 3,82 | 3,87 | 3,79 | 3,75 | 3,87 | 3,87 | 3,94 | 4,06 | 3,76 | 3,71 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,45 | 2,49 | 2,36 | 2,43 | 2,43 | 2,50 | 2,47 | 2,44 | 2,47 | 2,47 | 2,43 | 2,43 | 2,46 | 2,40 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,39 | 1,22 | 1,33 | 1,39 | 1,39 | 1,37 | 1,32 | 1,32 | 1,40 | 1,40 | 1,51 | 1,63 | 1,30 | 1,31 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 13,77 | 13,16 | 13,76 | 14,18 | 14,18 | 13,93 | 13,31 | 14,16 | 14,04 | 14,04 | 14,18 | 14,18 | 14,08 | 14,31 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 21,68 | 21,01 | 21,38 | 22,05 | 22,05 | 21,97 | 21,22 | 21,97 | 22,03 | 22,03 | 22,18 | 22,29 | 21,94 | 22,00 |
| Schwergut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,64 | 2,49 | 2,42 | 2,57 | 2,53 | 2,53 | 2,59 | 2,45 | 2,54 | 2,63 | 2,53 | 2,60 | 2,69 | 2,51 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 4,92 | 6,21 | 6,95 | 6,00 | 6,00 | 6,00 | 6,20 | 6,37 | 6,80 | 7,67 | 7,39 | 7,35 | 6,64 | 7,81 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 7,60 | 7,76 | 7,70 | 7,67 | 7,60 | 7,73 | 7,66 | 7,65 | 7,70 | 7,60 | 7,27 | 7,39 | 7,53 | 7,73 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 5,97 | 6,48 | 6,56 | 6,34 | 6,29 | 6,87 | 6,36 | 6,37 | 6,52 | 6,79 | 6,30 | 6,50 | 6,46 | 6,89 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 4,56 | 4,66 | 4,62 | 4,62 | 4,56 | 4,64 | 4,59 | 4,59 | 4,56 | 4,56 | 4,36 | 4,43 | 4,52 | 4,64 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,41 | 1,82 | 1,94 | 1,72 | 1,73 | 2,23 | 1,77 | 1,78 | 2,23 | 2,23 | 1,94 | 2,07 | 1,93 | 2,25 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 28,65 | 29,23 | 27,96 | 28,73 | 28,88 | 27,88 | 28,52 | 27,94 | 27,96 | 29,11 | 26,20 | 28,10 | 29,26 | 28,82 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 42,21 | 43,46 | 42,22 | 42,74 | 42,77 | 42,49 | 42,54 | 41,95 | 42,18 | 43,51 | 39,76 | 41,98 | 43,25 | 43,45 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 0,90 | 1,18 | 0,87 | 1,09 | 1,16 | 1,06 | 1,07 | | 0,87 | | 1,31 | | | 0,57 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 15,33 | 9,11 | 7,97 | 8,67 | 8,27 | 10,69 | 11,50 | | 14,12 | | 11,13 | | | 13,79 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,98 | 4,76 | 5,01 | 4,83 | 4,78 | 4,85 | 4,85 | | 5,00 | | 4,67 | | | 5,25 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 4,68 | 3,91 | 3,92 | 3,88 | 3,82 | 4,17 | 4,21 | | 4,46 | | 4,03 | | | 4,50 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,99 | 2,86 | 3,00 | 2,90 | 2,87 | 2,91 | 2,91 | | 3,00 | | 2,80 | | | 3,15 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,69 | 1,05 | 0,92 | 0,98 | 0,95 | 1,26 | 1,30 | | 1,46 | | 1,23 | | | 1,35 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | | 0,60 | | 0,60 | | | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 11,03 | 11,49 | 11,52 | 11,34 | 11,45 | 11,58 | 11,31 | | 10,32 | | 11,01 | | | 9,80 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 20,70 | 20,16 | 20,44 | 20,06 | 20,05 | 20,59 | 20,37 | | 19,78 | | 19,71 | | | 19,55 |

Tabelle A 19: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Material BS (2)

| Versuchsnummer: | BS_26 | BS_27 | BS_28 | BS_29 | BS_32 | BS_38 | BS_39 | BS_41 | BS_42 | BS_43 | BS_44 | BS_45 | BS_46 | BS_47 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ausgangsmaterial | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,10 | 1,95 | 1,97 | 2,03 | 2,29 | 2,09 | 1,88 | 1,90 | 1,99 | 1,79 | 1,92 | 1,90 | 1,90 | 1,90 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 10,19 | 8,09 | 8,94 | 8,14 | 7,47 | 6,37 | 5,36 | 5,56 | 6,26 | 7,56 | 7,37 | 7,20 | 7,20 | 7,20 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,12 | 4,22 | 4,21 | 4,17 | 4,01 | 4,13 | 4,27 | 4,25 | 4,19 | 4,33 | 4,24 | 4,25 | 4,25 | 4,25 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,87 | 3,62 | 3,73 | 3,61 | 3,44 | 3,35 | 3,28 | 3,30 | 3,36 | 3,60 | 3,53 | 3,52 | 3,52 | 3,52 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,47 | 2,53 | 2,52 | 2,50 | 2,40 | 2,48 | 2,56 | 2,55 | 2,52 | 2,60 | 2,54 | 2,55 | 2,55 | 2,55 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,39 | 1,09 | 1,21 | 1,11 | 1,04 | 0,87 | 0,72 | 0,75 | 0,85 | 1,00 | 0,99 | 0,97 | 0,97 | 0,97 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 13,68 | 13,47 | 13,50 | 13,58 | 13,93 | 13,66 | 13,37 | 13,40 | 13,53 | 13,24 | 13,43 | 13,40 | 13,40 | 13,40 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 21,67 | 21,31 | 21,44 | 21,36 | 21,38 | 21,14 | 20,92 | 20,95 | 21,08 | 21,17 | 21,20 | 21,17 | 21,17 | 21,17 |
| Schwergut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,57 | 2,44 | 2,71 | 2,49 | 2,30 | 2,29 | 2,10 | 2,60 | 2,62 | 2,47 | 2,34 | 2,64 | 2,34 | 2,53 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 7,45 | 5,54 | 5,06 | 5,18 | 5,49 | 5,37 | 5,94 | 5,23 | 4,39 | 5,65 | 5,08 | 4,96 | 5,44 | 5,14 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 7,68 | 7,83 | 7,52 | 7,77 | 8,00 | 8,01 | 8,25 | 7,64 | 7,62 | 7,80 | 7,95 | 7,60 | 7,95 | 7,73 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 6,73 | 6,28 | 5,99 | 6,15 | 6,35 | 6,32 | 6,59 | 6,10 | 5,45 | 6,24 | 6,21 | 6,00 | 6,31 | 6,12 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 4,61 | 4,70 | 4,51 | 4,66 | 4,80 | 4,81 | 4,95 | 4,59 | 4,57 | 4,68 | 4,77 | 4,56 | 4,77 | 4,63 |
| Wasseraufnahme [kg] | 2,12 | 1,59 | 1,48 | 1,49 | 1,55 | 1,52 | 1,65 | 1,52 | 1,28 | 1,62 | 1,44 | 1,44 | 1,54 | 1,48 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 28,47 | 28,61 | 29,29 | 28,74 | 28,25 | 28,22 | 27,71 | 29,02 | 29,07 | 28,69 | 28,36 | 29,12 | 28,36 | 28,84 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 42,88 | 42,73 | 42,80 | 42,67 | 42,60 | 42,56 | 42,55 | 42,77 | 42,14 | 42,72 | 42,51 | 42,72 | 42,62 | 42,69 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 1,29 | 0,96 | 1,19 | 1,15 | | 0,91 | 2,03 | 1,68 | 1,22 | 1,55 | 1,06 | 1,33 | 1,51 | |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 14,50 | 16,22 | 11,93 | 8,82 | | 13,84 | 5,69 | 8,89 | 7,76 | 8,31 | 8,64 | 8,01 | 7,25 | |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,69 | 4,93 | 4,76 | 4,79 | | 4,97 | 4,19 | 4,41 | 4,73 | 4,49 | 4,86 | 4,65 | 4,52 | |
| Wasser (gesamt) [kg] | 4,50 | 4,84 | 4,28 | 3,92 | | 4,58 | 3,45 | 3,77 | 3,77 | 3,74 | 3,93 | 3,77 | 3,62 | |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,81 | 2,96 | 2,85 | 2,87 | | 2,98 | 2,52 | 2,64 | 2,84 | 2,70 | 2,91 | 2,79 | 2,71 | |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,69 | 1,88 | 1,43 | 1,05 | | 1,59 | 0,94 | 1,13 | 0,93 | 1,04 | 1,01 | 0,98 | 0,90 | |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 11,64 | 11,58 | 11,95 | 11,89 | | 11,50 | 13,12 | 12,68 | 12,00 | 12,50 | 11,75 | 12,17 | 12,44 | |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 20,83 | 21,36 | 20,99 | 20,60 | | 21,05 | 20,76 | 20,86 | 20,50 | 20,73 | 20,53 | 20,59 | 20,58 | |

Tabelle A 19: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Material BS (3)

| Versuchsnummer: | BS 51 | BS 53 | BS 54 | BS 55 | BS 56 | BS 58 | BS 61 | BS 62 | BS 63 | BS 67 | BS 69 | BS 71 | BS 72 | BS 73 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ausgangsmaterial | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,07 | 2,24 | 2,24 | 1,96 | 1,87 | 2,32 | | 2,06 | 1,94 | 2,15 | 1,94 | 2,03 | 2,03 | 1,92 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 5,24 | 7,75 | 7,75 | 6,56 | 6,85 | 4,20 | | 2,63 | 2,87 | 2,58 | 6,54 | 4,65 | 4,65 | 5,47 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,14 | 4,04 | 4,04 | 3,66 | 3,72 | 3,99 | | 4,15 | 4,23 | 4,09 | 4,23 | 4,17 | 4,17 | 4,24 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,20 | 3,50 | 3,50 | 3,16 | 3,56 | 2,98 | | 2,85 | 2,92 | 2,81 | 3,42 | 3,12 | 3,12 | 3,28 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,49 | 2,42 | 2,42 | 2,20 | 2,56 | 2,39 | | 2,49 | 2,54 | 2,46 | 2,54 | 2,50 | 2,50 | 2,54 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,72 | 1,08 | 1,08 | 0,96 | 1,00 | 0,59 | | 0,36 | 0,39 | 0,35 | 0,88 | 0,63 | 0,63 | 0,73 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,69 | 0,60 | | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 13,64 | 13,87 | 13,87 | 14,67 | 14,54 | 13,96 | | 13,62 | 13,46 | 13,75 | 13,46 | 13,58 | 13,58 | 13,43 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 20,98 | 21,40 | 21,40 | 21,49 | 21,82 | 20,93 | | 20,62 | 20,61 | 20,65 | 21,10 | 20,87 | 20,87 | 20,95 |
| Schwergut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,64 | 2,54 | 2,5 | 2,38 | 2,47 | 2,26 | 2,44 | 2,44 | 2,34 | 2,4 | 2,28 | 2,29 | 2,41 | 2,18 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 4,69 | 5,69 | 6,05 | 3,78 | 3,76 | 6,26 | 3,85 | 3,34 | 2,53 | 3,68 | 2,80 | 4,85 | 4,68 | 5,55 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 7,60 | 7,71 | 7,76 | 6,84 | 6,75 | 8,05 | 7,83 | 7,83 | 7,95 | 7,88 | 8,02 | 8,01 | 7,87 | 8,15 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 5,93 | 6,27 | 6,40 | 5,27 | 5,21 | 6,59 | 5,80 | 5,37 | 5,49 | 5,77 | 5,55 | 6,18 | 6,05 | 6,44 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 4,56 | 4,63 | 4,66 | 4,10 | 4,05 | 4,83 | 4,70 | 4,70 | 4,77 | 4,73 | 4,81 | 4,81 | 4,70 | 4,89 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,37 | 1,64 | 1,74 | 1,16 | 1,16 | 1,76 | 1,10 | 0,67 | 0,72 | 1,05 | 0,73 | 1,37 | 1,33 | 1,55 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 29,12 | 28,87 | 28,77 | 30,77 | 30,95 | 28,14 | 28,61 | 28,61 | 28,36 | 28,52 | 28,20 | 28,22 | 28,54 | 27,93 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 42,64 | 42,85 | 42,92 | 42,87 | 42,92 | 42,78 | 42,24 | 41,81 | 41,79 | 42,16 | 41,77 | 42,41 | 42,46 | 42,51 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 1,29 | 1,38 | 1,00 | 1,53 | 1,45 | 0,40 | 0,72 | 0,85 | 0,61 | 1,02 | 0,97 | 0,81 | 0,72 | 1,00 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 8,78 | 10,38 | 12,54 | n.b. | 9,52 | 15,78 | 7,33 | 6,95 | 9,73 | 11,78 | 12,99 | 7,74 | 10,75 | 13,51 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,68 | 4,62 | 4,90 | 4,51 | 4,57 | 5,39 | 5,13 | 5,02 | 5,22 | 4,89 | 4,93 | 5,05 | 5,13 | 4,90 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,87 | 4,04 | 4,40 | 4,26 | 3,92 | 5,91 | 3,90 | 3,81 | 4,20 | 4,31 | 4,46 | 3,91 | 4,28 | 4,52 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,81 | 2,77 | 2,94 | 2,71 | 2,74 | 3,24 | 3,08 | 3,01 | 3,13 | 2,93 | 2,96 | 3,03 | 3,08 | 2,94 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,06 | 1,27 | 1,46 | 1,56 | 1,18 | 2,68 | 0,82 | 0,79 | 1,07 | 1,38 | 1,51 | 0,88 | 1,20 | 1,57 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | (0,60) | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 12,11 | 12,24 | 11,65 | 12,47 | 12,34 | 10,63 | 11,18 | 11,40 | 11,00 | 11,68 | 11,59 | 11,94 | 11,18 | 11,65 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 20,66 | 20,90 | 20,95 | 21,24 | 20,83 | 21,94 | 20,21 | 20,23 | 20,41 | 20,88 | 20,99 | 20,30 | 20,59 | 21,07 |

Tabelle A 19: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Material BS (4)

| Versuchsnummer: | BS_74 | BS_80 | BS_82 | BS_92 | BS_93 | BS_108 | BS_109 | BS_113 | BS_119 | BS_122 | BS_123 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ausgangsmaterial | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 1,92 | 2,11 | 1,91 | 1,88 | 1,87 | 2,11 | 2,11 | 1,88 | 2,06 | 2,05 | 2,05 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 5,47 | 7,50 | 7,00 | n.b. | n.b. | 7,18 | 7,18 | n.b. | 8,04 | 6,32 | 6,32 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,24 | 4,12 | 4,25 | 4,27 | 4,27 | 4,12 | 4,12 | 4,27 | 4,15 | 4,16 | 4,16 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,28 | 3,50 | 3,49 | 3,48 | 3,60 | 3,45 | 3,45 | 3,19 | 3,58 | 3,35 | 3,35 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,54 | 2,47 | 2,55 | 2,56 | 2,56 | 2,47 | 2,47 | 2,56 | 2,49 | 2,49 | 2,49 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,73 | 1,03 | 0,94 | 0,92 | 1,04 | 0,98 | 0,98 | 0,63 | 1,10 | 0,86 | 0,86 |
| Wasser-/Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 13,43 | 13,69 | 13,41 | 13,36 | 13,36 | 13,69 | 13,69 | 13,36 | 13,62 | 13,61 | 13,61 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 20,95 | 21,31 | 21,15 | 21,12 | 21,23 | 21,26 | 21,26 | 20,83 | 21,36 | 21,12 | 21,12 |
| Schwergut | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,15 | 2,33 | 2,17 | 2,38 | 2,47 | 2,47 | 2,55 | 2,34 | 2,49 | 2,52 | 2,22 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 4,37 | 5,20 | 6,30 | 4,62 | 5,30 | n.b. | 3,47 | 4,53 | 6,26 | n.b. | n.b. |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 8,18 | 6,47 | 5,92 | 7,90 | 7,80 | 6,75 | 6,68 | 7,95 | 7,77 | 7,74 | 8,10 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 6,13 | 5,05 | 4,82 | 6,06 | 6,17 | 5,36 | 5,09 | 6,05 | 6,46 | 5,73 | 5,944 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 4,91 | 3,88 | 3,55 | 4,74 | 4,68 | 4,05 | 4,01 | 4,77 | 4,66 | 4,65 | 4,86 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,22 | 1,17 | 1,28 | 1,32 | 1,52 | 1,31 | 1,08 | 1,29 | 1,80 | 1,09 | 1,09 |
| Wasser-/Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 27,85 | 22,45 | 20,23 | 28,46 | 28,69 | 30,95 | 31,11 | 28,36 | 28,74 | 28,81 | 28,04 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 42,16 | 33,97 | 30,97 | 42,42 | 42,65 | 43,06 | 42,88 | 42,36 | 42,98 | 42,28 | 42,08 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 0,33 | 0,77 | 0,32 | 0,75 | 0,71 | 0,75 | 0,77 | 0,81 | 1,06 | 0,80 | 0,17 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 27,50 | 13,35 | 16,20 | 13,57 | 14,21 | n.b. | n.b. | 6,73 | n.b. | n.b. | n.b. |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 5,46 | 5,09 | 5,46 | 5,10 | 5,13 | 4,44 | 3,53 | 5,05 | 4,86 | 5,06 | 5,61 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 6,16 | 4,56 | 4,98 | 4,59 | 4,67 | 4,31 | 2,95 | 3,79 | 4,43 | 3,97 | 5,53 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 3,27 | 3,60 | 4,28 | 3,06 | 3,08 | 3,67 | 3,62 | 4,16 | 3,41 | 3,94 | 3,37 |
| Wasseraufnahme [kg] | 2,89 | 1,50 | 1,70 | 1,52 | 1,59 | 1,64 | 0,84 | 0,76 | 1,52 | 0,93 | 2,16 |
| Wasser-/Zementwert | 0,60 | 0,71 | 0,78 | 0,60 | 0,60 | 0,83 | 1,03 | 0,82 | 0,70 | 0,78 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 10,50 | 11,27 | 10,48 | 11,24 | 11,18 | 12,60 | 10,14 | 11,34 | 11,75 | 11,32 | 10,17 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 22,12 | 20,91 | 20,92 | 20,92 | 20,97 | 21,35 | 16,62 | 20,18 | 21,03 | 20,35 | 21,32 |

Tabelle A 20: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Material REM

| Versuchsnummer: | REM_1 | REM_2 | REM_5 | REM_9 | REM_13 | REM_14 | REM_15 | REM_16 | REM_18 | REM_19 | REM_21 | REM_23 | REM_24 | REM_26 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| Ausgangsmaterial | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,97 | 3,10 | 3,08 | 2,93 | 3,27 | 2,96 | 2,91 | 3,73 | 2,95 | 2,99 | 2,86 | 2,86 | 3,16 | 3,38 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 5,39 | 5,64 | 5,72 | 6,40 | 4,47 | 6,54 | 4,42 | 3,42 | 6,15 | 6,07 | 5,42 | 6,21 | 5,08 | 5,08 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 3,62 | 3,55 | 3,56 | 3,64 | 3,47 | 3,63 | 3,71 | 3,26 | 3,63 | 3,61 | 3,72 | 3,68 | 3,11 | 3,42 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 2,97 | 2,97 | 2,99 | 3,13 | 2,76 | 3,14 | 2,87 | 2,49 | 3,08 | 3,06 | 3,02 | 3,12 | 2,67 | 2,77 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,17 | 2,13 | 2,14 | 2,18 | 2,08 | 2,22 | 2,22 | 1,96 | 2,18 | 2,17 | 2,23 | 2,21 | 1,87 | 2,05 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,80 | 0,84 | 0,85 | 0,94 | 0,67 | 0,96 | 0,84 | 0,53 | 0,91 | 0,90 | 0,79 | 0,91 | 0,80 | 0,72 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 14,76 | 14,90 | 14,88 | 14,71 | 15,08 | 14,74 | 14,57 | 15,52 | 14,73 | 14,78 | 14,54 | 14,63 | 15,85 | 15,19 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 21,34 | 21,42 | 21,43 | 21,48 | 21,30 | 21,51 | 21,15 | 21,27 | 21,45 | 21,45 | 21,28 | 21,43 | 21,63 | 21,38 |
| Schwergut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,81 | 2,92 | 2,44 | 2,47 | 2,53 | 2,78 | 2,74 | 2,72 | 2,62 | 2,45 | 2,56 | 2,24 | 2,71 | 2,70 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 3,22 | 3,15 | 4,80 | 3,10 | 4,13 | 3,58 | 3,34 | 3,42 | 4,60 | 4,24 | 4,67 | 3,75 | 4,88 | 4,54 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 7,41 | 7,29 | 7,83 | 7,80 | 7,73 | 7,44 | 7,49 | 3,75 | 7,62 | 7,82 | 7,69 | 8,07 | 7,52 | 7,53 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 5,40 | 5,31 | 6,07 | 5,57 | 5,82 | 5,52 | 5,47 | 2,75 | 5,91 | 5,91 | 5,96 | 5,90 | 5,94 | 5,85 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 4,45 | 4,38 | 4,70 | 4,68 | 4,64 | 4,47 | 4,49 | 2,25 | 4,57 | 4,69 | 4,61 | 4,84 | 4,51 | 4,52 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,95 | 0,94 | 1,37 | 0,89 | 1,18 | 1,05 | 0,98 | 0,50 | 1,34 | 1,21 | 1,35 | 1,05 | 1,43 | 1,33 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 29,52 | 29,78 | 28,61 | 28,69 | 28,84 | 29,45 | 29,36 | 14,66 | 29,07 | 28,64 | 28,92 | 28,09 | 29,29 | 29,26 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 42,33 | 42,39 | 42,52 | 42,05 | 42,39 | 42,42 | 42,32 | 21,16 | 42,60 | 42,36 | 42,57 | 42,06 | 42,75 | 42,64 |
| Leichtgut | | | | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 1,85 | 2,22 | 1,31 | 2,44 | 1,62 | 2,16 | 2,20 | 2,40 | 1,91 | 2,41 | 1,65 | 2,31 | 0,80 | 0,98 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 5,94 | 6,22 | 9,97 | 5,38 | 9,49 | 7,03 | 6,58 | 6,59 | 7,79 | 5,86 | 9,51 | 6,69 | 13,12 | 11,66 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,29 | 4,05 | 4,67 | 3,92 | 4,44 | 4,09 | 4,07 | 3,94 | 4,25 | 3,93 | 4,42 | 3,99 | 5,06 | 4,92 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,34 | 3,26 | 4,01 | 3,09 | 3,86 | 3,39 | 3,32 | 3,36 | 3,56 | 3,16 | 3,86 | 3,30 | 4,52 | 4,93 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,57 | 2,43 | 2,80 | 2,35 | 2,67 | 2,45 | 2,44 | 2,46 | 2,55 | 2,36 | 2,65 | 2,40 | 3,04 | 2,95 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,77 | 0,84 | 1,21 | 0,74 | 1,20 | 0,94 | 0,88 | 0,90 | 1,01 | 0,80 | 1,02 | 0,91 | 1,49 | 1,35 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,63 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 12,93 | 13,42 | 12,14 | 13,70 | 12,60 | 13,34 | 13,38 | 13,65 | 13,01 | 13,66 | 12,64 | 13,54 | 11,32 | 11,62 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 20,55 | 20,73 | 20,81 | 20,70 | 20,91 | 20,82 | 20,77 | 20,95 | 20,82 | 20,75 | 20,92 | 20,83 | 20,90 | 21,46 |

Tabelle A 21: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Materialien VS und Natursand

| Versuchsnummer: | Natursand | VS_02 | VS_03 | VS_04 | VS_12 | VS_14 | VS_15 | VS_21 | VS_25 | VS_26 | VS_27 |
|--------------------------------|-----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Ausgangsmaterial | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | 2,16 | 2,58 | 2,75 | 2,42 | 2,19 | 2,32 | 2,40 | 2,58 | 2,56 | 2,71 | 2,95 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | n.b. | 5,82 | 8,56 | 8,63 | 6,06 | 5,67 | 6,61 | 8,51 | 8,94 | 8,02 | 7,82 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,09 | 3,83 | 3,74 | 3,93 | 4,07 | 3,99 | 3,94 | 3,83 | 3,85 | 3,76 | 3,64 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 2,45 | 3,13 | 3,49 | 3,57 | 3,28 | 3,16 | 3,29 | 3,52 | 3,58 | 3,42 | 3,33 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,45 | 2,30 | 2,24 | 2,36 | 2,44 | 2,39 | 2,36 | 2,30 | 2,31 | 2,26 | 2,18 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,60 | 0,83 | 1,24 | 1,22 | 0,84 | 0,79 | 0,93 | 1,22 | 1,28 | 1,16 | 1,15 |
| Wasser-Zementwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 15,81 | 14,30 | 14,50 | 14,10 | 13,80 | 13,97 | 14,07 | 14,30 | 14,27 | 14,46 | 14,72 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 22,35 | 21,27 | 21,73 | 21,60 | 21,14 | 21,14 | 21,31 | 21,65 | 21,70 | 21,63 | 21,69 |
| Schwergut | | | | | | | | | | | |
| Körnungsziffer | | 2,29 | 2,33 | 2,37 | 3,08 | 2,73 | 2,32 | 2,50 | 2,60 | 2,54 | 2,64 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | | 4,17 | 4,14 | 4,18 | 2,73 | 2,99 | 3,47 | 3,64 | 3,78 | 3,93 | 3,17 |
| Mörtelzusammensetzung | | | | | | | | | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | | 8,01 | 7,96 | 7,91 | 7,13 | 7,50 | 7,97 | 7,76 | 7,64 | 7,71 | 7,60 |
| Wasser (gesamt) [kg] | | 5,98 | 5,95 | 5,94 | 5,10 | 5,38 | 5,77 | 5,70 | 5,68 | 5,76 | 5,48 |
| Wasser (wirksam) [kg] | | 4,81 | 4,78 | 4,75 | 4,28 | 4,50 | 4,78 | 4,66 | 4,59 | 4,63 | 4,56 |
| Wasseraufnahme [kg] | | 1,18 | 1,17 | 1,19 | 0,82 | 0,88 | 0,98 | 1,05 | 1,10 | 1,13 | 0,92 |
| Wasser-Zementwert | | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | | 28,22 | 28,33 | 28,43 | 30,14 | 29,33 | 28,30 | 28,77 | 29,02 | 28,87 | 29,12 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | | 42,22 | 42,24 | 42,28 | 42,37 | 42,21 | 42,04 | 42,23 | 42,34 | 42,34 | 42,20 |

Tabelle A 22: Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Mörtelrezepte, Materialien HAL und SAL

| Versuchsnummer: | HAL_1 | SAL_4 | SAL_5 |
|--------------------------------|-------|-------|-------|
| Ausgangsmaterial | | | |
| Körnungsziffer | 2,62 | 2,54 | 2,56 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 4,02 | 5,64 | 5,54 |
| Mörtelzusammensetzung | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 3,81 | 3,86 | 3,85 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 2,86 | 3,12 | 3,10 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 2,29 | 2,31 | 2,31 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,58 | 0,80 | 0,79 |
| Wasser-/Zemetwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 14,35 | 14,25 | 14,27 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 21,02 | 21,22 | 21,22 |
| Schwergut | | | |
| Körnungsziffer | 2,94 | 2,92 | 3,04 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 3,99 | 3,65 | 4,02 |
| Mörtelzusammensetzung | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 7,27 | 7,29 | 7,17 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 5,56 | 5,46 | 5,51 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 4,37 | 4,38 | 4,30 |
| Wasseraufnahme [kg] | 1,19 | 1,09 | 1,21 |
| Wasser-/Zemetwert | 0,60 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 29,82 | 29,78 | 30,05 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 42,64 | 42,53 | 42,73 |
| Leichtgut | | | |
| Körnungsziffer | 1,86 | 1,44 | 1,55 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [%] | 5,71 | 9,91 | 8,92 |
| Mörtelzusammensetzung | | | |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 4,28 | 4,57 | 4,49 |
| Wasser (gesamt) [kg] | 3,85 | 3,97 | 3,81 |
| Wasser (wirksam) [kg] | 3,11 | 2,74 | 2,70 |
| Wasseraufnahme [kg] | 0,74 | 1,22 | 1,12 |
| Wasser-/Zemetwert | 0,73 | 0,60 | 0,60 |
| Zuschlag 0/4,0 mm RC [kg] | 13,36 | 12,33 | 12,50 |
| Frischmörtelgewicht [kg] | 21,49 | 20,87 | 20,80 |

Tabelle A 23 Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Dichte- und Porositätsbestimmungen, Materialien BS, REM und VS

| Versuchsnummer: | BS 07 | BS 10 | BS 11 | BS 12 | BS 15 | BS 18 | BS 19 | BS 25 | BS 26 | BS 27 | BS 35 | BS 41 | BS 50 | BS 58** | BS 73 | BS 108 | BS 109 | BS 112 | |
|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|--------|--------|--------|-------|
| Kornrohddichte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 2,06 | 2,07 | 2,08 | 2,03 | 2,02 | 2,13 | 2,07 | 2,06 | 2,08 | 2,00 | 2,09 | 2,03 | 2,06 | 2,07 | 2,07 | 2,06 | 2,06 | 2,06 | 2,06 |
| Schwergut [g/cm ³] | 2,28 | 2,29 | 2,27 | 2,25 | 2,28 | 2,29 | 2,26 | 2,23 | 2,24 | 2,20 | 2,26 | 2,29 | 2,23 | 2,23 | 2,22 | 2,24 | 2,26 | 2,21 | 2,21 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 1,93 | 2,02 | 2,03 | 1,99 | n.b. | 2,06 | n.b. | 1,97 | 1,95 | 1,92 | 2,02 | 2,06 | 2,02 | 1,92 | 1,87 | 1,80 | 1,75 | 1,75 | 1,75 |
| Reindichte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 2,49 | 2,49 | 2,50 | 2,49 | 2,49 | n.b. | 2,49 | 2,49 | n.b. | 2,50 | n.b. | 2,51 | 2,51 | 2,50 | 2,48 | 2,57 | 2,57 | 2,56 | 2,56 |
| Schwergut [g/cm ³] | 2,95 | 2,97 | 2,95 | 2,94 | 2,94 | 2,97 | 2,97 | 2,97 | 2,96 | 2,97 | 2,95 | 2,96 | 2,99 | 2,96 | 2,93 | 2,98 | 2,99 | 2,99 | 2,99 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 2,47 | 2,47 | 2,51 | 2,45 | n.b. | 2,52 | n.b. | 2,44 | 2,42 | 2,48 | 2,49 | 2,50 | 2,53 | 2,45 | 2,47 | 2,49 | 2,54 | 2,51 | 2,51 |
| Porosität | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 17,30 | 16,90 | 16,90 | 18,38 | 18,91 | n.b. | 16,70 | 17,37 | n.b. | 19,98 | n.b. | 19,10 | 17,96 | 17,17 | 16,66 | 19,87 | 19,87 | 19,39 | 19,39 |
| Schwergut [%] | 10,59 | 10,79 | 11,12 | 11,45 | 10,20 | 10,84 | 12,10 | 13,36 | 12,53 | 14,34 | 11,32 | 10,44 | 13,88 | 19,26 | 12,10 | 13,17 | 12,82 | 14,51 | 14,51 |
| Leichtgut [%] | 21,96 | 18,25 | 19,06 | 18,74 | n.b. | 18,24 | n.b. | 19,33 | 19,56 | 22,57 | 18,88 | 17,68 | 20,00 | 21,60 | 24,28 | 27,65 | 31,08 | 30,15 | 30,15 |

| Versuchsnummer: | REM_1 | REM_2 | REM_14 | REM_15 | REM_16 | REM_23 | REM_24 | VS_04 | VS_12** | MW_gesamt | s_gesamt |
|---------------------------------------|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|---------|-----------|----------|
| Kornrohddichte | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 2,15 | 2,14 | 2,08 | 2,10 | 2,19 | 2,13 | 2,11 | 2,04 | 2,05 | 2,08 | 0,04 |
| Schwergut [g/cm ³] | 2,31 | 2,31 | 2,33 | 2,29 | 2,31 | 2,29 | 2,21 | 2,36 | 2,36 | 2,27 | 0,04 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 2,11 | 2,16 | 2,09 | 2,08 | 2,12 | 2,10 | 1,80 | 1,93 | 2,23 | 1,99 | 0,12 |
| Reindichte | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [g/cm ³] | 2,52 | 2,52 | 2,54 | 2,54 | 2,56 | 2,54 | 2,55 | 2,59 | 2,59 | 2,52 | 0,03 |
| Schwergut [g/cm ³] | 2,57 | 2,56 | 2,57 | 2,58 | 2,58 | 2,60 | 2,57 | 2,60 | 2,63 | 2,58 | 0,04 |
| Leichtgut [g/cm ³] | 2,50 | 2,51 | 2,51 | 2,52 | 2,51 | 2,51 | 2,43 | 2,46 | 2,61 | 2,49 | 0,04 |
| Porosität | | | | | | | | | | | |
| Ausgangsmaterial [%] | 14,65 | 15,10 | 18,14 | 17,36 | 14,46 | 15,98 | 17,32 | 21,24 | 20,86 | 17,81 | 1,80 |
| Schwergut [%] | 10,17 | 9,88 | 9,40 | 11,13 | 10,63 | 11,85 | 14,07 | 9,30 | 10,23 | 11,90 | 2,07 |
| Leichtgut [%] | 15,71 | 13,99 | 16,69 | 17,32 | 15,67 | 16,48 | 26,00 | 21,70 | 14,55 | 20,28 | 4,48 |

Tabelle A 24 Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Betonrezepturen und Kennwerte der Betonversuche, BS 27

| Versuchsreihe BS 27 | Referenzbeton | | BS 27 A - 20 % | | BS 27 A - 50 % | | BS 27 S - 20 % | | BS 27 S - 50 % | |
|--|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|------------------|--------|
| Sieblinie | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | |
| Körnungsziffer | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [M.-%] | | | 8,09 | | 8,09 | | 5,54 | | 5,54 | |
| Betonzusammensetzung | | | | | | | | | | |
| Materialmenge bezogen auf | 1 m ³ | Vol.-% | 1 m ³ | Vol.-% | 1 m ³ | Vol.-% | 1 m ³ | Vol.-% | 1 m ³ | Vol.-% |
| Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 314 | | 304 | | 296 | | 304 | | 297 | |
| Betonbrechsand BS 58 A [kg] | | | 320 | 20 | 776 | 50 | 324 | 20 | 784 | 50 |
| Zuschlag (gesamt) [kg] | 1848 | | 1752 | | 1651 | | 1761 | | 1657 | |
| Wasser (gesamt) [kg] | 188 | | 208 | | 240 | | 201 | | 221 | |
| Wasser (wirksam) [kg] | 188 | | 182 | | 178 | | 183 | | 178 | |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [kg] | | | 26 | | 62 | | 18 | | 43 | |
| Wasser-/Zementwert - wirksam | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | |
| Frischbetonkennwerte | | | | | | | | | | |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) [cm] | 38,5 | | 44,0 | | 43,0 | | 35,0 | | 41,0 | |
| Luftgehalt, 10 Minuten [Vol.-%] | 1,8 | | 2,5 | | 4,4 | | 3,1 | | 4,5 | |
| Frischbetonrohddichte [g/cm ³] | 2,34 | | 2,28 | | 2,10 | | 2,28 | | 2,20 | |
| Festbetonkennwerte | | | | | | | | | | |
| Rohddichte, 28 Tage [g/cm ³] | 2,36 | | 2,27 | | 21,57 | | 2,28 | | 2,17 | |
| Druckfestigkeit, 28 Tage [[kg] | 34,5 | | 35,1 | | 28,0 | | 36,3 | | 32,7 | |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage [kg] | 33.598 | | 26.011 | | 17.652 | | 28.631 | | 23.408 | |

Tabelle A 25 Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Betonrezepturen und Kennwerte der Betonversuche, BS 58

| Versuchsreihe BS 58 | Referenzbeton | | BS 58 A - 10 % | | BS 58 A - 20 % | | BS 58 A - 30 % | | BS 58 A - 40 % | | BS 58 A - 50 % | | BS 58 S - 10 % | | BS 58 S - 20 % | | BS 58 S - 30 % | | BS 58 S - 40 % | | BS 58 S - 50 % | | |
|--|---------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|----------------|--------|------|
| | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | |
| Siebline | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 | | B16 |
| Körnungsziffer | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [M.-%] | | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 | | 8,50 |
| Betonzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materialmenge bezogen auf Zement / CEM I 32,5 R [kg] | 311 | | 305 | | 302 | | 300 | | 291 | | 292 | | 305 | | 304 | | 303 | | 299 | | 294 | | |
| Betondeckenschicht BS 58 A [kg] | | | 159 | | 316 | | 471 | | 609 | | 763 | | 163 | | 322 | | 483 | | 635 | | 781 | | 50 |
| Zuschlag (gesamt) [kg] | 1831 | 100 | 1776 | 100 | 1737 | 100 | 1707 | 100 | 1636 | 100 | 1623 | 100 | 1781 | 100 | 1757 | 100 | 1736 | 100 | 1694 | 100 | 1650 | 100 | |
| Wasser (gesamt) [kg] | 185 | | 196 | | 207 | | 219 | | 225 | | 239 | | 192 | | 202 | | 211 | | 218 | | 225 | | |
| Wasser (wirksam) [kg] | 185 | | 182 | | 180 | | 179 | | 173 | | 174 | | 182 | | 182 | | 181 | | 178 | | 176 | | |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [kg] | | | 14 | | 27 | | 40 | | 52 | | 65 | | 10 | | 20 | | 30 | | 40 | | 49 | | |
| Wasser/Zementwert - wirksam | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | |
| Frischbetonkennwerte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausbreitmaß (DIN 1048, 10 min) [cm] | | | 39,0 | | 41,0 | | 37,5 | | 38,0 | | 37,5 | | 41,0 | | 39,5 | | 38,0 | | 38,0 | | 37,0 | | |
| Luftgehalt, 10 Minuten [Vol.-%] | | | 3,2 | | 3,6 | | 3,3 | | 5,3 | | 4,0 | | 3,1 | | 3,3 | | 3,4 | | 3,8 | | 4,6 | | |
| Frischbetondichte [g/cm³] | | | 2,32 | | 2,28 | | 2,23 | | 2,18 | | 2,17 | | 2,29 | | 2,27 | | 2,26 | | 2,22 | | 2,18 | | |
| Festbetonkennwerte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rohtichte, 28 Tage [g/cm³] | | | 2,29 | | 2,21 | | 2,17 | | 2,13 | | 2,12 | | 2,24 | | 2,23 | | 2,22 | | 2,17 | | 2,13 | | |
| Druckfestigkeit, 28 Tage [kg] | | | 37,0 | | 37,1 | | 37,3 | | 32,1 | | 34,5 | | 36,0 | | 34,9 | | 36,1 | | 35,4 | | 34,4 | | |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage [kg] | | | 34.500 | | 29.000 | | 26.000 | | 23.800 | | 23.700 | | 31.500 | | 30.100 | | 28.800 | | 26.600 | | 24.600 | | |

Tabelle A 26 Versuchsübersicht: Baustofftechnische Untersuchungen – Betonrezepturen und Kennwerte der Betonversuche, BS 119

| Versuchsreihe BS 119 | Referenzbeton | | BS 119 A - 10 % | | BS 119 A - 20 % | | BS 119 A - 30 % | | BS 119 A - 40 % | | BS 119 A - 50 % | | BS 119 S - 10 % | | BS 119 S - 20 % | | BS 119 S - 30 % | | BS 119 S - 40 % | | BS 119 S - 50 % | | | |
|--|---------------|-----|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|-----------------|--------|--------|--------|
| | B16 | B16 | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% | 1 m³ | Vol.-% |
| Stahltie | B16 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | |
| Körnungsziffer | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | | 3,66 | |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [M.-%] | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | | 8,04 | |
| Betonzusammensetzung | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Materialmenge bezogen auf Zement/CEM I 32,5 R [kg] | | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | | 310 | |
| Betonbruchsand BS 56 A [kg] | | | 162 | 10 | 325 | 20 | 487 | 30 | 650 | 40 | 812 | 50 | 1000 | 10 | 329 | 20 | 494 | 30 | 658 | 40 | 823 | 50 | 1000 | |
| Zuschlag (gesamt) [kg] | | | 1826 | | 1786 | | 1766 | | 1745 | | 1726 | | 1705 | | 1790 | | 1773 | | 1755 | | 1737 | | 1719 | |
| Wasser (gesamt) [kg] | | | 185 | | 211 | | 224 | | 237 | | 250 | | 263 | | 206 | | 216 | | 226 | | 237 | | 247 | |
| Wasser (wirksam) [kg] | | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | | 185 | |
| Wasseraufnahme, 10 Minuten [kg] | | | 13 | | 26 | | 39 | | 52 | | 65 | | 78 | | 21 | | 31 | | 41 | | 52 | | 62 | |
| Wasser/Zementwert - wirksam | | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | | 0,6 | |
| Frischbetonkennwerte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Ausbreitmaß (DIN 1045, 10 min) [cm] | | | 41,5 | | 41,0 | | 42,0 | | 44,0 | | 43,0 | | 41,0 | | 41,0 | | 41,0 | | 41,0 | | 41,0 | | 40,5 | |
| Luftgehalt, 10 Minuten [Vol.-%] | | | 2,6 | | 2,9 | | 3,1 | | 2,7 | | 2,8 | | 2,9 | | 2,4 | | 2,4 | | 2,6 | | 2,6 | | 2,8 | |
| Frischbetondichte [g/cm³] | | | 2,33 | | 2,27 | | 2,24 | | 2,23 | | 2,21 | | 2,21 | | 2,31 | | 2,31 | | 2,28 | | 2,25 | | 2,22 | |
| Festbetonkennwerte | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Rohdichte, 28 Tage [g/cm³] | | | 2,29 | | 2,27 | | 2,20 | | 2,17 | | 2,13 | | 2,27 | | 2,26 | | 2,23 | | 2,20 | | 2,20 | | 2,18 | |
| Druckfestigkeit, 28 Tage [kg] | | | 41,6 | | 39,7 | | 37,8 | | 34,0 | | 34,5 | | 41,6 | | 40,0 | | 39,4 | | 37,1 | | 36,9 | | 36,9 | |
| Dynamischer E-Modul, 28 Tage [kg] | | | 34.100 | | 32.200 | | 28.600 | | 24.300 | | 22.200 | | 30.900 | | 31.900 | | 27.200 | | 27.700 | | 27.700 | | 24.800 | |
| Schwinden, 28 Tage [mm/m] | | | -0,25 | | -0,31 | | -0,37 | | -0,43 | | -0,50 | | -0,28 | | -0,29 | | -0,31 | | -0,31 | | -0,31 | | -0,41 | |
| Schwinden, 91 Tage [mm/m] | | | -0,41 | | -0,50 | | -0,59 | | -0,68 | | -0,83 | | -0,45 | | -0,49 | | -0,51 | | -0,52 | | -0,52 | | -0,66 | |
| Schwinden, 365 Tage [mm/m] | | | -0,51 | | -0,61 | | -0,73 | | -0,82 | | -1,02 | | -0,57 | | -0,63 | | -0,63 | | -0,63 | | n.b. | | -0,80 | |

DANKSAGUNG

Mein besonderer Dank gilt Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller für die Betreuung dieser Dissertation. Ihre beständige Diskussionsbereitschaft, ihre zahlreichen Anregungen und konstruktiven Vorschläge bei der Konkretisierung dieses Manuskriptes haben wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen. Herrn Dr.-Ing. Matthias Maultzsch danke ich sehr für zahlreiche wertvolle Hinweise und Ratschläge sowie für die Übernahme des Koreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Heinz danke ich ebenfalls sehr für das meiner Arbeit entgegengebrachte Interesse und die Erstellung des Gutachtens. Dem Leiter der Fachgruppe IV.3 an der BAM, Herrn Dr. Franz-Georg Simon, schulde ich Dank für die Möglichkeit, die Ergebnisse des EU-LIFE-Projektes RECDemo für diese Arbeit auszuwerten.

Frau Dr. Vera Biermann, die mir in allen Phasen dieses „Projektes“ eine große Unterstützung war und mir in vielen Gesprächen und durch sorgfältiges Korrekturlesen geholfen hat, hat wesentlich zum erfolgreichen Abschluss der Arbeit beigetragen. Durch ihre Diskussionsbereitschaft haben mich auch Frau Gudrun Sapich und Herr Dr. Lutz Giese nachhaltig unterstützt. Außerdem gebührt den Kollegen und Kolleginnen der Fachgruppe IV.3, die mir auf vielfältige Weise an der Versuchsanlage, im Labor und bei sonstigen Gelegenheiten geholfen haben, Dank. Besonders erwähnen möchte ich Frau Kerstin Meißner, Herrn Horst Zurbel, Frau Katja Nordhauß, Herrn Hans Steglich und Frau Angela Grabner. Ihnen allen sei an dieser Stelle für ihre Unterstützung nochmals herzlich gedankt.

Allen Kollegen und Kolleginnen der Fachgruppe VII.1 gilt mein Dank für die tatkräftige Unterstützung bei der Bearbeitung des großen Untersuchungsprogramms. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle auch bei Herrn Günter Mellmann, Herrn Uwe Meinhold und Herrn Frank Haamkens bedanken. Weiterhin danke ich Frau Karin Adam und Frau Ines Feldmann für die ESEM-Messungen, Herrn Dr. Burkhard Peplinski für die XRD-Analysen sowie allen anderen Kollegen der BAM, die mir geholfen haben.

Mein Dank gilt auch den Studenten, die im Rahmen ihrer Praktika und Diplomarbeiten bei der Durchführung dieser Arbeit wichtige Beiträge geleistet haben. Besonders hervorheben möchte ich in diesem Zusammenhang Herrn Sven Sprenger.

Nicht zuletzt danke ich auch meinen Eltern, die mir das Studium ermöglicht und meine Neigungen stets gefördert haben. Für die moralische Unterstützung danke ich allen meinen Freundinnen und Freunden. Ein riesiges Dankeschön geht an meinen Mann Gunther, ohne dessen Unterstützung und Geduld diese Arbeit sowieso nicht möglich gewesen wäre.