

Diplomarbeit

Technisch-wirtschaftliche Bewertung der mechanischen Rezyklierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grads
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der TU Wien, Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwesen

Diploma Thesis

Techno-economical assessment of the mechanical recycling of mineral construction and demolition waste

Submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur / Diplom-Ingenieurin
of the TU Wien, Faculty of Civil and Environmental Engineering

von

Amna Hadžić, BSc

Matr.Nr.: 01528465

Betreuung: Prof. doc. Dr.techn. Dipl.-Ing. **Ildiko Merta**
Projektass.in Dipl.-Ing.in **Daniella Mehanni**
Institut für Werkstofftechnologie, Bauphysik und Bauökologie
Forschungsbereich Bauphysik
Technische Universität Wien,
Karlsplatz 13/207, 1040 Wien, Österreich

Wien, im April 2024

Das Projekt UP!crete wird von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft im Instrument „Collective Research“ des FFG Basisprogramms gefördert.

Kurzfassung

Ein Drittel des gesamten Abfallaufkommens in der Europäischen Union entfällt auf die Bau- und Abbruchabfälle. Die Abfallrahmenrichtlinie gibt Vorschriften für den Umgang mit Abfällen an und definiert eine Abfallhierarchie. Dritte Stufe dieser Abfallhierarchie nimmt Recycling an. Das Recycling von Bau- und Abbruchabfällen spielt eine wesentliche Rolle in der Entlastung der Umwelt. Dies erfolgt durch Verringerung des notwendigen Deponievolumens. Weitere wichtige Aspekte sind Einsparung der natürlichen Ressourcen, sowie der Energie. Ergebnisse des Recyclings sind Recycling-Baustoffe, die dem Wirtschaftskreislauf wieder zugeführt werden können.

Diese Diplomarbeit beschäftigt sich mit den Aufbereitungsanlagen, in welchen der Betonabbruch nach dem Stand der Technik zu Recycling-Betongranulat aufbereitet wird. Es werden die Grundoperationen der Aufbereitung erläutert und die Aufbereitungsanlagen in ihrer Gesamtheit betrachtet. Der Fokus wird auf zweistufige Zerkleinerung samt vor-, zwischen- und nachgeschalteten Sieb- und Sortiervorgängen gelegt. Ein Überblick über die innovativen Aufbereitungsmethoden samt ihren Vor- und Nachteilen wird geschaffen.

Der Schwerpunkt dieser Diplomarbeit ist die Kostenermittlung, sowie anschließender Kostenvergleich der Aufbereitungsanlagen im Einklang mit aktuellem Stand der Technik. Es werden sowohl die monatlichen Gesamtkosten als auch Einheitskosten ermittelt.

Die erste Forschungsfrage beschäftigt sich mit der Entwicklung der Produktionskosten in Abhängigkeit von dem Anlagendurchsatz. Hier wird gezeigt, dass die Gesamtkosten mit der steigenden Produktionsmenge steigen. Die Einheitskosten nehmen aber ab und der Skaleneffekt ist zu erkennen. Es wird gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit einer Aufbereitungsanlage mit der zunehmenden Kapazität auch zunimmt.

Im Rahmen der zweiten Forschungsfrage werden zwei Szenarien der Aufbereitung des Betonabbruchs betrachtet. Das Szenario 1 ermöglicht die Herstellung von fraktioniertem Recycling-Betongranulat (0/8, 8/16, 16/32). Dies erfolgt durch Anordnung mehrmaliger Siebvorgänge. Auf die Siebvorgänge wird im Szenario 2 verzichtet. Daraus entsteht das nicht fraktionierte Recycling-Betongranulat (0/16). Die Differenz der Herstellungskosten der beiden Szenarien wird festgestellt. Es wird gezeigt, dass mehrmalige Siebung kostentechnisch eine untergeordnete Rolle spielt im Vergleich zu den restlichen Aufbereitungsschritten. Mehrmalige Siebung ist unerlässlich für die Herstellung von hochqualitativen Produkten, die für eine hochwertige Verwertung geeignet sind.

Abstract

Construction and demolition waste accounts for one third of the total waste generated in the European Union. The Waste Framework Directive lays down rules for the handling of waste and defines a waste hierarchy. The third stage of this waste hierarchy is recycling. The recycling of construction and demolition waste plays an important role in reducing the burden on the environment. This is achieved by reducing the necessary landfill volume. Other important aspects are saving natural resources and energy. The results of recycling are recycled building materials that can be reintroduced into the economic cycle.

This thesis focusses on the recycling plants in which demolished concrete is processed into recycled concrete granulate according to the state of the art. The basic operations of processing are explained, and the processing plants are analysed in their entirety. The focus is on two-stage comminution including upstream, intermediate, and downstream screening and sorting processes. An overview of the innovative processing methods including their advantages and disadvantages is provided.

The focus of this thesis is the cost calculation and cost comparison of the recycling plants according to the state of the art. Both the total monthly costs and the unit costs are determined.

The first research question analyses the development of production costs as a function of plant throughput. Here it is shown that the total costs increase with the increasing production volume. However, the unit costs decrease and the scale effect can be recognised. It is shown that the economic efficiency of a processing plant also increases with increasing capacity.

As part of the second research question, two scenarios for processing demolished concrete are considered. Scenario 1 enables the production of highly fractionated recycled concrete granulate (0/8, 8/16, 16/32). This is achieved by performing multiple screening processes. The screening processes are omitted in scenario 2. This produces the non-fractionated recycled concrete granulate (0/16). The difference in production costs between the two scenarios is determined. It is shown that repeated screening is of minor importance in terms of costs compared to the remaining processing steps. Multiple screening is essential for the generation of high-quality products that are suitable for high-quality valorisation.

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Grundlagen	1
1.2	Hemmnisse für den Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton.....	2
1.3	EU Green Deal.....	4
1.4	Abfallrahmenrichtlinie	4
1.5	Abfallwirtschaftsgesetz 2002	6
1.6	Abfallverzeichnis.....	7
1.7	Recycling-Baustoffverordnung.....	8
1.8	Anfallender Bau- und Abbruchabfall in Österreich	9
1.9	Normative Grundlagen zur Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in Österreich.....	14
1.9.1	Klassifikation der rezyklierten Gesteinskörnung und deren Bestandteile	14
1.9.2	Rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonherstellung.....	20
1.10	Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit	25
1.10.1	Forschungsfragen.....	25
2	Stand der Technik der mechanischen Rezyklierung von mineralischer Baurestmassen.....	26
2.1	Grundoperationen der mechanischen Baurestmassenaufbereitung	26
2.1.1	Zerkleinerung.....	26
2.1.2	Siebklassierung	31
2.1.3	Sortierung.....	34
2.2	Konfiguration der Aufbereitungsanlagen	41
3	Stand der Wissenschaft der mechanischen Rezyklierung.....	45
3.1	Innovative Zerkleinerungsverfahren.....	45
3.1.1	Smart Crusher	45
3.1.2	Modifizierter Kegelbrecher	46
3.1.3	Thermische Behandlung.....	47
3.1.4	Autogenmahlung	47
3.1.5	Elektrodynamische Fragmentierung	47
3.1.6	Hemmnisse für den Einsatz innovativer Zerkleinerungsverfahren.....	47
3.2	Innovative Sortierverfahren.....	48
3.2.1	Sensorbasierte Sortierverfahren	48
3.2.2	Advanced dry recovery (ADR)	49
3.2.3	Heating air and classification system (HAS)	50
4	Methodik der technisch-wirtschaftlichen Bewertung	52
4.1	Systemgrenzen.....	53
4.2	Erlöse einer Aufbereitungsanlage.....	57

4.3	Kosten einer Aufbereitungsanlage	61
4.3.1	Gerätekosten	62
4.4	Prozesskette.....	65
5	Ergebnisse und Diskussion.....	71
5.1	Fallbeispiel 1 mit jährlichem Durchsatz von 200.000 t.....	71
5.1.1	Szenario 1	71
5.1.2	Szenario 2	74
5.2	Fallbeispiel 2 mit jährlichem Durchsatz von 408.000 t.....	76
5.2.1	Szenario 1	76
5.2.2	Szenario 2	79
5.3	Fallbeispiel 3 mit jährlichem Durchsatz von 1.000.000 t.....	80
5.3.1	Szenario 1	81
5.3.2	Szenario 2	83
5.4	Vergleich der Ergebnisse.....	85
6	Zusammenfassung	94
	Literaturverzeichnis	96
	Abbildungsverzeichnis	98
	Tabellenverzeichnis.....	100

1 Einleitung

1.1 Grundlagen

Auf die Bau- und Abbruchabfälle entfällt ein Drittel des gesamten Abfallaufkommens in der EU [1]. In Österreich beträgt dieser Anteil ca. 16% [2]. Bau- und Abbruchabfälle sind im Sinne des Abfallwirtschaftsgesetzes 2002 Abfälle, die bei Bau- und Abbruchtätigkeiten entstehen [3]. Sie fallen überwiegend im Hoch- und Tiefbau, sowie bei Sanierungs- oder Instandhaltungsmaßnahmen an. Grundsätzlich können die Bau- und Abbruchabfälle in folgende Kategorien eingeteilt werden: Aushubmaterialien, mineralische Bauabfälle, sonstige Abfälle und gefährliche Abfälle. Gegenstand dieser Arbeit sind die mineralischen Bau- und Abbruchabfälle, die folgende Materialien umfassen: Bauschutt, Straßenaufbruch, Betonabbruch, Gleisschotter, Bitumen, Asphalt und Gips [2]. Alle diese Materialien lassen sich dem Recycling-Prozess zuführen und stellen die Grundlage für die Herstellung der Recycling-Baustoffe dar. Sowohl auf europäischer als auch auf österreichischer Ebene existieren viele Gesetze, Verordnungen und Richtlinien, die gemeinsam einen umfangreichen rechtlichen Rahmen für das Recycling bilden.

Die Baubranche ist einerseits ein der größten Verbraucher der natürlichen Rohstoffe. Andererseits hat die Baubranche ein der größten Potenziale für die Kreislaufwirtschaft. Dass dieses Potenzial in Österreich auch ausgenutzt wird, bestätigen die Daten aus dem Jahr 2021. Sie zeigen, dass ca. 70% der angefallenen Bau- und Abbruchabfälle den entsprechenden Behandlungsanlagen zugeführt wurde [2]. Die Recherche der Behandlungsanlagen im Raum Wien hat jedoch gezeigt, dass Recycling-Mischgranulat am meisten produziert und verkauft wird. Dieses stammt vor allem durch Aufbereitung der Massen aus dem Straßenbau und ist eine Mischung aus gebrochenem Asphalt, Beton und natürlicher Gesteinskörnung. Recycling-Betongranulat macht nur rund 30% des aktuellen Angebots an rezyklierten Gesteinskörnungen im Raum Wien aus. Das Recycling-Betongranulat entsteht durch Aufbereitung des Betons aus Straßen-, Brücken- und Ingenieurbau. Dieser Recycling-Baustoff wird für minderwertige Zwecke wiederverwendet, beispielsweise für Hinterfüllungen, technische Schüttungen etc. Die Antwort auf die Frage, warum Betonabbruch nicht mehr und qualitativer aufbereitet wird, liegt in der Konfiguration der Behandlungsanlagen. Sie werden im Rahmen dieser Arbeit in Fokus gesetzt.

Weiters gibt der Bericht des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie „Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen“ aus dem Jahr 2021 [4] an, dass die Beteiligung des österreichischen Bausektors an dem gesamten Materialverbrauch 14% beträgt. Der CO₂-Fußabdruck dieses Sektors liegt bei 8%. In beiden Fällen befindet sich die Baubranche eindeutig an der ersten Stelle. Außerdem wird berichtet, dass 50% der gesamten Rohstoffgewinnung in der EU den Bedarf des Bausektors deckt. Der Bausektor ist für rund 35% des gesamten

Abfallaufkommens in der Europäischen Union verantwortlich [4]. Das sind 840 Millionen Tonnen pro Jahr [1].

Um den genannten negativen Auswirkungen entgegenzuwirken hat die Europäische Union in den letzten Jahrzehnten intensiv an unterschiedlichen Lösungsstrategien gearbeitet. In den Kapiteln 1.3 bis 1.7 wird auf die einzelnen Initiativen näher eingegangen.

1.2 Hemmnisse für den Einsatz der rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton

Im Jahr 2021 wurden in Österreich rund 70% der angefallenen Bau- und Abbruchabfällen den entsprechenden Behandlungsanlagen zugeführt (siehe Tabelle 1-2) [2]. Somit ist die in der Abfallrahmenrichtlinie [4] definierte Zielvorgabe hinsichtlich Recycling-Quote erreicht. Die Eigenschaften der Recycling-Produkte sind jedoch sehr unterschiedlich und diese bestimmen die Einsatzgebiete der Recycling-Produkte. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten der Rezyklierung [5]:

- 1) Umwandlung der Abfälle in die Produkte der gleichen Wertigkeit, bekannt unter dem Begriff „Closed-loop recycling“

Im konkreten Fall der Rezyklierung von Bau- und Abbruchabfällen bedeutet das, dass die zerkleinerten und aufbereiteten Materialien als Zuschlagstoffe für neue Materialmischungen verwendet werden. So wird beispielsweise die natürliche Gesteinskörnung im Beton durch ein rezykliertes grobkörniges Betongranulat ausgetauscht.

- 2) Verarbeitung der Materialien zu andersartiger Verwertung, bekannt unter dem Begriff „Open-loop recycling“

Ein konkretes Beispiel ist die Verwertung von gebrochenem Betonabbruch in den ungebundenen Schüttschichten wie Tragschichten und Frostkoffer im Straßenbau, sowie als Verfüllungsmaterial oder Vegetationssubstrat.

ÖNORM EN 12620 definiert rezyklierte Gesteinskörnung als „*Gesteinskörnung aus aufbereitetem anorganischem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt war*“. [6]

In der Praxis werden folgende Einsatzgebiete für rezyklierte Gesteinskörnung bevorzugt: Trag- und Frostschuttschichten im Straßenbau, Damm- und Verfüllbaustoffe im Kanal- und Leitungsbau, Asphaltstraßenbau sowie Vegetationsschichten [5]. Die Verwertung als Betonzuschlag für konstruktive und nicht konstruktive Betonbauteile spielt immer noch eine untergeordnete Rolle.

Auf europäischer Ebene wird nur ca. 6% des rezyklierten Betonbruches als Zuschlag für die Betonherstellung verwendet. Der Vorreiter in Europa ist die Schweiz, in der Recycling-Beton ca. 25% der gesamten Betonmasse in Hochbau ausmacht [7]. Faktoren, die diesen Sachverhalt beeinflussen sind vor allem förderliche gesetzliche Rahmenbedingungen, sowie hohe Preise der natürlichen Gesteinskörnungen als Folge der Ressourcenknappheit [7].

Hemmnisse für einen vermehrten Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion lassen sich auf drei Ursachen zurückführen:

- **Schlechtere Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung** im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung.

Als Folge wird Beton mit schlechteren Eigenschaften, wie z.B. geringerer Druckfestigkeit, schlechterer Verarbeitbarkeit, größerer Wasseraufnahme etc., hergestellt [8]. Die Verarbeitbarkeit ist eine Eigenschaft des Frischbetons, die den Aufwand für das Mischen, den Transport, den Einbau und die Verdichtung zu einem homogenen Zustand bestimmt. Schlechtere Verarbeitbarkeit führt zu höherer Porosität, weil sich ein solcher Frischbeton nicht vollständig verdichten lässt. Die Konsistenz ist der wichtigste Parameter für die Verarbeitbarkeit und wird durch ein Setzmaß oder Ausbreitmaß bestimmt. Recycling-Beton hat ein niedrigeres Setzmaß verzeichnet als der Beton mit natürlicher Gesteinskörnung. Die Ursache dafür ist größere Wasseraufnahme und rauere Oberfläche sowie die unregelmäßige Kornform der rezyklierten Gesteinskörnung. Um bessere Verarbeitbarkeit zu erreichen, wird mehr Wasser gebraucht. Wang et al., 2021 berichtet von einem um 5% bis 15% größeren Wasserbedarf [8].

Wesentliche physikalische und chemische Eigenschaften, die sich im Fall eines Recycling-Betons verschlechtern, sind: Dichte, Widerstand gegen Karbonatisierung, sowie Beständigkeit gegenüber Chloridionen-Angriff. Die Dichte der rezyklierten Gesteinskörnung ist im Regelfall kleiner als die Dichte der natürlichen Gesteinskörnung. Der Grund dafür ist, dass im Fall einer rezyklierten Gesteinskörnung die natürlichen Aggregate mit einer Zementsteinschicht ummantelt werden. Diese Schicht besitzt eine höhere Porosität und somit geringere Dichte als die natürlichen Aggregate. Die Literatur geht von einer 5% Reduktion der Rohdichte des Betons im Fall eines vollständigen Austauschs der natürlichen Gesteinskörnung durch die rezyklierte Gesteinskörnung. Die Reduktionsrate ist abhängig von der jeweiligen Austauschrate [8]. Die mechanischen Eigenschaften des Recycling-Betons, die eine Verschlechterung im Vergleich zum Beton mit natürlicher Gesteinskörnung verzeichnen, sind: Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Zug- und Biegefestigkeit. Zusammenfassend lässt sich sagen das alle genannten mechanischen Kennwerte mit zunehmender Austauschrate der natürlichen durch die rezyklierte Gesteinskörnung [8] abnehmen.

Die Langzeiteigenschaften des Recycling-Betons sind auch schlechter als die Eigenschaften des Betons mit natürlicher Gesteinskörnung. Besonderes Augenmerk wird auf den Frost-Tau-Widerstand gelegt. Dieser ist deutlich geringer für einen Recycling-Beton. Ebenfalls nimmt mit der zunehmender Austauschrate der Gesteinskörnung der Widerstand gegen Alkali-Silica-Reaktion ab. Negativ beeinflusst wird ebenso das Schwindverhalten des Recycling-Betons [8].

Um der Verschlechterung der oben genannten Eigenschaften entgegenzuwirken, haben sich unterschiedliche Schonungsmethoden der rezyklierten Gesteinskörnung etabliert. Diese lassen sich grob in die Methoden für Reduktion der Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung, Methoden für die Entfernung des angehefteten Zementsteins und die Methoden ohne Anpassung der rezyklierten Gesteinskörnung unterteilen. Die häufigsten Methoden für die Verringerung der Porosität sind: beschleunigte Karbonatisierung, mikrobielle Behandlung, Zugabe von Puzzolanen, Nanosilikaten oder Polymerbasierte Beschichtungen. Die Entfernung der weichen Phase, d.h. des Zementsteins erfolgt durch unterschiedliche mechanische, thermische oder Behandlungen mit geeigneten Säuren. Die letzte Möglichkeit der Verbesserung der Eigenschaften des Recycling-Betons ist die Anpassung des Mischprozesses oder die Zugabe von Bewehrungsfasern [8].

- **Der verfügbare Markt** ist ziemlich begrenzt und die Wirtschaftlichkeit ist kaum gegeben. Der Grund dafür sind Verkaufspreise der rezyklierten Aggregate, die deutlich höher als die Preise der natürlichen Gesteinskörnung sind. Das lässt sich auf aufwändigere und kostenintensivere Produktionsprozesse der rezyklierten Gesteinskörnung im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung zurückführen [7].
- **Aktuelle Normenlage** verschafft keinen Raum für eine vermehrte Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonherstellung. Die zulässigen Recycling-Produkte sowie die dazugehörigen Austauschraten sind sehr begrenzt [7].

1.3 EU Green Deal

Die Initiative wurde im Jahr 2019 beschlossen und legt den Fokus auf Themen wie: Klima, Energie, Umwelt und Ozeane, Landwirtschaft, Verkehr, Industrie, Forschung und Innovation, Finanzen und regionale Entwicklung sowie eine zusätzliche Initiative mit dem Namen „Neues Europäisches Bauhaus“. Die letztgenannte Initiative verfolgt das Ziel, den Grünen Deal mit den Lebensräumen und Lebenserfahrungen zu verbinden. Eine der wichtigsten Stationen des Grünen Deals ist die Reduktion der Netto-Treibhausgasemissionen bis Jahr 2030 um 55% im Vergleich zum Jahr 1990. Der Beitrag, den die Bauwirtschaft zur Verwirklichung der EU-Ziele im Rahmen des Grünen Deals leisten soll, ist einerseits ein bewusster und sparsamer Umgang mit natürlichen Ressourcen und andererseits die Sanierung der bestehenden Wohn- und öffentlichen Gebäude [9].

1.4 Abfallrahmenrichtlinie

Die Antwort der Europäischen Union auf die Herausforderung der vermehrten Abfallproduktion sowie dessen extensiven Deponierung sind unterschiedliche Gesetze, Verordnungen und Richtlinien. Die wesentliche Rolle spielt dabei die Abfallrahmenrichtlinie, die im Jahr 2008 in Kraft getreten ist. Die Abfallrahmenrichtlinie 2008 schafft einen rechtlichen

Rahmen für die Abfallwirtschaft in den Mitgliedsstaaten der Europäischen Union. Sie erhält wichtige Begriffsbestimmungen der Abfallwirtschaft und definiert die Abfallhierarchie. Die Abfallhierarchie stellt eine Prioritätsreihenfolge dar, die bei der Schaffung von rechtlichen Vorschriften und politischen Maßnahmen im Bereich der Abfallvermeidung und -bewirtschaftung gilt. Grundsätzlich gilt, dass die Abfallvermeidung anzustreben ist. Abfallbeseitigung sollte nur in seltenen Fällen erfolgen. Dadurch sollte nicht nur die Schonung der Umwelt erfolgen, sondern auch der Weg zu einem nachhaltigen Ressourcenverbrauch geschaffen werden.



Abb. 1-1: Abfallhierarchie [4]

Wie in Abb. 1-1 ersichtlich wird, hat die Vermeidung der Abfälle die oberste Priorität. Die Vermeidung ist die Gesamtheit der Maßnahmen, die ergriffen werden, bevor ein Stoff, ein Material oder ein Erzeugnis zu Abfall wird. Diese Maßnahmen verringern einerseits die Abfallmenge. Dies erfolgt auch durch die Wiederverwendung von Erzeugnissen oder die Verlängerung ihrer Lebensdauer. Andererseits verringern diese Maßnahmen die schädlichen Auswirkungen des erzeugten Abfalls auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt. Zusätzlich verringern diese Maßnahmen den Gehalt der gefährlichen Stoffen in Materialien und Produkten [4].

Wenn die Entstehung des Abfalls nicht vermieden werden kann, ist die Vorbereitung zur Wiederverwendung anzustreben. Unter dem Begriff Wiederverwendung wird jedes Verfahren verstanden, bei welchem die Erzeugnisse oder Bestandteile, die keine Abfälle sind, wieder wie für den ursprünglichen Zweck verwendet werden. Vorbereitung zur Wiederverwendung ist jedes Verwertungsverfahren, bei dem Erzeugnisse oder deren Bestandteile, die zu Abfällen geworden sind, so vorbereitet werden, dass sie ohne weitere

Vorbehandlung wiederverwendet werden können. Dies umfasst die Prüfung, Reinigung und Reparatur [4].

Die dritte Stufe der Abfallhierarchie ist das Recycling. Die Abfallrahmenrichtlinie definiert Recycling als jedes Verwertungsverfahren, durch welches die Abfälle zu Stoffen, Materialien oder Erzeugnissen aufbereitet werden. Diese werden anschließend entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke eingesetzt. Recycling schließt die energetische Verwertung, sowie die Aufbereitung zu Materialien, die als Brennstoff oder zur Verfüllung verwendet werden, aus [4].

Wenn kein Recycling möglich ist, müssen die Abfälle verwertet werden. Verwertung ist jedes Verfahren, in dem Abfälle andere Materialien ersetzen. Abfallrahmenrichtlinie enthält weiters eine Liste der Verwertungsverfahren. Einige Beispiele der Verwertungsverfahren sind: Verwendung als Brennstoff oder als Mittel der Energieerzeugung, Rückgewinnung von Lösemitteln, Regenerierung von Säuren und Basen, etc. [4].

Als letzte Möglichkeit bietet sich die Beseitigung der Abfälle. Unter Beseitigung wird jedes Verfahren verstanden, das keine Verwertung ist, auch wenn dabei die Stoffe oder Energie zurückgewonnen werden. Eine Liste der Beseitigungsverfahren ist in der Abfallrahmenrichtlinie enthalten. Übliche Beseitigungsverfahren sind: Ablagerung in oder auf dem Boden, Verpressung, Verbrennung, etc. [4].

1.5 Abfallwirtschaftsgesetz 2002

Der Abfallwirtschaftsgesetz ist das bedeutendste österreichische Regelwerk, das die abfallrechtlichen Bestimmungen enthält. Das Gesetz definiert **Abfälle** folgendermaßen:

„§ 2. (1) Abfälle im Sinne dieses Bundesgesetzes sind bewegliche Sachen,

1. deren sich der Besitzer entledigen will oder entledigt hat oder

2. deren Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall erforderlich ist, um die öffentlichen Interessen (§ 1 Abs. 3) nicht zu beeinträchtigen.

(2) Als Abfälle gelten Sachen, deren ordnungsgemäße Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall im öffentlichen Interesse erforderlich ist, auch dann, wenn sie eine die Umwelt beeinträchtigende Verbindung mit dem Boden eingegangen sind. Die Sammlung, Lagerung, Beförderung und Behandlung als Abfall im öffentlichen Interesse kann auch dann erforderlich sein, wenn für eine bewegliche Sache ein Entgelt erzielt werden kann.“ [3]

Das Abfallwirtschaftsgesetz definiert **Bau- und Abbruchabfälle** als „Abfälle, die bei Bau- und Abbruchtätigkeiten entstehen.“ [3]

Diese Abfälle fallen im Hochbau oder Tiefbau (vor allem Straßen- und Schienenbau) sowie bei Sanierungs- und Instandhaltungsmaßnahmen an. Im Hochbau sind es Beton-, Ziegel- und sonstige Mauerwerksabbrüche. Bei Neubauten fällt Aushubmaterial an. In untergeordneten Mengen sind Holz, Metalle, Kunststoffe, gemischte Siedlungsabfälle sowie gefährliche Abfälle vorhanden. Im Tiefbau fallen vorwiegend Asphalt- und Betonabbruch, Aushubmaterial (insb. technisches Schüttmaterial und Gleisaustragsmaterial), aber auch z. B. Verschnitte von Schalholz, Bewehrungsstäbe etc. an [2].

Folgende Tabelle zeigt die Zusammensetzung von Bau- und Abbruchabfällen.

Tabelle 1-1: Zusammensetzung von Bau- und Abbruchabfällen Quelle: [2]

Bau- und Abbruchabfälle			
Aushubmaterialien	Mineralische Bauabfälle	Sonstige Abfälle	Gefährliche Abfälle
Bodenaushubmaterial	Bauschutt	Bau- / Abbruchholz	Asbest und Asbestzement
Tunnelausbruchmaterial	Straßenaufbruch	Kunststoffe (Verpackungen)	Teerhaltige Abfälle (insb. Asphalt)
Technisches Schüttmaterial	Betonabbruch	Metalle	PAK – haltige Abfälle
Gleisaushubmaterial	Gleisschotter	Gemischte Siedlungsabfälle	Bestimmte künstliche Mineralfasern
Nicht gefährliche verunreinigte Böden	Bitumen, Asphalt	Baustellenabfälle (kein Bauschutt)	Gefährlich verunreinigte Böden
	Gips		

1.6 Abfallverzeichnis

Das aktuelle Abfallverzeichnis ist seit dem 01.01.2022 in Kraft. In dem Verzeichnis werden die Abfallarten gemäß Abfallverzeichnisverordnung bezeichnet. Die Verordnung ist am 01.10.2020 in Kraft getreten. Sie gilt für gefährliche und nicht gefährliche Abfälle gemäß dem Abfallwirtschaftsgesetz 2002. Das Abfallverzeichnis umfasst 25 Gruppen, von welchen nur eine Gruppe für diese Arbeit relevant ist, und zwar Gruppe 31: Abfälle mineralischen Ursprungs (ohne Metallabfälle).

Die Abfallgruppe 31 enthält sechs Untergruppen. Die Untergruppe mit größter Relevanz für diese Arbeit ist Untergruppe 314, die die sonstigen festen mineralischen Abfälle umfasst. Zu dieser Untergruppe gehören die mineralischen Bau- und Abbruchabfälle gemäß Tabelle 1-1. Diese sind mit folgenden Schlüsselnummern eindeutig gekennzeichnet [10]:

- 31409: Bauschutt (keine Baustellenabfälle)
- 31410: Straßenaufbruch
- 31427: Betonabbruch
- 31467: Gleisschottermaterial

Wenn die Abfälle gefährlich kontaminiert sind, wird die Schlüsselnummer um zwei zusätzliche Codestellen erweitert, und zwar 77. So weist beispielsweise die Schlüsselnummer 31427 77 darauf hin, dass es sich um einen kontaminierten Betonabbruch handelt. Verfestigte, immobilisierte, sowie stabilisierte Abfälle werden durch die Ergänzung der Schlüsselnummer mit 91 erkennbar gemacht. Die „ausgestuften“ Abfälle sind an den zusätzlichen Codestellen 88 erkennbar [10]. Ausstufung ist im Sinne des Abfallwirtschaftsgesetzes „das Verfahren zum Nachweis, dass ein bestimmter Abfall, welcher gemäß einer Verordnung nach § 4 als gefährlich erfasst ist, im Einzelfall nicht gefährlich ist.“ [3]

1.7 Recycling-Baustoffverordnung

Die Recycling-Baustoffverordnung ist am 01. Jänner 2016 in Kraft getreten und folgt dem Ziel, eine hohe Qualität von bei Bau- und Abbruchtätigkeiten anfallenden Abfällen sicherzustellen. Sie fördert dadurch das Recycling von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen und gibt konkrete Rahmenbedingungen dafür vor. Die Recycling-Baustoffverordnung definiert, welche Abfallarten für die Herstellung der Recycling-Baustoffe herangezogen werden dürfen, und definiert die Qualitätsklassen der Recycling-Baustoffe.

Im Anhang 1 der Recycling-Baustoffverordnung werden in der Tabelle 1 die Abfallarten definiert, die für die Herstellung von Recycling-Baustoffen zulässig sind. Unter anderem sind es die mineralischen Bau- und Abbruchabfälle: Bauschutt, Straßenaufbruch, Betonabbruch, sowie Gleisschottermaterial.

Weiters definiert die Recycling-Baustoffverordnung folgende Begriffe, die für diese Arbeit relevant sind:

*„Im Sinne dieser Verordnung ist 1. **Abbruch** jede Abbruchtätigkeit, bei der Bau- oder Abbruchabfälle anfallen, dazu zählen auch Teilabbruch, Umbau, Renovierung, Sanierung, Reparatur, Abbauarbeiten, Instandhaltungsarbeiten und Instandsetzungsarbeiten.“ [11]*

„Recycling-Baustoff

eine aus Abfällen hergestellte natürliche, industriell hergestellte oder recycelte Gesteinskörnung, die gemäß der EU-Bauprodukte-Verordnung als Baustoff verwendet werden kann“ [11]

Der zweite Abschnitt der Recycling-Baustoffverordnung spielt eine wesentliche Rolle, weil er die Pflichten bei Bau- und Abbruchtätigkeiten definiert. Grundsätzlich ist bei

einem Bauvorhaben, bei dem insgesamt mehr als 750 Tonnen Bau- und Abbruchabfälle mit der Ausnahme des Bodenaushubmaterials anfallen, eine Schad- und Störstofferkundung gemäß ÖNORM B 3151 „Rückbau von Bauwerken als Standardabbruchmethode“ durchzuführen. Im Rahmen dieser Erkundung sind jene Bauteile zu dokumentieren, welche einer Vorbereitung zur Wiederverwendung zugeführt werden können. Die Linienbauwerke und Verkehrsflächen sind von diesen Regelungen ausgenommen. Im Lauf des Rückbaus ist sicherzustellen, dass wiederverwendbare Bauteile so ausgebaut und an Dritte übergeben werden, dass die nachfolgende Wiederverwendung nicht erschwert oder unmöglich gemacht wird. Entfernung von Schadstoffen und gefährlichen Abfällen wie beispielsweise asbest- oder teerhaltigen Abfällen ist vorgegeben. Dieser Abschnitt definiert ebenso eine Trennpflicht [11].

Die Trennpflicht schreibt vor, dass bei Bau- und Abbruchtätigkeiten gefährliche von nicht gefährlichen Abfällen vor Ort zu trennen sind. Vor Ort zu trennen sind ebenso die für den Rückbau festgelegten Hauptbestandteile, die beim Abbruch entstehen. Diese sind: Bodenaushubmaterial, mineralische Abfälle, Ausbauasphalt, Holzabfälle, Metallabfälle, Kunststoffabfälle und Siedlungsabfälle. Wenn die Trennung am Ort der Entstehung technisch nicht möglich ist oder sie unverhältnismäßige Kosten verursacht, muss die Trennung in einer dafür genehmigten Behandlungsanlage erfolgen. Die Trennpflicht gilt nicht für Abfälle, die gemeinsam zu einem bestimmten Recycling-Baustoff aufbereitet werden. Die oben angeführten Abfälle sind auch bei einem Neubau ab gesamtem Brutto-Rauminhalt von mehr als 3.500 m³ zu trennen, ausgenommen bei Linienbauwerken oder Verkehrsflächen. Die Verantwortung für die Trennung der Abfälle tragen der Bauherr und der Bauunternehmer. Zusätzlich sind sie für die Bereitstellung der hierfür erforderlichen Flächen und Einrichtungen verantwortlich [11].

Die Trennpflicht hat eine große Bedeutung, weil sie sicherstellt, dass die getrennten Materialflüsse den dafür geeigneten Behandlungsanlagen zugeführt werden. Für die Aufbereitung der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle bedeutet das konkret, dass der Aufwand für die Sortierung und Entfernung von Schad- und Störstoffen wesentlich verringert wird.

In weiterer Folge bestimmt die Recycling-Baustoffverordnung zulässige Einsatzbereiche und Verwendungsverbote für die Recycling-Baustoffe. Diese werden im Kapitel 1.9.1 angegeben.

1.8 Anfallender Bau- und Abbruchabfall in Österreich

Vom Gesamtaufkommen in Österreich im Jahr 2021 betrug der Anteil an Aushubmaterialien 59,6%, gefolgt von Bau- und Abbruchabfällen mit 16,1 %. Auf diese zwei Abfallfraktionen entfällt ca. 75% des Gesamtaufkommens [2].

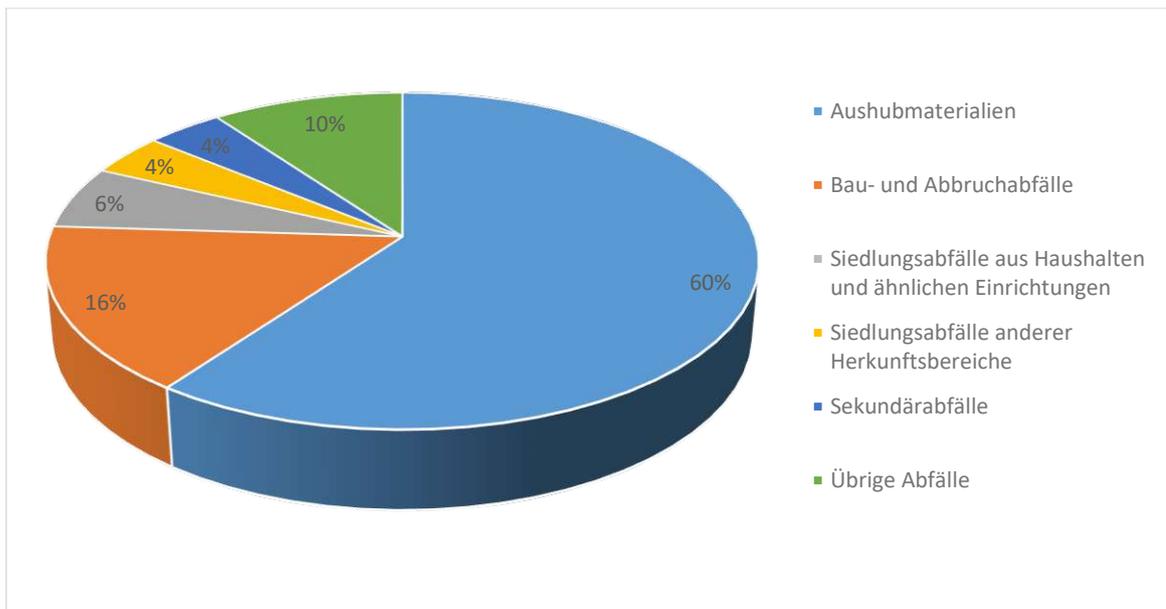


Abb. 1-2: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens im Jahr 2021 [2]

Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich [2] berichtet von einem 41% Anstieg bei den Aushubmaterialien im Vergleich zum Jahr 2015. Diese Steigerung ist vor allem auf die großen Bauvorhaben zurückzuführen, wie z.B. Semmering- oder Brennerbasis-Tunnel, sowie die Koralmbahn. Bau- und Abbruchabfälle verzeichnen einen Anstieg von 25%, was auf eine vermehrte Bautätigkeit und eine verbesserte statistische Erfassung zurückzuführen ist. Das Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen betrug im Jahr 2015 rund 10 Millionen Tonnen und im Jahr 2021 rund 12,5 Millionen Tonnen. Diese Massen berücksichtigen keine Aushubmaterialien, Holzabfälle, Verpackungen, Kunststoffabfälle, Metallabfälle, gemischte Siedlungsabfälle, künstliche Mineralfasern, Asbest und sonstige gefährliche Abfälle. [2].

In der Abb. 1-3 ist ein kontinuierlicher Anstieg des Aufkommens der Bau- und Abbruchabfälle ersichtlich [2].

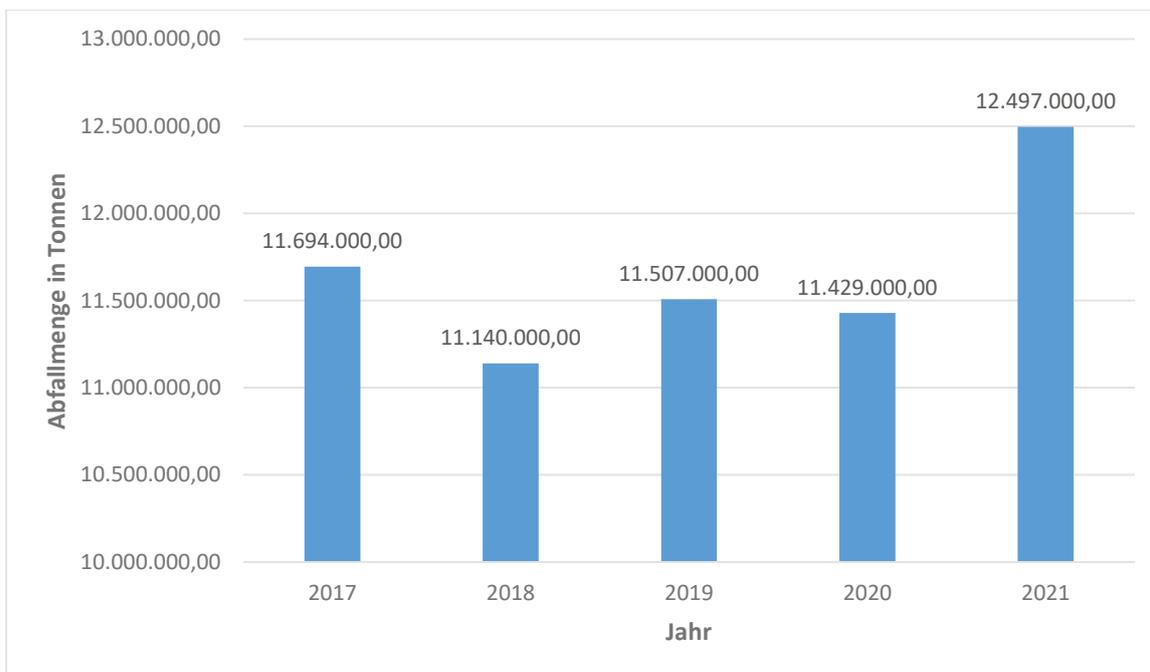


Abb. 1-3: Entwicklung des Aufkommens von Bau- und Abbruchabfällen 2017–2021 [2]

Von ca. 12,5 Mio. t angefallenen Bau- und Abbruchabfällen wurden rund 8,9 Mio. t den Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle zugeführt. Rund 1,09 Mio. t wurden deponiert [2]. Tabelle 1-2 gibt einen Überblick über die wesentlichen mineralischen Fraktionen, die den entsprechenden Behandlungsanlagen zugeführt wurden, sowie deren Massenströme.

Tabelle 1-2: Aufkommen, Input in Behandlungsanlagen und Deponierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2021 [2]

SN	Abfallbezeichnung	Aufkommen [t]	Input in Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle [t]	Deponierung [t]
31409	Bauschutt (keine Baustellenabfälle)	4.325.000	2.569.000	885.000
31409 18	Mischungen aus ausgewählten Abfällen aus Bau- und Abrissmaßnahmen	201.000	114.000	27.000
31410	Straßenaufbruch	707.000	741.000	8.000
31427	Betonabbruch	4.190.000	3.303.000	13.000
31427 17	Betonabbruch (nur ausgewählte Abfälle aus Bau- und Abrissmaßnahmen)	285.000	253.000	6.000
31438	Gips	100.000	0	84.000

31467	Gleisschotter	204.000	161.000	13.000
54912	Bitumen, Asphalt	1.856.000	1.759.000	47.000
91206	Baustellenabfälle (kein Bauschutt) – Baustellenabfälle werden in der Regel einer mechanischen Vorsortierung unterzogen, die nicht als Abfallbehandlung erfasst wird	596.000	0	0
-	Sonstige nicht gefährliche mineralische Bau- und Abbruchabfälle	33.000	4.000	8.000
Gesamt		12.497.000	8.904.000	1.091.000

Neben den in Tabelle 1-2 angeführten Massen der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle, werden den Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle rund 1,854 Mio. Tonnen Bodenaushubmaterial der Klasse A2, sowie 1,442 Mio. Tonnen Bodenaushubmaterial mit Hintergrundbelastung zugeführt [2].

In Österreich existierten im Jahr 2021 insgesamt 941 Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle. Davon werden 165 stationär betrieben und 776 mobil betrieben. Im Sinne des Abfallwirtschaftsgesetzes „sind **Behandlungsanlagen** ortsfeste oder mobile Einrichtungen, in denen Abfälle behandelt werden, einschließlich der damit unmittelbar verbundenen, in einem technischen Zusammenhang stehenden Anlagenteile.“ [3]

Der Statusbericht definiert stationäre Anlagen als gänzlich ortsfeste Einrichtungen oder solche, die über einen längeren Zeitraum an einem Standort betrieben werden [2]. Die Behandlungsanlagen werden gemäß dem Abfallwirtschaftsgesetz 2002, BGBl. I Nr. 102/2002 idgF als mobil definiert, wenn sie nicht länger als sechs Monate an verschiedenen Standorten betrieben werden [3].

Tabelle 1-3 verschafft einen Überblick über die Anzahl der Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle in Österreich, sowie über deren Verteilung in einzelnen Bundesländern.

Tabelle 1-3: Auflistung der stationären und mobilen Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle in den jeweiligen Bundesländern im Jahr 2021 [2]

Bundesland	Anzahl stationärer Anlagen	Anzahl mobiler Anlagen
Burgenland	10	für mobile Anlagen erfolgt keine Zuordnung zu Bundesländern
Kärnten	6	
Niederösterreich	39	

Oberösterreich	18	
Salzburg	19	
Steiermark	11	
Tirol	50	
Vorarlberg	6	
Wien	6	
Österreich	165	776
	Gesamt	941

Die Aufbereitung in den Behandlungsanlagen hat das Ziel, die Baustoffe zu zerkleinern, sieben, klassieren, sowie die vorhandenen Schad- und Störstoffe abzutrennen. Es wird die Herstellung von qualitätsgesicherten Recycling-Baustoffen angestrebt. Diese werden zweifach eingesetzt, entweder direkt als Baustoff (technische Schüttungen, Tragschichten etc.) oder als Zuschlagstoffe für die Produktion von Baustoffen (Asphaltmischgut, Zement oder Beton). In der Regel bestehen Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle aus einem Brecher und einer darauffolgenden Siebanlage.

Die Behandlungsanlagen in Österreich haben im Jahr 2021 einen Output von 13,5 Mio. t verzeichnet. Rund 8.956.000 t der Outputmaterialien waren Recyclingbaustoffe gemäß Recycling-Baustoffverordnung [2]. Wie in Tabelle 1-4 ersichtlich wird, am meisten produziert wurde der Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse U-A. Dieser Recycling-Baustoff eignet sich sowohl für ungebundenen als auch für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz.

Tabelle 1-4: Output [t] an Recyclingbaustoffen gemäß Recyclingbaustoffverordnung aus Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle im Jahr 2021 [2]

SN	Abfallbezeichnung	Output [t]
31490	Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse U-A	8.477.000
31491	Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse U-B	302.000
31494	Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse B-B	87.000
31496	Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse B-D	54.000
31493	Recycling-Baustoff der Qualitätsklasse H-B	36.000
	Summe:	8.956.000

Alle angeführten Daten bestätigen, dass in Österreich ein positiver Trend hinsichtlich Rezyklierung von Bau- und Abbruchabfällen herrscht. Im Jahr 2021 betrug der Anteil des deponierten mineralischen Bauschuttes lediglich 3,11% der deponierten Abfälle. Das sind ca. 912.000 Tonnen [2].

Die Motivation für die Rezyklierung von Bau- und Abbruchabfällen ist vielfältig. Der vom Joint Research Institute veröffentlichte Report „Use of recycled aggregate“ aus 2023 nennt folgende Vorteile der Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung für die Betonherstellung [1]:

- Verringerung der deponierten Masse und somit Entlastung der Umwelt,
- Geringerer Bedarf nach natürlicher Gesteinskörnung, welche üblicherweise den Flüssen entnommen wird,
- Reduktion des CO₂-Abdrucks im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung. Hier wird vor allem der CO₂-Abdruck aus dem Beschaffungsprozess (Transport) berücksichtigt. Wenn die rezyklierte Gesteinskörnung aber eine gute Qualität aufweist, verringert sich der gesamte CO₂-Abdruck.

1.9 Normative Grundlagen zur Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung in Österreich

Die aktuellen Normen, die die wesentlichen Regelungen für die Gesteinskörnungen im Beton enthalten sind die europäische Norm ÖNORM EN 12620:2014, sowie der dazugehörige nationale Anhang ÖNORM B 3131:2016-08. Die Regelungen für die Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau sind in der ÖNORM EN 13242:2014, sowie ÖNORM B 3132:2016-08 enthalten. ÖNORM B 3140:2020-11 umfasst die Regelungen für Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton.

Wesentliches Regelwerk für die Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität des Betons ist ÖNORM B 4710-1.2018-01. Die größte Relevanz für diese Arbeit hat jedoch der Anhang E, der die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM B 3140 regelt. Dessen Inhalte werden in Kapitel 1.9.2 erläutert.

1.9.1 Klassifikation der rezyklierten Gesteinskörnung und deren Bestandteile

ÖNORM B 3140 definiert folgende Materialbezeichnungen für rezyklierte Gesteinskörnungen [12]:

- | | |
|-----|--|
| RA | rezykliertes gebrochenes Asphaltgranulat mit einem Masseanteil von mindestens 80 % Asphalt |
| RAB | rezykliertes gebrochenes Asphalt-Beton-Mischgranulat |
| RB | rezykliertes gebrochenes Betongranulat |
| RG | rezykliertes Granulat mit einem Masseanteil von mindestens 50 % Gestein (natürliches und/oder rezykliertes) sowie allenfalls auch Beton und/oder Asphalt |
| RM | rezykliertes gebrochenes Mischgranulat mit einem Masseanteil von maximal 50 % Gestein (natürliches und/oder rezykliertes) sowie Beton und/oder Asphalt |
| RH | rezyklierter Hochbausand, rezyklierter Hochbausplitt |

- RHZ rezyklierter Hochbauziegelsand, rezyklierter Hochbauziegelsplitt
- RMH rezyklierte mineralische Hochbaurestmassen
- RS Recyclingsand
- RZ rezyklierter Ziegelsand, rezyklierter Ziegelsplitt

ZIEGELBRUCH

Herkunft: Ziegelproduktion, Abbruch



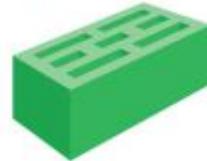
RZ

Recycelter Ziegelsand,
 Recycelter Ziegelsplitt (vorwiegend Ziegel)



Qualitätsbaustoff für

Zuschlagstoff für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton u. Leichtbeton; Stabilisierungen, Drainageschichten, Füllungen, Schüttungen



weitere für:
 - Dachbegrünungen
 - Landschaftsbau

HOCHBAU/ZIEGELBRUCH

Herkunft: Wohnbau- und Hochbauabbruch



RHZ

Recycelter Hochbauziegelsand
 Recycelter Hochbauziegelsplitt (Ziegel [über 30 %] mit z.B. Betonanteil)



Qualitätsbaustoff für

Zuschlagstoff für die Produktion von Mauerwerksteinen, Beton u. Leichtbeton; Stabilisierungen, Füllungen, Schüttungen, Estriche



HOCHBAUABBRUCH

Herkunft: Industriebau- und Allgemeiner Hochbauabbruch



RH

Recycelter Hochbausand
 Recycelter Hochbausplitt (Ziegel [unter 30 %] mit z.B. Betonanteil)



Qualitätsbaustoff für

stabilisierte Schüttungen, stabilisierte Künettenverfüllungen, Bauwerkshinterfüllungen, Sportplatzbau



weitere für:
 - Sportsärtenbau
 - Landschaftsbau
 - Land- und forstwirtschaftlichen Wegebau

MINERALISCHE HOCHBAU-RESTMASSEN

Herkunft: Industriebau- und Allgemeiner Hochbauabbruch



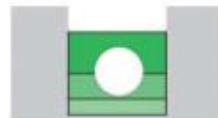
RMH

Recycelte mineralische Hochbau-Restmassen (Beton, Ziegel, natürliches Gestein)



Qualitätsbaustoff für

Künettenverfüllungen, Hinterfüllungen, Schüttungen, Sportplatzbau-Drainage



RECYCLING-SAND

Herkunft: Industriebau- und Allgemeiner Hochbauabbruch



RS

Recycling-Sand



Qualitätsbaustoff für

die Bettung von Energie- und Fernmeldekabeln (Kabelsand), von Leitungsrohren, z.B. von Kanal-, Gas- und Wasserleitungsrohren; sowie für weitere Infrastruktureinrichtungen

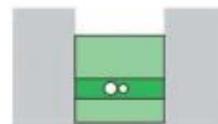


Abb. 1-4: Die 10 Qualitätsbaustoffe nach RBV [13]

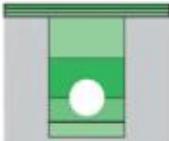
<p>ASPHALTAUFBRUCH Herkunft: Straßenbau</p>	<p>RA Recycliertes gebrochenes Asphaltgranulat (vorwiegend Asphalt)</p>	<p>Qualitätsbaustoff für ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlichen Wegebau, Zuschlagstoff für Asphaltproduktion</p>
		
<p>BETONABBRUCH Herkunft: Straßenbau, Brückenbau, Industriebau</p>	<p>RB Recycliertes gebrochenes Betongranulat (vorwiegend Beton)</p>	<p>Qualitätsbaustoff für ungebundene obere und untere Tragschichten, zementgebundene Tragschichten, landwirtschaftlichen Wegebau, Zuschlagstoff für Betonproduktion, hochwertiges Künnettenfüllmaterial, Drainageschichten</p>
		
<p>ASPHALT/BETONABBRUCH Herkunft: Straßenbau, Parkplätze, Brückenbau</p>	<p>RAB Recycliertes gebrochenes Asphalt/Beton- Mischgranulat (Asphalt und Beton)</p>	<p>Qualitätsbaustoff für ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten, landwirtschaftlichen Wegebau</p>
		
<p>MINERALISCHE RESTMASSEN Herkunft: Straßenbau</p>	<p>RM Recycliertes gebrochenes Mischgranulat aus Beton, Asphalt und natürlichem Gestein</p>	<p>Qualitätsbaustoff für ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten</p>
		
<p>RECYCLIERTES GESTEIN Herkunft: Eisenbahnbau, Straßenbau</p>	<p>RG Recycliertes Granulat aus Gestein, Beton und/oder Asphalt</p>	<p>Qualitätsbaustoff für ungebundene obere Tragschichten, ungebundene untere Tragschichten, gebundene Tragschichten</p>
		

Abb. 1-5: Die 10 Qualitätsbaustoffe nach RBV [13]

Für die rezyklierten Gesteinskörnungen, die der Recycling-Baustoffverordnung (RBV) unterliegen, werden in der Tabelle 1 der RBV entsprechend ihren Eigenschaften in Bezug auf die Umweltverträglichkeit geregelt. Tabelle 1 der RBV definiert ebenfalls die zulässigen Einsatzgebiete und Verwendungsverbote für einzelnen Qualitätsklassen der rezyklierten Gesteinskörnungen. Es wird zwischen folgenden Qualitätsklassen unterschieden:

- U-A (ungebunden – A),
- U-B (ungebunden – B),
- U-E (ungebunden – E),
- H-B (für hydraulische Bindung – B),
- B-B (für bituminöse Bindung – B),
- B-C (für bituminöse Bindung – C),
- B-D (für bituminöse Bindung – D),
- D (Stahlwerkschlacke D) [11].

Bei den ersten drei Qualitätsklassen (U-A, U-B, U-E) handelt es sich um Gesteinskörnungen für den ungebundenen, sowie für den hydraulisch oder bituminös gebundenen Einsatz. Die Qualitätsklassen U-A und U-E sind für folgende Einsatzbereiche zugelassen:

- Ungebundene Anwendung ohne gering durchlässige, gebundene Deck- oder Tragschicht,
- Ungebundene Anwendung unter gering durchlässiger, gebundener Deck- oder Tragschicht,
- Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C12/15 oder der Festigkeitsklasse C8/10 ab der Expositionsklasse XC1,
- Herstellung von Asphaltmischgut [11].

Die Qualitätsklasse U-B wird für die gleichen Einsatzbereiche mit der Ausnahme der ungebundenen Anwendung ohne gering durchlässige, gebundene Deck- oder Tragschicht zugelassen. Die Qualitätsklasse H-B wird darf ausschließlich für Herstellung von Beton ab der Festigkeitsklasse C12/15 oder der Festigkeitsklasse C8/10 ab der Expositionsklasse XC1 verwendet werden. Die Qualitätsklassen B-B, B-C und B-D sind Gesteinskörnungen, insbesondere Ausbauasphalt, die zur Herstellung von Asphaltmischgut verwendet werden dürfen. Die Qualitätsklasse D bezeichnet die Stahlschlacken direkt aus der Produktion. Diese dürfen ausschließlich für die Herstellung von Asphaltmischgut eingesetzt werden [11].

Anhang 2 der Recycling-Baustoffverordnung gibt relevante Parameter und Grenzwerte für jeweilige Qualitätsklasse an. Für die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 12620, die der RBV unterliegen und die in weiterer Folge für die Herstellung des Recycling-Betons geeignet sind, sind ausschließlich die Qualitätsklassen U-A, U-B, U-E und H-B zulässig [12].

Die Klassifizierung der rezyklierten Gesteinskörnungen erfolgt gemäß ihrer stofflichen Zusammensetzung. Die ÖNORM B 3140 unterscheidet folgende Bestandteile nach den Bestimmungen gemäß ÖNORM EN 12620 und ÖNORM EN 13242 [12]:

- Rc* Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
- Ru* ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulische gebundene Gesteinskörnung
- Rb* Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nichtschwimmender Porenbeton
- Ra* bitumenhaltige Materialien
- Rg* Glas
- FL* schwimmendes Material, als Volumenanteil angegeben
- X* sonstige Materialien:
 - bindige Materialien (d. h. Ton und Böden);
 - verschiedene Materialien: (eisen- und nicht eisenhaltige) Metalle, nichtschwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips.

ÖNORM EN 12620 definiert Kategorien der Bestandteile von groben rezyklierten Gesteinskörnungen, die in Tabelle 1-5 ersichtlich werden. Weiters definiert ÖNORM EN 12620 grobe Gesteinskörnung als größere Korngruppen mit dem Durchmesser *D* nicht kleiner als 4 mm und *d* nicht kleiner als 2 mm. Dabei ist *D* die obere Siebgröße und *d* die untere Siebgröße [6].

Tabelle 1-5: Kategorien der Bestandteile von groben rezyklierten Gesteinskörnungen [6]

Bestandteil	Gehalt Massenanteil in %	Kategorie
Rc	≥ 90	RC ₉₀
	≥ 80	RC ₈₀
	≥ 70	RC ₇₀
	≥ 50	RC ₅₀
	< 50	RC _{angegeben}
	Keine Anforderung	RC _{NR}
Rc + Ru	≥ 95	RCU ₉₅
	≥ 90	RCU ₉₀
	≥ 70	RCU ₇₀
	≥ 50	RCU ₅₀
	< 50	RCU _{angegeben}
	Keine Anforderung	RCU _{NR}
Rb	≤ 10	Rb ₁₀₋
	≤ 30	Rb ₃₀₋
	≤ 50	Rb ₅₀₋
	> 50	Rb _{angegeben}
	Keine Anforderung	Rb _{NR}
Ra	≤ 1	Ra ₁₋
	≤ 5	Ra ₅₋
	≤ 10	Ra ₁₀₋
X + Rg	≤ 0,5	XRg _{0,5-}
	≤ 1	XRg ₁₋
	≤ 2	XRg ₂₋

	Gehalt cm ³ / kg	
FL	≤ 0,2 ^{a)}	FL _{0,2} -
	≤ 2	FL ₂ -
	≤ 5	FL ₅ -

^{a)} Die Kategorie ≤ 0,2 gilt nur für besondere Anwendungen, die eine hochwertige Oberflächenbeschaffenheit erfordern

Tabelle 2 der ÖNORM B 3140 gibt die Materialbezeichnungen in Abhängigkeit von Kategorien der Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 12620 an. Diese werden in Tabelle 1-6 ersichtlich.

Tabelle 1-6: Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 12620 [12]

Materialbezeichnung	Beispiel	Kategorien nach Bestandteilen					
		Rc	Rc +Ru	Rb ^a	Ra	X + Rg	FL
RB-A1	sortenreiner Betonbruch, z. B. im Fertigteilwerk, Betonstraßen	RC ₉₀	RCu ₉₅	Rb _{NR}	Ra ₁ -	XRg ₁ -	FL _{0,2} -
RB-A2	Betonbruch	RC ₉₀	RCu _{NR}	Rb _{NR}	Ra ₁₀ -	XRg ₁ -	FL ₂ -
RG-A3 ^b	wiederaufbereitete, natürliche Gesteinskörnungen, z. B. gebrochener Gleisschotter	RC _{NR}	RCu ₉₅	Rb _{NR}	Ra ₅ -	XRg ₁ -	FL _{0,2} -
RH-B	Aufbereiteter Hochbausplitt (mindestens 50 % Betonanteile)	RC ₅₀	RCu ₇₀	Rb ₃₀ -	Ra ₅ -	XRg ₁ -	FL ₂ -
RMH-C	Aufbereitete mineralische Hochbaurestmasse	RC _{NR}	RCu _{NR}	Rb _{NR}	Ra ₁₀ -	XRg ₁ -	FL ₂ -

a Masseanteil von glasierter Keramik höchstens 5 %
b Masseanteil von Ru mindestens 50 %

ÖNORM B 3140 regelt die Bezeichnung von rezyklierten Gesteinskörnungen. Die Kennzeichnung von rezyklierten Gesteinskörnungen, die gemäß ÖNORM EN 12620 produziert werden, setzt sich zusammen aus [12]:

- der Materialbezeichnung,
- der Korngröße d/D und
- der entsprechenden Qualitätsklasse.

1.9.2 Rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonherstellung

Grundsätzlich gelten folgende Anforderungen an die rezyklierte Gesteinskörnung für Betonherstellung gemäß dem vom Joint Research Institute veröffentlichten Report „Use of recycled aggregate“ aus 2023 [1]:

- **Ausreichende Festigkeit und Steifigkeit sowie eine geringe Wasseraufnahme**
Mit 70% des gesamten Betonvolumens beeinflussen die Eigenschaften der Gesteinskörnung die Eigenschaften des Betons wesentlich. Die Wasseraufnahme steht im direkten Zusammenhang mit Porosität und Festigkeit. Da die rezyklierten Gesteinskörnungen höhere Porosität aufweisen, ist die Wasseraufnahme auch größer. Das wird negativ gesehen, weil mit zunehmender Wasseraufnahme die Dauerhaftigkeit des

Betons abnimmt. Negativ beeinflusst wird auch die Verarbeitbarkeit des frischen Betons.

- **Möglichst runde Kornform**

Die Anforderungen an die Kornform sind immer gleich und unabhängig davon, ob natürliche oder rezyklierte Gesteinskörnung verwendet wird. Als Folge einer unzureichenden Aufbereitung kann es passieren, dass rezyklierte Gesteinskörnungen eine plattige und flächige Kornform aufweisen, was sich negativ auf die Verarbeitbarkeit auswirkt. Daraus ergibt sich wiederum ein größerer Zementbedarf.

- **Kontrollierte und nachgewiesene Korngrößenverteilung**

Es sind gleiche Korngrößenverteilungen wie bei den natürlichen Gesteinskörnungen anzustreben. Der wesentliche Unterschied sind kleinere zulässige Mengen der Feinanteile, weil diese im Fall der rezyklierten Gesteinskörnung sehr schlechte Eigenschaften aufweisen.

Feinanteile sind gemäß der ÖNORM EN 12620 „Anteil der Gesteinskörnung, der durch das 0,063mm Sieb hindurchgeht.“ [6]

- **Chemische Bestandteile sollten den Anforderungen entsprechen**

Die Gesteinskörnung und in weiterer Folge der Beton darf nicht durch Chlorid-Ionen, Sulfat oder Alkali-Kieselsäure Angriff beeinträchtigt werden. Um die Anforderungen bzw. Grenzwerte der chemischen Bestandteile zu erfüllen, sind aufwändigere Siebung- und Klassierungsprozesse erforderlich.

Rechtlich werden die oben genannten Punkte in der ÖNORM B 4710-1 zusammengefasst. ÖNORM B 4710-1 definiert die Anforderungen an Beton hinsichtlich dessen Eigenschaften, Ausgangsstoffen, Zusammensetzung, Lieferung, Produktionskontrolle und Konformitätskriterien. Sie basiert auf der ÖNORM EN 206. Der Anhang E der ÖNORM B 4710-1 enthält Regelungen für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen der Typen: RB-A1, RB-A2, RG-A3 und RH-B nach ÖNORM B 3140.

Die rezyklierten Gesteinskörnungen dürfen im Beton verwendet werden, wenn ihre Eignung gemäß ÖNORM B 12620, ÖNORM B 3131 und ÖNORM B 3140 nachgewiesen wurde. Die Mindestanforderungen an diese rezyklierte Gesteinskörnungen sind der Tabelle 2 der ÖNORM B 3140:2016 zu entnehmen. Sofern die Masse der rezyklierten Gesteinskörnung 5% der Masse der gesamten Gesteinskörnung überschreitet, muss dies in der Betonbezeichnung kenntlich gemacht werden. Die Verwendung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ist dem Bauherrn vorab bekannt zu geben. Die Verwendung ist ebenso bei der Bemessung zu berücksichtigen. Es ist untersagt, mehrere Typen der rezyklierten Gesteinskörnung in einer Betonsorte zu mischen. Es darf nur ein Typ von rezyklierter Gesteinskörnung innerhalb einer Betonsorte verwendet werden [14].

Folgende Punkte müssen gleichzeitig eingehalten werden, um die rezyklierten Gesteinskörnungen der Typen RB-A1, RB-A2 oder RG-A3 verwenden zu dürfen [14]:

- nicht vorgespannte Bauteile,
- nicht ermüdungsgefährdete Bauteile gemäß ÖNORM EN 1992-1-1:2015, Abschnitt 6.8 bzw. ÖNORM B 1992-1-1:2018, Abschnitt 9.6,
- Festigkeitsklasse < C40/50,
- Bauteile ohne treibenden Angriff (XAT),
- bei geringem Alkalieneintrag und geringer Durchfeuchtung (Ausnahme: bei nachweislich gemäß ÖNORM B 3100:2008 für die Beanspruchungsklasse 2 positiv geprüfter rezyklierter Gesteinskörnung einer sortenreinen Herkunft).

Voraussetzung für die Verwendung von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen ist die Nassaufbereitung. Unter feiner Gesteinskörnung werden die Korngruppen mit dem Durchmesser nicht größer als 4 mm verstanden. Der Anteil <math><0,063\text{ mm}</math> (Feinanteile) darf hierbei 3% der Masse (f_3) der feinen Gesteinskörnung betragen. Für die anderen Aufbereitungsmethoden muss ihre Eignung nachgewiesen werden. Es muss auf einen geringen Schwankungsbereich beim Wasseranspruch geachtet werden. Bei Verwendung von natürlichen oder rezyklierten Korngemischen (z.B. 0/16) ist die Zugabe von feiner rezyklierter Gesteinskörnung nicht zulässig. Wegen einer fehlenden aussagekräftigen Klassifizierung sind feine rezyklierte Gesteinskörnungen mit Größtkorn $D \leq 2\text{ mm}$ nicht zulässig [14].

Die Korngemische aus rezyklierten Gesteinskörnung müssen aus getrennt aufbereiteten Fraktionen zusammengesetzt werden. ÖNORM B 4710-1 definiert die Korngemische als „*Gesteinskörnung, bestehend aus einem Gemisch grober und feiner Gesteinskörnungen mit D größer als 4 mm und mit $d = 0$, die für die Betonherstellung geeignet ist.*“ [14]

Die Fraktionen 0/1 und 0/2 sind in den Korngemischen nicht zulässig. Für die Verwendung von Korngemischen aus rezyklierter Gesteinskörnung gelten gleiche Anforderungen wie für Korngemische aus natürlicher Gesteinskörnung [14].

Tabelle E.1 der ÖNORM B 4710-1 definiert die Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Expositionsklasse. Die Tabelle gibt physikalische und chemische Parameter an. Unter anderem werden die Korngrößenverteilung der groben und feinen Anteile, Kornform der groben Gesteinskörnung, sowie Feinanteile definiert [14].

Hinsichtlich der Korngrößenverteilung gelten unterschiedliche Anforderungen. Für die Expositionsklassen X0, XC1 und XC2 sind die folgende Korngrößenverteilungen der Fraktion über 4 mm zulässig: $G_c 85/20$, $G_c 90/15$ oder $G_A 90$. Für die restlichen Expositionsklassen sind für die Fraktion über 4 mm $G_c 85/20$ und $G_c 90/15$ zulässig. Für die Fraktion unter 4 mm ist für alle Expositionsklassen $G_F 85$ zulässig.

ÖNORM EN 12620 gibt die Anforderungen an die Kornzusammensetzung in der Tabelle 2 an. G_c steht für grobe Gesteinskörnung und die nachfolgenden Zahlen stellen den prozentuellen Durchgang in Massenanteil dar. Die erste Zahl bezieht sich auf den Durchgang

durch die obere Siebgröße D und die zweite Zahl bezieht sich auf den Durchgang durch die untere Siebgröße d . So bedeutet beispielsweise $G_C 85/20$, dass $\geq 85\%$ durch die obere Siebgröße D hindurchgeht und $\leq 20\%$ durch die untere Siebgröße d . G_F ist die Bezeichnung für feine Gesteinskörnung. Die Zahl indiziert den Durchgang durch die obere Siebgröße D . Korngemische werden durch die Bezeichnung G_A erkennbar. Auch hier indiziert die Zahl den Durchgang durch die obere Siebgröße D [14].

Für die Expositionsklassen X_0 , XC_1 und XC_2 gibt es keine Anforderungen hinsichtlich der Kornform der groben Gesteinskörnung. Für die restlichen Expositionsklassen gilt SI_{40} als zulässige Kornform der groben Fraktion. SI -Kategorie nach der ÖNORM EN 12620 gibt Auskunft über die Kornformkennzahl, die nach der ÖNORM EN 933-4 bestimmt wird. SI_{40} indiziert einen Höchstwert der Kornformkennzahl von 40 [14].

Feinanteile in der groben Gesteinskörnung sind für alle Expositionsklassen mit $f_{1,5}$ begrenzt. Das heißt, dass der Siebdurchgang durch das 0,063 mm-Sieb kleiner gleich 1,50% der Masse der groben Gesteinskörnung sein muss. In der feinen Gesteinskörnung ist f_3 für alle Expositionsklassen zulässig. f_3 bedeutet, dass der Siebdurchgang der feinen Gesteinskörnung durch das 0,063 mm-Sieb kleiner gleich 3% der Gesamtmasse ist [6]. Die Korngemische sind nur für die Expositionsklassen X_0 , XC_1 und XC_2 zulässig und die Feinanteile sind hier mit f_3 begrenzt [14].

Zulässige Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen sind für sämtliche Expositionsklassen: $RB-A_1$, $RB-A_2$, $RG-A_3$, $RH-B$. Anforderungen und maximale Austauschraten sind in den Tabellen E.3 und E.4 der ÖNORM B 4710-1 angegeben.

Tabelle E.2 der ÖNORM B 4710-1 definiert die Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen in Abhängigkeit von der Betonkurzbezeichnung. Folgende Betonkurzbezeichnungen sind vorhanden und dementsprechend in der Tabelle vertreten: B_1 bis B_{10} , B_{12} , $HL-SW$. Die gestellten Anforderungen an die Gesteinskörnung sind analog denen in der Tabelle E.1.

Die zulässigen Korngrößenverteilungen für die Fraktion > 4 mm sind $G_C 85/20$ und $G_C 90/15$. Für die Fraktion ≤ 4 mm ist Korngrößenverteilung $G_F 85$ zulässig [14].

Für die Kornform grober Gesteinskörnung kommen FI_{NR} und SI_{40} in die Frage. FI_{NR} bedeutet, dass es keine Anforderung an die Plattigkeitskennzahl nach der ÖNORM 933-3 gibt. SI_{40} gibt einen Höchstwert der Kornformkennzahl nach ÖNORM 933-4 ≤ 40 [6].

Feinanteile in grober Gesteinskörnung dürfen die Kategorie $f_{1,5}$ nicht überschreiten. Für die feine Gesteinskörnung liegt die Grenze bei f_3 . Die Verwendung von Korngemischen ist nicht zulässig [14].

Zulässige Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen sind für sämtlich Expositionsklassen: $RB-A_1$, $RB-A_2$, $RG-A_3$, $RH-B$. Anforderungen und maximale Austauschraten sind in den Tabellen E.3 und E.4 der ÖNORM B 4710-1 angegeben.

In Abhängigkeit von den Expositionsklassen und Betonkurzbezeichnungen ergeben sich unterschiedliche Grenzwerte für den Austausch von natürlichen Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen. Die Austauschraten in Abhängigkeit von der Expositionsklasse werden in der Tabelle E.3 des Anhangs E der ÖNORM B 4710-1 angegeben. Die Grenzwerte sind für folgende Materialbezeichnungen definiert: RB-A1, RB-A2, RG-A3 und RH-B. RHM-C ist in der Tabelle E.3 nicht enthalten. Die Grenzwerte sind nicht nur von der Expositionsklasse, sondern auch von der Art der Gesteinskörnung abhängig. So ergeben sich unterschiedliche Grenzwerte für grobe und feine Gesteinskörnung, sowie für Korngemische. Für die Materialbezeichnungen: RB-A1, RB-A2 und RG-A3 sind für grobe Gesteinskörnung die Austauschraten zwischen 30% und 50% zulässig. Für feine Gesteinskörnung reduzieren sich die Grenzwerte für alle drei Materialbezeichnungen um 50% und betragen somit zwischen 15% und 25%. Korngemische sind nur bis zu einem Grenzwert von 38% und nur für die Expositionsklassen X0, XC1 und XC2 zulässig. Das Material RH-B ist ebenso nur für Expositionsklassen X0, XC1 und XC2 zulässig, und zwar mit einer Austauschrate zwischen 20% und 50%. Die Voraussetzung ist hier die Anwendung des Recycling-Betons im Trockenem. Bei höheren Anforderungen an Beständigkeit gegenüber chemischen Angriffen, sowie Verschleiß ist kein Austausch der natürlichen Gesteinskörnung durch die rezyklierte Gesteinskörnung zulässig. Dies betrifft die Expositionsklassen XA2, XA3, XM2 und XM3. Ein 100-prozentiger Austausch ist zulässig für grobe Gesteinskörnungen bei Beton $\leq C16/20$, sowie für feine Gesteinskörnungen und Korngemische bei Beton $\leq C8/10$ [14].

Die Austauschraten in Abhängigkeit von der Betonkurzbezeichnung sind in der Tabelle E.4 des Anhangs E der ÖNORM B 4710-1 enthalten. Analog wie in der Tabelle E.3 sind auch hier Materialbezeichnungen: RB-A1, RB-A2, RG-A3 und RH-B enthalten. Die Grenzwerte der Austauschraten werden jeweils für grobe und feine Gesteinskörnung angegeben. Die Korngemische werden nicht berücksichtigt. Die maximale Austauschraten für Materialien RB-A1, RB-A2 und RG-A3 bewegen sich im Bereich zwischen 30% und 50% für grobe Gesteinskörnung und 15% und 25% für feine Gesteinskörnung. Das Material RB-A2 ist nur für Betonkurzbezeichnungen B1, B8 und B9 zulässig, und zwar mit einer maximalen Austauschrate von 50% für grobe und 25% für feine Gesteinskörnungen. Die Verwendung von RH-B ist bei keiner Betonkurzbezeichnung zulässig. Für folgende Betonkurzbezeichnungen ist ebenso kein Austausch der natürlichen durch die rezyklierte Gesteinskörnung zulässig: B6, B6 C₃A-frei, sowie HL-SW [14].

Werden die Korngruppen verwendet, ist der Austausch nur innerhalb der jeweiligen Korngruppe zulässig. Ein Austausch von mehreren Korngruppen der natürlichen Gesteinskörnung durch eine Korngruppe der rezyklierten Gesteinskörnung ist nur dann möglich, wenn die Korngruppe der rezyklierten Gesteinskörnung den gleichen Korngrößenbereich umfasst [14].

1.10 Motivation und Zielsetzung dieser Arbeit

Diese Arbeit hat sich in einleitenden Kapiteln mit der Normenlage in der Europäischen Union und in Österreich auseinandergesetzt. Die Klassifizierung der rezyklierten Gesteinskörnung, sowie die Einsatzgebiete und -verbote der einzelnen Klassen wurden erläutert. Auf die für die Betonherstellung zulässige rezyklierte Gesteinskörnung wurde näher eingegangen. Die Hürden für einen größeren Einsatz der Recycling-Produkte in der Betonherstellung wurden diskutiert. Es wurden relevante Abfallarten definiert und im Anschluss wurde ein Überblick über das Abfallaufkommen in Österreich geschaffen.

Der zweite Teil der Arbeit beschäftigt sich mit dem aktuellen Stand der Technik hinsichtlich der mechanischen Rezyklierung. Die Aufbereitungsanlagen werden in ihren Formen: mobil und stationär betrachtet. Diese Arbeit legt den Fokus jedoch auf die stationären Anlagen. In stationären Anlagen sind komplexere Aufbereitungsprozesse realisierbar. Dies ermöglicht die Herstellung von fraktionierter rezyklierter Gesteinskörnung mit besseren Eigenschaften. Die einzelnen Prozesse innerhalb der stationären Anlage werden betrachtet.

Der dritte Abschnitt beschäftigt sich mit den eigentlichen Forschungsfragen dieser Arbeit. Für die Analyse wird eine zweistufige Zerkleinerung samt vor- und nachgeordneten Prozessen nach dem Stand der Technik herangezogen. Es werden drei jährliche Durchsätze und jeweils zwei Szenarien betrachtet. Im ersten Schritt werden einerseits die Kosten, andererseits die Erlöse einer solchen Aufbereitungsanlage identifiziert. Hier wird vor allem die österreichische Baugeräteliste (ÖGBL) herangezogen, die das wesentliche Werkzeug für die Kostenermittlung in der Bauindustrie darstellt. Nach der Identifizierung der Kosten erfolgt in einem zweiten Schritt deren Quantifizierung für verschiedene Produktionsmengen. Die ermittelten Kosten werden den Erlösen einer Aufbereitungsanlage gegenübergestellt, um Schlüsse über Wirtschaftlichkeit ziehen zu können. Abschließend werden die Ergebnisse dargestellt und der Skaleneffekt diskutiert.

Die zukünftigen Herausforderungen werden erläutert und Lösungsvorschläge gegeben.

1.10.1 Forschungsfragen

Die Betrachtung der unterschiedlichen Durchsätze bietet die Antwort auf die erste Forschungsfrage, und zwar wie sich die Produktionskosten in Abhängigkeit von der Produktionsmenge entwickeln. Anschließend wird gezeigt, welche Produktionsmenge aus wirtschaftlicher Sicht optimal ist.

Die zweite Forschungsfrage ist, in welchem Maß die Kosten für die Herstellung von hochqualitativen, fraktionierten Recycling-Betongranulat (0/8, 8/16, 16/32) von den Kosten für die Herstellung von nichtfraktionierten Recycling-Betongranulat (0/16) abweichen und wodurch diese Abweichung entsteht.

2 Stand der Technik der mechanischen Rezyklierung von mineralischer Baurestmassen

Das Ziel der Aufbereitung ist es aus dem Bauabfall einen Recycling-Baustoff mit definierten Eigenschaften herzustellen. Das Ausgangsmaterial und die eingesetzte Aufbereitungstechnologie bestimmen die Qualität des erzeugten Recycling-Baustoffs. Im Fall eines sortenreinen Ausgangsmaterials ist die Herstellung eines qualitätsgerechten Recycling-Baustoffes schon mit einem geringen technologischen Aufwand möglich. Mit steigender Heterogenität steigt auch der Aufwand des Aufbereitungsprozesses [15].

Die Aufbereitung findet in entsprechenden Aggregaten statt. In Kombination mit Förderanlagen ergeben diese die Produktionsanlagen, in denen eine Folge von Stoffumwandlungsvorgängen passiert [16].

Auf die genaue Reihenfolge der Stoffumwandlungsprozesse wird im Kapitel 2.2 eingegangen. Der Kapitel 2.1 erläutert die einzelnen Stoffumwandlungsprozesse inklusive Maschinen, die für diese Prozesse eingesetzt werden.

2.1 Grundoperationen der mechanischen Baurestmassenaufbereitung

2.1.1 Zerkleinerung

Zerkleinerung wird als Zerteilen eines Festkörpers in die Bruchstücke durch Einwirken mechanischer Kräfte definiert. Zum Zerteilen kommt es, wenn die auf den Festkörper ausgeübten mechanischen Kräfte die inneren Bindungskräfte überwinden. Folglich bilden sich die Risse, die den Festkörper spalten. Ergebnis der Zerkleinerung ist eine größere Partikelanzahl, jedoch mit einer herabgesetzten Partikelgröße. Dadurch nimmt die spezifische Oberfläche zu [15].

Die wichtigsten Kriterien für Auswahl der entsprechenden Maschine für die Zerkleinerung sind: physikalische Eigenschaften des zu zerkleinernden Gutes wie seine Größe, Aufbau, Härte, Sprödigkeit und Spaltbarkeit; der Verwendungszweck des Endproduktes sowie die gewünschten Eigenschaften des fertigen Produktes wie beispielsweise Kornform oder Korngrößenverteilung [16].

Nach der Stückgröße des zu zerkleinernden Gutes wird zwischen folgenden Zerkleinerungsprozessen unterschieden [5]:

- Grobzerkleinerung bzw. -brechen, wenn die Korngröße 100 mm übersteigt
- Mittelzerkleinerung bzw. Feinbrechen, wenn die Korngröße zwischen 5 und 100 mm liegt
- Feinzerkleinerung bzw. Mahlen, wenn die Körner eine Größe zwischen 0,10 und 5 mm aufweisen
- Feinstzerkleinerung, wenn die Korngröße weniger als 0,10 mm beträgt

Zerkleinert wird durch folgende Beanspruchungen: Druck, Prall, Schlag, Scherung und Schneiden [16], [15].

Für Zerkleinerung von mittelharten bis harten Materialien wie beispielsweise Asphalt, Beton und Ziegel eignen sich vor allem Druck-, Prall- und Schlagbeanspruchung. In der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen kommen am häufigsten Backen- und Prallbrecher zum Einsatz. Der Backenbrecher zerkleinert das Material durch Druckbeanspruchung und der Prallbrecher durch die Prallbeanspruchung. Beim gleichen Durchsatz ist ein Backenbrecher schwerer als Prallbrecher, jedoch mit einer geringeren Antriebsleistung [15].

Backenbrecher beanspruchen das Material durch den Druck und sind für die Zerkleinerung von groben und flächigen Stücken bis 1,0m x 1,0m Kantenlänge geeignet. Die Backenbrecher werden bis zu einer Festigkeit des Aufgabematerials von 500 MPa eingesetzt. Hinsichtlich der Materialhärte sind sie für die Zerkleinerung von hartem bis sehr hartem Material wie z.B. Gleisschotter geeignet. Das entstehende Produkt ist grobes Brechgut. Deshalb werden sie zumeist als Vorbrecher in zweistufigen Anlagen oder auch in einstufigen Anlagen bei geringen Endprodukthanforderungen eingesetzt. Die genaue Produktgröße ist abhängig von der Spaltweite und beträgt im Regelfall von 0 bis 150 mm. Das Zerkleinerungsverhältnis liegt bei 10:1. Das Zerkleinerungsverhältnis wird definiert als Quotient aus der Aufgabekorngröße und der Produktkorngröße. Die Kornform des Recycling-Produktes ist plattig bis splittrig [15].

Korngrößenverteilung ist abhängig von der Größe der Eingabe- und Austrittöffnung. Backenbrecher produzieren Gesteinskörnung mit der optimalen Korngrößenverteilung für die Betonproduktion [17]. Der Feingutanteil fällt gering aus. Der Überkornanteil kann aber hoch sein, vor allem im Fall eines plattigen Aufgabegutes, das eventuell unzerkleinert durch den Austragspalt gelangen kann [15].

Das Funktionsprinzip eines Backenbrechers ähnelt einem Nussknacker. Der Backenbrecher besteht aus einer festen und einer beweglichen Brechbacke. Die Aufgabeöffnung wird mit dem Ausgangsmaterial beschickt. Durch das wechselnde Öffnen und Schließen des Brechmauls wird das Material „zerdrückt“. Nachdem es in eine tiefere Position gerät, wird es erneut beansprucht. Der Vorgang wird so oft wiederholt, bis das Zerkleinerungsprodukt ausreichend klein ist, dass es aus dem Brechmaul endgültig austreten kann. Die Hubzahl des Backenbrechers bewegt sich im Bereich von 270 bis 400 pro Minute. Der Vorteil von Backenbrecher ist ein geringer Verschleiß der Brechwerkzeugen. Standzeit der Verschleißteile liegt bei ca. 300.000 t gebrochenen Materials. Grundsätzlich kann der Backenbrecher bewehrten Beton zerkleinern. Die Trennung der Bewehrung und Beton vor der Zerkleinerung mittels Backenbrecher ist jedoch vorteilhaft, um den Materialfluss vor Störungen zu schützen. Holz und Kunststoffe kann der Backenbrecher problemlos

aufbereiten. Asphalt kann jedoch zu Verklebungen führen. Vorteile eines Backenbrechers sind geringe Staub- und Lärmemissionen [15].

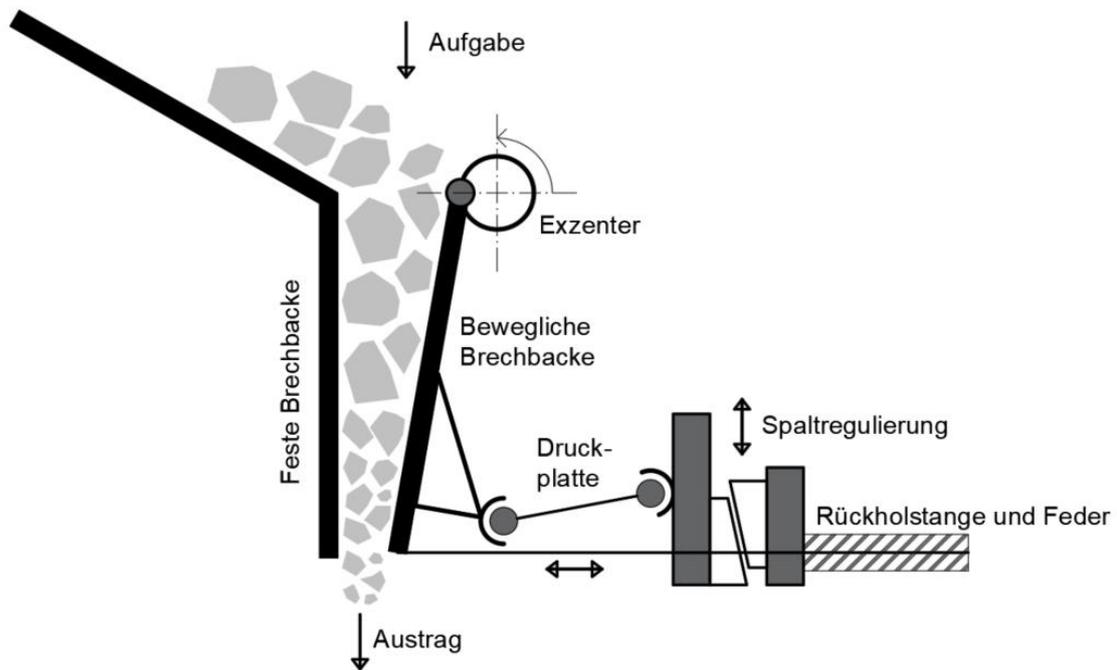


Abb. 2-1: Einschwingenbackenbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Prallbrecher führen zur Zerkleinerung aufgrund der Beanspruchung durch Prall und erzeugen ein feineres Brechprodukt. Das Zerkleinerungsverhältnis beträgt 20:1. Korngröße des Produktes ist abhängig von der Rotorumfangsgeschwindigkeit und bewegt sich zwischen 0 und 80 mm. Übliche Rotorumfangsgeschwindigkeit beträgt von 20 bis 45 m/s. Mit steigender Umfangsgeschwindigkeit steigt auch die Feinheit des Produktes sowie der Sandanteil. Der Feingutanteil fällt höher aus, aber der Überkornanteil ist geringer im Vergleich zu einem Backenbrecher. Produkte einer Prallzerkleinerung haben eine kubische Kornform. Die Korngrößenverteilung der Produkte ist geeignet für die Tragschichten im Straßenbau. Der Prallbrecher ist sowohl als Nachbrecher in zweistufiger Aufbereitung als auch in einstufigen Anlagen, in denen hohe Anforderungen an das Endprodukt gestellt werden, einsetzbar. Prallbrecher eignen sich für die Zerkleinerung von mittelharten bis harten Materialien mit Festigkeiten bis zu 300 MPa. Aufgabekorngröße bis 1,0m x 1,0m Kantenlänge kann problemlos zerkleinert werden. Bewehrungsstähle können den Austragspalt verstopfen. Holz und Kunststoffe können unproblematisch behandelt werden. Gegebenenfalls kann auch Asphalt zerkleinert werden, außer bei hohen Außentemperaturen, bei denen der Asphalt schmilzt. Dies kann zu Verklebungen im Brechergehäuse führen [15].

Prallbrecher bestehen aus dem Gehäuse, das mit Prallplatten ausgerüstet ist, und dem Rotor mit Schlagleisten. Die Zerkleinerung des Ausgangsmaterials erfolgt dreifach [15]:

- 1) Durch den Aufprall des Materials auf die Schlagleisten des Rotors: die kinetische Energie der Schlagleisten wird auf das Material beim Kontakt übertragen. Zuzufolge dessen bauen sich die Spannungen auf, die die Zerkleinerung verursachen;
- 2) Durch das Auftreffen des Materials auf die Prallplatten im Brechergehäuse;
- 3) Durch das Auftreffen der Partikel untereinander. Die Beanspruchung dauert so lange, bis das Material die Partikelgröße erreicht, die durch Austragsspalt zwischen der unteren Prallplatte und der Schlagleiste des Rotors austreten kann [15].

Die Anordnung der Prallplatten ermöglicht, dass das Material in den Schlagkreis zurückgeschleudert wird, und zwar so lange, bis es ausreichend klein ist, um den Spalt zwischen den Prallplatten und dem Rotor passieren zu können. Die Prallplatten sind verstellbar gelagert, d.h. dass sowohl deren Abstand zu den Schlagleisten als auch deren Neigung geändert werden können [16].

Der wesentliche Nachteil eines Prallbrechers ist der hohe Verschleiß, der vor allem die Kanten der Schlagleisten betrifft. Diese sind für den Einsatz als Hauptbrecher jede 3.000 t auszutauschen und für den Einsatz als Nachbrecher jede 10.000 t auszutauschen. Weitere Nachteile des Prallbrecher sind hohe Lärm- und Staubemissionen. Um die Auswirkungen der Staubemissionen möglichst gering zu halten, kann eine Bedüsung mit Wasser erforderlich sein [15].

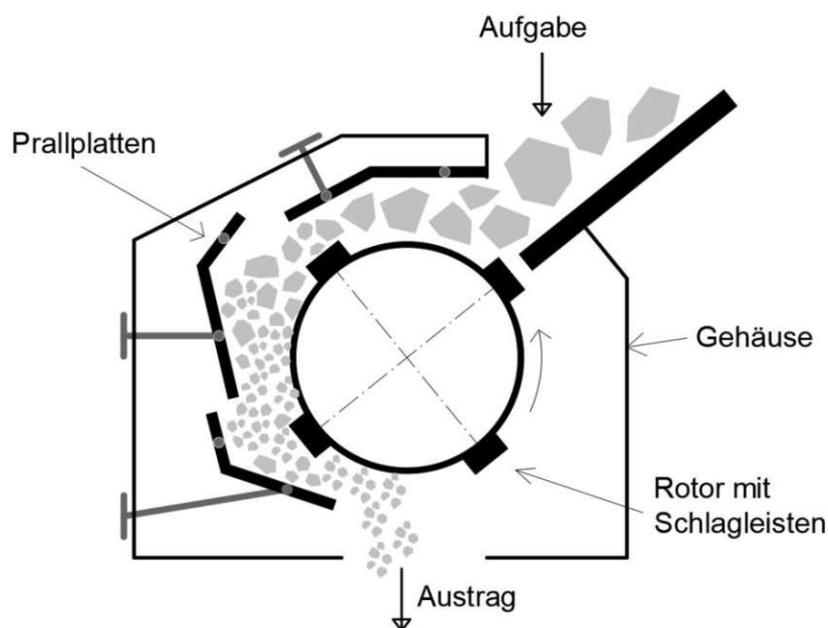


Abb. 2-2: Prallbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Schlagwalzenbrecher arbeitet horizontal und ohne Materialumlenkung. Er ist geeignet für die Zerkleinerung von Bahnschwellen, Lichtmasten und Wandelementen. Die Aufgabe des Brechgutes erfolgt über einen Kratzkettenförderer der Schlagwalze. Die Zerkleinerung erfolgt durch eine Kombination aus Druck, Prall und Schlag. Es ist wichtig, dass die Geschwindigkeit des Förderers und die Umlaufgeschwindigkeit der Schlagwalze aufeinander angepasst ist. Die Umfangsgeschwindigkeit beeinflusst die Korngröße des zerkleinerten Produktes. Der Schlagwalzenbrecher eignet sich als Vorbrecher [15].

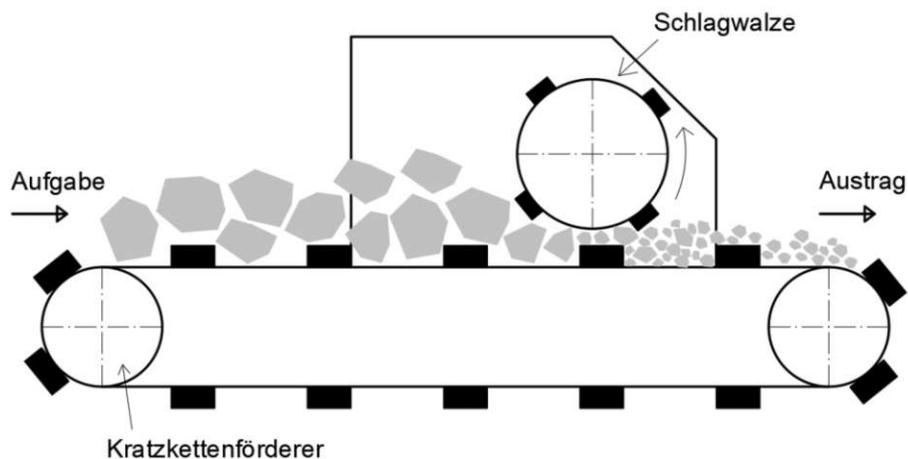


Abb. 2-3: Schlagwalzenbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Beim **Kegelbrecher** erfolgt die Zerkleinerung im Raum zwischen dem äußeren Brechmantel und dem inneren Brechkegel. Der Brechkegel schafft eine schnelle Taumel- und Schlagbewegung. Diese wird durch die Neigung der Kegelachse sowie den exzentrischen Antrieb erreicht. Der Kegelbrecher wird als Sekundärbrecher eingesetzt, weil er nur vorzerkleinerten Bauabfall aufbereiten kann. Das Zerkleinerungsprodukt ist ein kubisches Brechkorn [15].

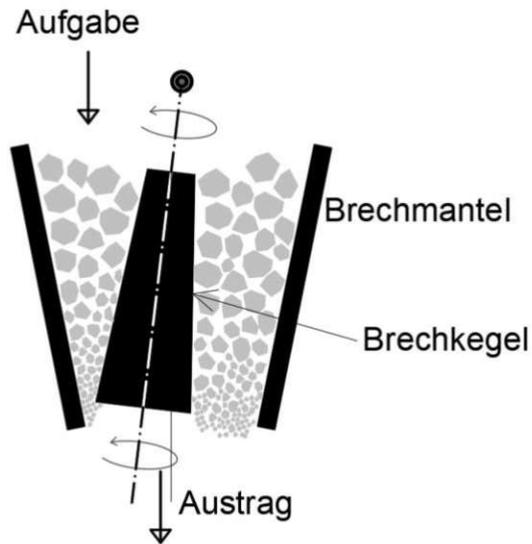


Abb. 2-4: Kegeltreiber, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Fräsbrecher wurde für die Zerkleinerung von Asphaltbruch entwickelt. Es handelt es hier um einen Einwellenwalzenbrecher. Die Fräswalze ist mit Fräszähnen ausgestattet. Zwischen diesen Fräszähnen und einem Brechkamm erfolgt die Zerkleinerung des Materials. Der Fräsbrecher eignet sich für die Zerkleinerung von: Glas, Faserzementplatten, Ziegel, Porenbeton und Leichtbeton. Das Brechprodukt ist grob [15].

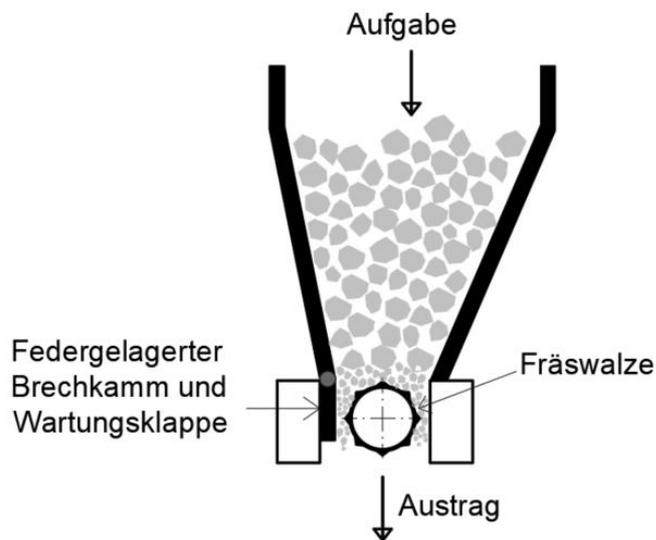


Abb. 2-5: Fräsbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

2.1.2 Siebklassierung

Siebklassierung dient der Trennung von polydisperser Partikelgemischen in Abhängigkeit der geometrischen Abmessungen der einzelnen Fraktionen. Dies erfolgt mit Hilfe eines Siebbodens mit geometrisch gleichen Öffnungen, deren Größe näherungsweise die

Trennkorngröße vorgibt. Produkte des Siebvorgangs sind das Feingut bzw. Siebdurchgang, das durch die Öffnungen hindurchfällt und das Grobgut bzw. Siebrückstand, das auf dem Siebboden verbleibt [15].

Siebmaschinen können entweder vor oder nach der Zerkleinerung angeordnet werden. Für die Vorabsiebung vor der Zerkleinerung werden feste oder bewegliche Roste eingesetzt. Vorabsiebung dient der Abtrennung des Füllbodens (0/8-10 mm) und einer Mittelkörnung (8/32-56 mm) [16]. Während der Vorabsiebung werden die Feianteile mit einer Korngröße kleiner als 10 mm abgetrennt [8]. Die Fraktion zwischen 10 mm und 40 mm kann schließlich einem Windsichter oder Aquamator zugeführt werden. Die Fraktion mit der Korngröße über 40 mm wird dem Vorbrecher zugeführt [8].

Einerseits schützt das Abtrennen von Grobanteilen den Brecher vor Beschädigung und Überlastung. Andererseits wird durch Siebung der Verschleiß und die Verstopfung der Zerkleinerungsanlagen vermieden. Durch die Siebung wird die obere Korngröße begrenzt. Schwing- und Trommelsiebe werden nach der Zerkleinerung, d.h. als Produktsiebe angeordnet [15]. Die Schwingsiebe weisen in der Abhängigkeit von den Anforderungen an die Produktpalette bis zu drei Siebdecks mit unterschiedlichen Maschenweiten auf [16]. Auswahl der Siebmaschine erfolgt unter Berücksichtigung der Eigenschaften des zu trennenden Siebgutes und der gestrebten Eigenschaften des Endproduktes [15].

Für die Siebung des Bauschuttes und des Straßenaufbruchs im Ausgangszustand eignen sich die Roste. Für die gleichen Materialien, aber nach der Zerkleinerung, sind Wurfsiebmaschinen geeignet. Bei einem hohen Grenzkornanteil eignen sich Wurfsiebmaschinen besser als Trommelsiebe. Wenn die Oberflächenfeuchte des Siebgutes hoch ist, kommen Belagschwinger, insbesondere Spannwellensiebmaschinen zum Einsatz. Für Ausgangsmaterialien mit einer kubischen Kornform eignen sich alle Typen der Siebmaschinen. Die plattigen und flächigen Partikel sind mit Trommelsieben aufzubereiten. Hinsichtlich der Schüttdichte eignen sich Trommelsiebe im Bereich der Leichtstoffe. Im Bereich mineralischer Bestandteile mit einer Dichte von 0,6 bis 1,6 kg/dm³ sind alle Typen einsetzbar [15].

Wenn die gewünschte Partikelgröße des Endproduktes kleiner als 4 mm ist, können Wurfsiebmaschinen eingesetzt werden. Im Bereich zwischen 3 und 10 mm gibt es mehrere Möglichkeiten, wie zum Beispiel: Wurfsiebmaschinen, Trommelsiebe oder Vibrationsroste. Bei den Partikeln mit der Größe zwischen 30 und 80 mm kommen zusätzlich Stufenspalt- und Rüttelroste zur Anwendung. Trommelsiebe und Roste sind auch für Partikelgrößen über 80 mm geeignet. Die angestrebte Trenngute ist umgekehrt proportional zum Durchsatz. Für hohe Anforderungen an Endprodukt können Wurfsiebmaschinen und Roste herangezogen werden [15].

Roste haben in der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen zweifache Funktion. Sie fördern das zu zerkleinernde Material in den Brecher und trennen gleichzeitig das Vorsiebmaterial ab. Sie eignen sich für die Siebung im Grob- und Mittelkornbereich. Je nach Transport des Siebgutes, werden folgende Bauformen unterschieden: feste Roste, bewegte Roste und Rollenroste [15].

Bei festen Rosten wird das Aufgabematerial unter Wirkung der Schwerkraft bewegt. Die Neigung der Stangen beträgt in der Regel zwischen 35° und 50°. Unter bewegten Rosten sind Stangen- und Schwingroste zu verstehen. Bei Stangenrosten erfolgt der Materialtransport durch langsame Bewegungen der zwei ineinandergreifenden Roste mit geringer Neigung. Der Siebboden der Schwingroste besteht aus Stangen, die mit einem Exzenter in Schwingungen versetzt werden. Bei Rollenrosten erfolgt der Materialtransport durch rotierende Wellen mit aufgesteckten Scheiben. Die Rollenroste werden häufig in der Bauabfallaufbereitung verwendet [15].

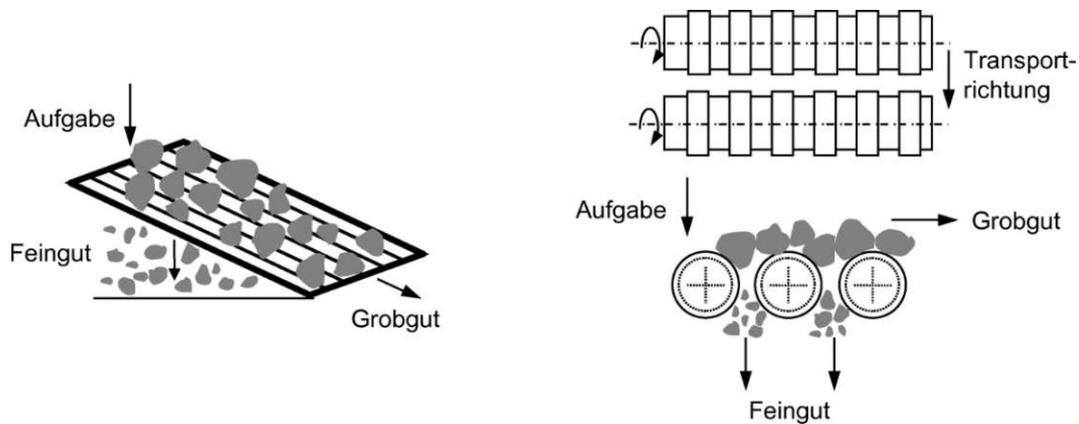


Abb. 2-6: Fester Rost (links) und Rollenrost (rechts); entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Trommelsiebe sind für die Klassierung im Mittelkornbereich von 10 bis 80 mm geeignet. Ein leicht geneigtes, rotierendes und zylindrisches Sieb bildet die Trennfläche. Das Siebgut wird von oben aufgegeben und konstant umgewälzt, was zu einer Auflockerung und Vermischung des Materials führt. Austritt des Grobkorns erfolgt axial am unteren Ende, während Feinkorn durch die Öffnungen des Trommelmantels austritt [15]. Die Lochweite, der Durchmesser, die Drehzahl sowie die Einbauten und der Neigungswinkel der Trommel bestimmen den Durchsatz und die Trennleistung. Trommelsiebe eignen sich sowohl als erste Stufe der Aufbereitung als auch nach der Zerkleinerung. Die Ergebnisse der Siebung sind abhängig von der Verweilzeit des Materials in der Trommel, sowie von der Siebfläche. Beide diese Parameter sind materialbedingt [16].

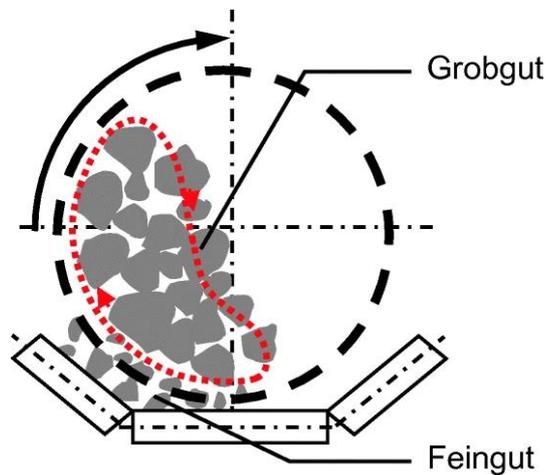


Abb. 2-7: Trommelsieb, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Schwingsiebe werden in Plansiebe und Wurfsiebe unterteilt. Plansiebe schwingen in der Ebene des Siebbelags. Das Siebgut wird dabei parallel zur Trennfläche ohne Abhebung bewegt. Sie sind für die Siebung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen nicht geeignet. Wurfsiebe schwingen senkrecht zur Ebene des Siebbelags. Sie werden bevorzugt für die Siebung von zerkleinertem Bauschutt. Der Siebkasten und der darauf befestigter Siebboden werden in lineare, kreisförmige oder ellipsenförmige Schwingungen versetzt. Dies geschieht durch Exzenterantrieb, Unwuchtmotor oder Magnetvibrator. Auf das Siebgut wirken die Beschleunigungskräfte. Diese führen zur Auflockerung des Materialbettes, Schichtung und Anreicherung der Feianteile über dem Siebboden sowie zum Durchgang der Feianteile durch den Siebboden [15].

2.1.3 Sortierung

Sortierung ist das Trennen eines Materialgemisches nach Stoffarten unter Berücksichtigung typischer Stoffmerkmale. Ein der Ziele der Sortierung ist die Entfernung von Schad- und Störstoffen aus Materialgemischen. Die Sortierung ist ausschlaggebend für die Qualität von Recycling-Baustoffen. Der Aufwand für die Sortierung ist abhängig von dem Abbruchmaterial und der angestrebten Produktqualität [15].

Die wichtigsten Merkmale für die Sortierung sind Rohdichte, Kornform und Korngröße. Die Farbe kann auch als Sortiermerkmal herangezogen werden. Für den Fall, dass ein heterogener Aufgabematerial vorliegt und der Recycling-Produkt in der Betonherstellung verwendet wird, empfiehlt sich die sensorbasierte Farbsortierung. Dadurch wird nicht nur eine Fraktion aus Beton erzeugt, sondern auch eine Ziegelfraktion. Weder Dichtesortierung noch Sortierung nach der Kornform sind hier geeignet [15].

Sortierung kann entweder vor oder nach der Zerkleinerung eingeordnet werden. Die Sortierung wird dementsprechend als Upstream- oder Downstream-Sortierung bezeichnet. Vorteil von einer Downstream-Sortierung ist die Abtrennung der Fremdstoffe, die im Stoffverbund vorhanden waren und im Zerkleinerungsschritt aufgeschlossen wurden. Sortierverfahren werden in trockene und nasse Sortierverfahren unterteilt [15].

Trockene Sortierverfahren umfassen die händische Sortierung, Windsichtung, Trennsche, Luftherde, Schrägbandscheider, 3D-Sortiertrommeln und Luftsetzmaschinen [15].

Händische Sortierung dient der Entfernung von großen Verunreinigungen wie z.B. Holz, Metall, Papier etc. Die Sortierung erfolgt auf einem ausreichend breiten Sortierband, so dass alle Bestandteile des Aufgabematerials vereinzelt werden können [15].

Windsichtung ist eine dichte-basierte Sortierung, die in Windsichtern erfolgt. Je nach Strömungsrichtung der Sichtluft wird zwischen Aufstrom-, Querstrom- und Zick-Zack-Sichter unterschieden. Häufig eingesetzt werden die Querstromsichter, wobei die Sichtluft senkrecht zum Materialstrom strömt. Die schweren Partikel fallen nach unten, während die leichten Partikel von der Sichtluft mitgenommen werden. Windsichter finden sowohl in stationären als auch in mobilen Aufbereitungsanlagen ihren Einsatz. Produkte einer Windsichtung sind meistens mineralische Bestandteile. Mineralische und organische leichte Störstoffe können effektiv aussortiert werden. Nachteil der Windsichter ist sinkende Effizienz mit steigender Dichte der Störstoffe. Somit sind die Windsichter nicht für das Abtrennen von Holz geeignet. Es ist ebenso unmöglich, Beton und Ziegel aus einem Gemisch zu trennen [15].

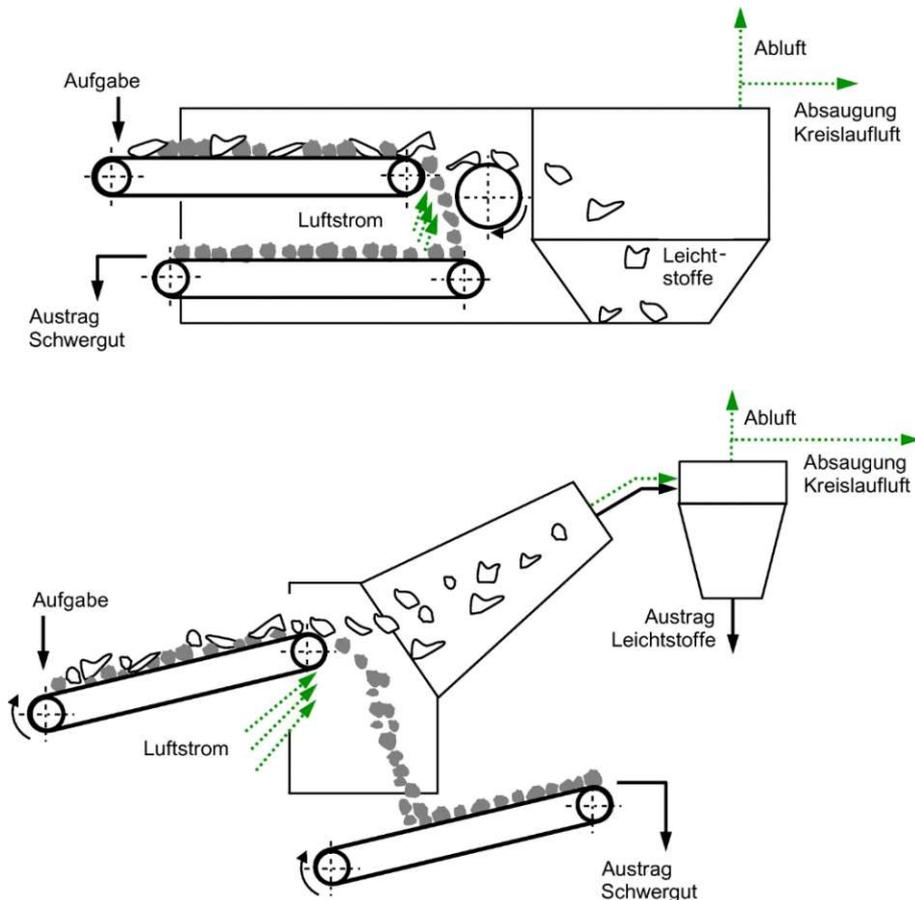


Abb. 2-8: Windsichter unterschiedlicher Bauart, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Trenntische oder Luftherde bestehen aus geneigten Schwingsieben, die von unten durchströmt werden. Durch eine gleichzeitige Luftströmung und Bewegung des Siebbodens wird das Material aufgelockert. Die Schwerkraft übersteigt die Widerstandskraft des Schwergutes. Dieses bleibt in Kontakt mit der Siebfläche und bewegt sich in zur Siebneigung entgegengesetzter Richtung. Am höheren Siebende wird das Schwergut ausgetragen. Gleichzeitig bewegt sich Leichtgut senkrecht zum Siebboden, weil dessen Widerstandskraft größer als die Schwerkraft ist. Leichtgut bewegt sich in Richtung der Siebneigung und tritt am unteren Siebende aus [15].

Schrägbandscheider haben eine leichte Längs- und eine starke Querneigung. Die Aufgabe des Materials erfolgt am höchsten Punkt. Kugelförmige und kubische Partikel bewegen sich in Richtung der Querneigung und treten an der unteren Kante des Bandes aus. Plattige Partikel bleiben auf dem Band liegen. Diese werden zur Abwurfkante transportiert. In der Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen haben Betonpartikel eine kubische Kornform. Bruchstücke von Glas oder Fliesen sind plattig [15].

3D-Sortiertrommeln bestehen aus einer innenliegenden Siebtrommel und einer außenliegenden Trommel ohne Öffnungen. Spän- und stängelförmige Partikel verbleiben im Inneren der Siebtrommel, weil sie durch die Sieböffnungen nicht austreten können. Kubische Partikel treten hier ohne Behinderung aus [15].

Luftsetzmaschinen arbeiten mit einem aufgelockerten Sandbett als Trennmedium. Partikel mit einer größeren Dichte als die Dichte der Sandsuspension sinken ab. Partikel mit einer geringeren Dichte steigen nach oben [15].

Noch ein wesentlicher Sortierprozess ist das Entfernen von Eisen und NE-Metallen. Dies kann durch die **Magnetsortierung** erfolgen. Die Magnetisierbarkeit von Eisen oder Stahl dient als das Sortiermerkmal. Es wird ein magnetisches Feld benötigt, welches durch einen Elektro- oder Permanentmagneten erzeugt wird. Die Feldstärke des Magnetes ist wesentlich für eine wirksame Trennung. Die häufigsten Bauarten sind: Überbandmagnete und Trommelmagnetscheider. Von den zwei Varianten wird in der Bauabfallaufbereitung der Überbandmagnet am häufigsten eingesetzt. Der Überbandmagnet ist ein Förderband mit einem Aushebemagneten. Dieser wird senkrecht zur Förderrichtung angeordnet und hebt größere magnetisierbare Bestandteile heraus. Das magnetisierbare Gut haftet, bis es einen Abstreifer passiert und letztendlich in einen Behälter fällt. Nicht magnetisierbare aber elektrisch leitfähige Materialien wie Edelstahl, Kupfer oder Aluminium werden mittels Wirbelstromsortierung getrennt. Dabei wirkt ein magnetisches Wechselfeld auf den Materialstrom. In den Materialien wird dadurch ein Wirbelstrom induziert und somit ein Magnetfeld erzeugt. Dieses wirkt entgegen dem verursachten Feld und die leitfähigen Materialien werden abgestoßen. Die Dichte und elektrische Leitfähigkeit der Materialien

sind wesentlich für das Ergebnis der Sortierung. Beispielsweise Aluminium lässt sich sehr gut wegen seiner geringen Dichte und hohen elektrischen Leitfähigkeit abtrennen [15].

Die Wirkprinzipien der **nassen Sortierverfahren** beruhen auf den Kräften, die auf Körner in einer Flüssigkeit wirken. In ruhenden Flüssigkeiten wirken Schwer- und Auftriebskraft. Das Sortierkriterium in ruhenden Flüssigkeiten ist das Verhältnis der Flüssigkeitsdichte zur wirksamen Materialdichte. Das heißt, die Partikel mit einer Dichte, die größer als die Dichte der Flüssigkeit ist, sinken ab. Die Partikel mit einer Dichte, die kleiner als die Dichte der Flüssigkeit ist, schwimmen auf. Auf diese Weise lassen sich leichte Störstoffe wie beispielsweise Holz gut abtrennen. In strömenden Flüssigkeiten wirkt zusätzlich die Widerstandskraft, die durch einen Aufstrom verursacht wird. Die Sinkgeschwindigkeit ist das Kriterium für Sortierung in strömenden Flüssigkeiten. Das Aufschwimmen und der Transport der Leichtstoffe wird zusätzlich durch die Flüssigkeitsströmung unterstützt [15].

Schwimm-Sink-Sortierung ist ein Beispiel für nasse Sortierverfahren in ruhenden Flüssigkeiten. Ein Gemisch aus Partikeln mit Dichten zwischen ρ_{M1} und ρ_{M2} wird in eine Trennflüssigkeit, am meisten Wasser, gegeben. Die Dichte der Trennflüssigkeit liegt zwischen ρ_{M1} und ρ_{M2} . Schwere Partikel setzen sich ab, während die leichten aufschwimmen. Dabei hat weder die Korngröße noch die Kornform einen Einfluss. Aus den Feinanteilen, die mit dem zu trennenden Gemisch ins Wasser eingetragen werden, entsteht eine Suspension. Sie weist eine Dichte zwischen 1.200 und 1.400 kg/m³ auf. Dieses Sortierungsprinzip kommt bei einem Schrägradscheider und Leichtstoffabscheider zur Verwendung.

Beim Schrägradscheider wird das zu trennende Gemisch in das Becken aufgegeben. Das Becken ist mit der Suspension gefüllt. Nach der Aufgabe fängt das Leichtgut an, aufzuschwimmen und wird letztendlich am Überlauf ausgetragen. Der Austrag erfolgt mithilfe eines rotierenden Stabkorbs. Das Schwergut setzt sich am Beckenboden ab. Das Austragen erfolgt mittels einem umlaufenden Schrägrad. Dieses Schrägrad ist durch radial angeordnete Lochbleche in die einzelnen Kammern unterteilt [15].

Der Leichtstoffabscheider hat einen kastenförmigen Behälter. In diesem befindet sich die Suspension. Das Leichtgut schwimmt auf und wird mittels eines Bürstenbandes ausgetragen. Das Schwergut setzt sich am Behälterboden ab und wird mit Hilfe eines Förderbandes ausgetragen. Eine weitere Bauart des Leichtstoffabscheiders ist die mit dem Schneckenaustrag. Bei dieser Variante befindet sich die Suspension in einem Trog. Nachdem das Schwergut auf den Trogboden sinkt, wird es mittels Schnecke ausgetragen. Mit Hilfe eines Bürstenbandes wird das Leichtgut ausgetragen. Bei allen beschriebenen Varianten ist der Schwergutaustrag oberhalb des Wasserbades angeordnet. Dadurch erfolgt eine Teilentwässerung des Materials. Das ausgetragene Wasser muss nachgefüllt werden [15].

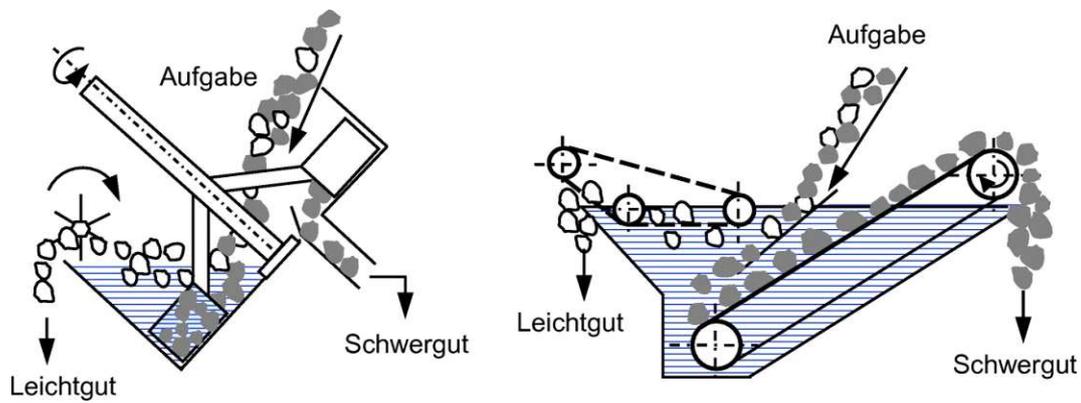


Abb. 2-9: Schrägbandscheider (links) und Leichtstoffabscheider (rechts), entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Aufstromsortierung ist ein nasses Sortierverfahren, bei dem zusätzlich zu der Schwer- und Auftriebskraft auch die durch einen Aufstrom verursachte Widerstandskraft wirkt. Diese Widerstandskraft trägt zum Aufschwimmen des Leichtgutes und zum dessen Transport zum Austrag bei.

Eine gängige Bauart ist der Schnecken-Aufstromsortier, bei dem der Bauabfall in einen schräg aufsteigenden Wassertrog gegeben wird. Eine Schneckenwelle lockert diesen auf. Im unteren Bereich wird das Prozesswasser zugegeben und es erzeugt einen Aufstrom. Von diesem Aufstrom wird das Leichtgut mitgenommen und letztendlich mit einem Teil des Prozesswassers über eine Wehr ausgetragen. Am Boden des Trogs setzt das Schwergut ab und wird mittels einer Schnecke ausgetragen.

Eine weitere Bauart ist die Hydrotrommel. Bestandteile einer Hydrotrommel sind eine konische und rotierende Waschtrommel mit spiralförmigen Leitsegmenten, sowie eine Austragskammer. Die Düsen, über die das Prozesswasser zugeführt wird, befinden sich an der Stirnseite der Austragskammer und am Trommelmantel. An der der Austragskammer gegenüberliegenden Seite wird das zu sortierende Gut aufgegeben. Dieses wird durch die Rotation und mittels Leitsegmente zu einer bestimmten Höhe angehoben und anschließend abgeworfen. Währenddessen wird das Leichtgut von der Strömung erfasst und gemeinsam mit dem Prozesswasser ausgetragen. Das ausgetragene Prozesswasser wird nach der Aufbereitung dem Prozess wieder zugeführt. Das Schwergut bewegt sich zu einem Segment am Trommelende, das mit Hubelementen ausgestattet ist. Es tritt oberhalb des Wasserspiegels aus der Trommel aus. Hydrotrommel sind besonders geeignet für die Entfernung von leichten Fremdbestandteilen wie beispielsweise Gips, Holz, Kunststoff oder Papier. Die Hydrotrommel sind weniger effektiv für die Entfernung von mineralischen Bestandteilen [15].

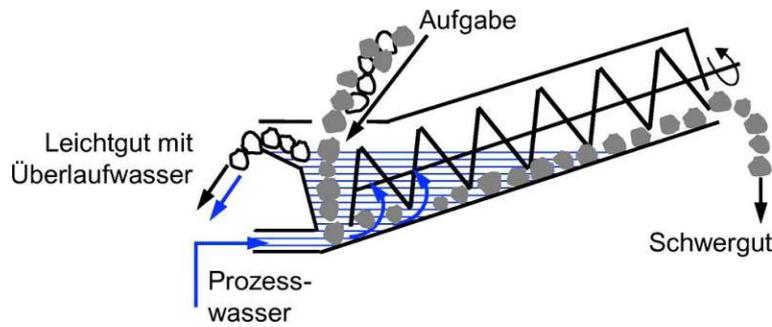


Abb. 2-10: Schnecken-Aufstromsortierer, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

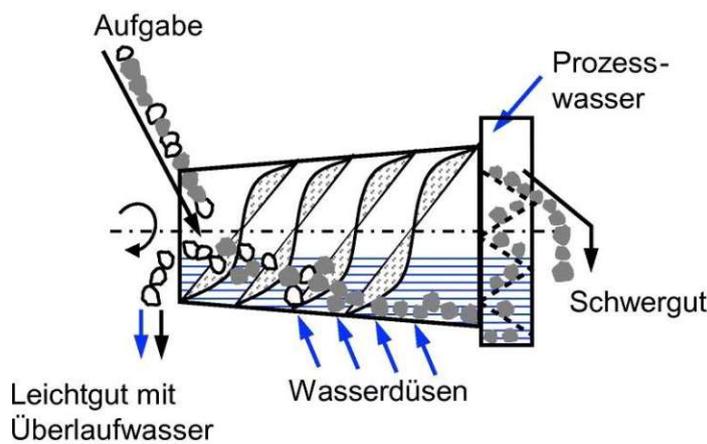


Abb. 2-11: Hydrotrommel, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Filmschichtsortierung wird in dem Hydrobandscheider eingesetzt. Dieser besteht aus einem gemuldeten Förderband, auf dem sich das Trennwashbett ausbildet. Das Förderband hat eine seitliche Wellenkantenbegrenzung. Wasser und Bauabfall werden in das Washbett aufgegeben. Das Wasser fließt zusammen mit den leichten Partikeln in Richtung der tiefer gelegenen Spanntrommel. Das Schwergut bewegt sich entgegen der Strömungsrichtung und wird mittels einer Antriebstrommel ausgetragen. Die Antriebstrommel sind erforderlich, weil das Schwergut wegen großer Reibungskräfte stärker auf der Unterlage haftet. Der Hydrobandscheider ist auch unter dem Namen „Aquamator“ bekannt. Es gibt die Sandaquamatoren, in welchen das Aufgabegut in Feinsand, gereinigten Sand und Verunreinigungen getrennt wird. Bei den Kies- oder Splittaquamatoren werden die groben Gesteinskörnungen von Verunreinigungen befreit. Weil sich das Aufgabegut nur einige Sekunden im Aquamator aufhält, verändert sich die Dichte infolge von Wasseraufnahme in einem geringen Ausmaß. Aus diesem Grund sind Aquamatoren gut geeignet für den Einsatz in der Aufbereitung von Bauabfällen [15].

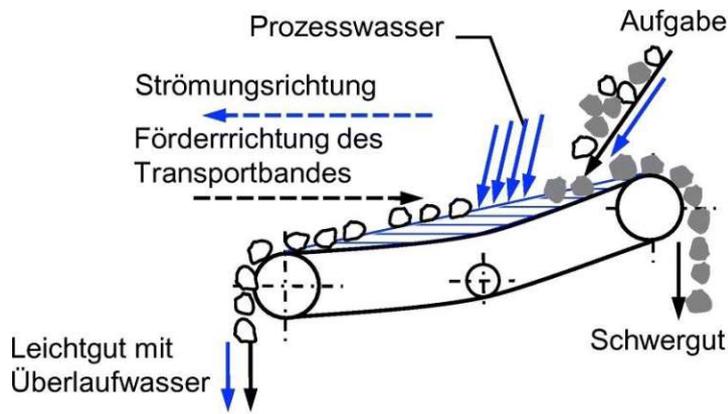


Abb. 2-12: Hydrobandscheider, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Setzortierung kennzeichnet sich durch einen pulsierenden Aufstrom, welcher das Materialbett aufgelockert. In solchem Zustand beschleunigen sich die leichten Partikel in Richtung der Strömung. Gleichzeitig sinkt das Schwergut entgegen der Strömungsrichtung ab. Das Material wird nach der Dichte geschichtet. Die obere Schicht besteht aus den leichten Partikeln, die über eine Wehr ausgetragen werden. Darunterliegende Schicht beinhaltet die schweren Partikel, die über ein mit einer Zentralschleuse verschlossenes Ausstragsrohr ausgetragen werden können. Es können mehrere Bauformen der Setzmaschinen unterschieden werden: Stauchsetzmaschine, Membran- bzw. Kompensatorsetzmaschine, seitengepulste Setzmaschine und unterbettgepulste Setzmaschine. Der Setzvorgang selbst ist von den Eigenschaften des zu trennenden Gutes abhängig, wie beispielsweise von seiner Dichte, Kornform und Korngröße. Die Parameter der Setzmaschine wie z.B. Setzbethöhe, Viskosität des Fluids, Hubhöhe und -frequenz spielen eine wichtige Rolle für den Setzvorgang [15].

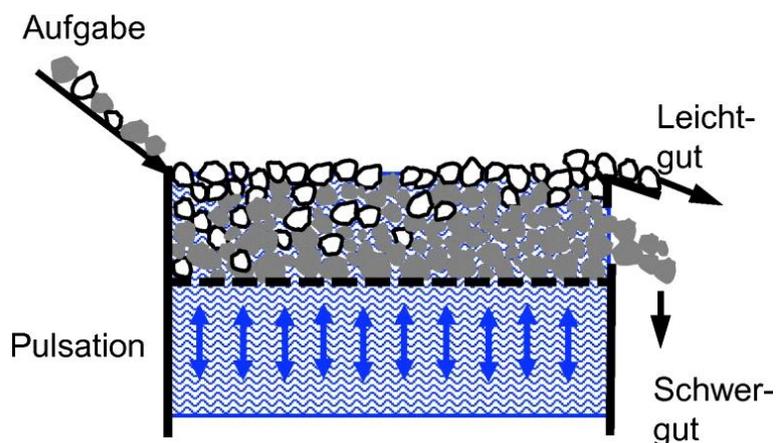


Abb. 2-13: Setzvorgang, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Grundsätzlich eignen sich nasse Sortierverfahren zur Ausscheidung von Partikeln mit geringen bis mittleren Dichten. Nasse Sortierverfahren sind im Gegenteil zu trockenen Verfahren weniger abhängig von der Korngröße des Aufgabegutes. Der zusätzliche Aufwand der nassen Aufbereitung im Vergleich zur Trockenverfahren ergibt sich aus dem erforderlichen

Entwässern von ausgetragem Leicht- und Schwergut. Das Waschwasser kann zu dem Kreislauf wieder zugeführt werden. Das Wasser, das mit dem Material ausgetragen wird, muss durch Zufuhr von frischem Wasser kompensiert werden [15].

Generell gilt, dass nasse Sortierverfahren sehr qualitativ hochwertige, sowie schad- und störstoffarme Recycling-Produkte erzeugen. Der größte Nachteil ist die Kostenintensität, die sich aus der Aufbereitung des Prozesswassers und des während der Sortierung entstandenen Schlammes ergibt. Aus diesem Grund werden die nasse Sortierverfahren nur in seltenen Fällen eingesetzt [18].

2.2 Konfiguration der Aufbereitungsanlagen

Es wird zwischen mobilen und stationären Aufbereitungsanlagen unterschieden. Der Prozess in einer mobilen Anlage verläuft in weniger Schritten im Vergleich zu einer stationären Anlage. Der Ablauf in einer mobilen Anlage besteht aus den folgenden Schritten: das Aufgabematerial wird zuerst durch die Vorabsiebung in zwei Fraktionen getrennt. Bestandteile mit niedriger Festigkeit werden als Vorsiebmaterial ausgeschieden. Das Grobgut wird im Brecher zerkleinert. Die Entfernung der Eisenteile erfolgt mittels einem nach dem Brecher eingesetzten Überbandmagnet [15].

Abb. 2-14 stellt die oben genannten Aufbereitungsschritte in einer mobilen Anlage dar.

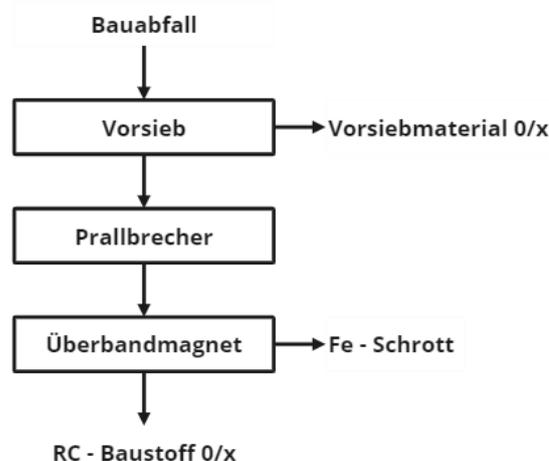


Abb. 2-14: Verfahrensfließbild einer mobilen Aufbereitungsanlage, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Zusammengefasst lässt sich der Aufbereitungsprozess in einer stationären Anlage folgendermaßen darstellen: zweistufige Zerkleinerung erfolgt mit Hilfe eines Backenbrechers als Vorbrecher und eines Prallbrechers als Nachbrecher. Danach werden die Störstoffe am Sortierband aussortiert. Mittels Vibrationssiebung werden die Korngruppen hergestellt. Die Abtrennung von leichten Störstoffen erfolgt mittels Windsichtung [15].

Der Ablauf der Aufbereitung in einer stationären Anlage wird in Abb. 2-15 ersichtlich.

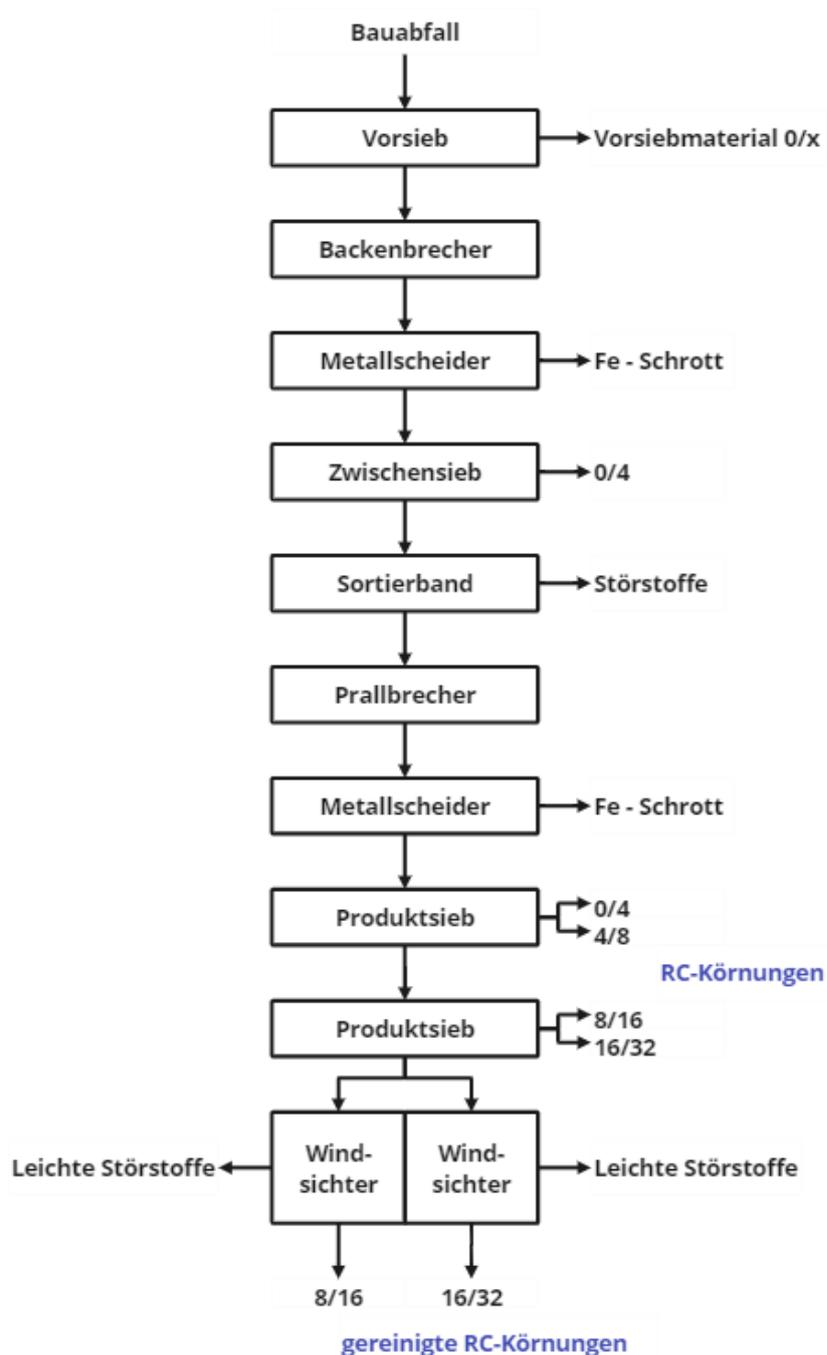


Abb. 2-15: Verfahrensfließbild einer stationären Aufbereitungsanlage, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

Die wichtigsten Merkmale von mobilen und stationären Bauschutt-aufbereitungsanlagen sind in den folgenden Absätzen erläutert.

Eine mobile Anlage ist bis zu einer Aufgabemenge von ca. 250 t/h geeignet. Wirtschaftlich ist sie ab einer Gesamtabbruchmenge von rund 5.000 t pro Standort. Auch bei größeren Bauvorhaben wie beispielsweise Rückbau von Industrieanlagen oder Sanierung von Autobahnen ist diese Anlagenart immer noch wirtschaftlich. Es handelt es sich um eine

schnell und leicht versetzbare Anlage, weil alle ihre Bestandteile auf Sattelaufliegern, Tief-ladern oder Hängern gruppiert sind. Mit der mobilen Anlage sind unterschiedliche Tech-niken realisierbar, von einer sehr einfachen Variante, die nur aus Vorabsiebung und Zer-kleinerung besteht, bis zu der aufwändigeren Variante, die zusätzlich mit Produktsieben und Windsichter ausgestattet ist. Auch die Vorbereitung des Aufstellungsortes bedarf kei-nen großen Aufwand. Solange die Betriebsdauer an einem Standort die bestimmte Grenze nicht überschreitet, ist kein Genehmigungsverfahren erforderlich. Die Qualität des Aufga-bematerials und der geplante Aufbereitungsaufwand beeinflussen die Endproduktquali-tät [15].

Stationäre Anlagen werden meistens in Aufbereitungszentren in Ballungsräumen einge-setzt. In diesen Anlagen sind Kapazitäten bis zu 1.000.000 t/a realisierbar. Für einen ge-rechten Betrieb müssen Aufkommen an Bauschutt und Einsatz der Recycling-Baustoffe innerhalb eines begrenzten Gebiets längerfristig gesichert sein. Hinsichtlich des techno-logischen Aufwands ist hier eine Maximalvariante realisierbar. Das Betriebsgelände muss erworben und eingerichtet werden, was einen zusätzlichen Aufwand bedeutet. Dazu kommt noch der Aufwand für Genehmigungsverfahren. Eine stationäre Anlage schafft eine breitere Palette der Recycling-Produkte. Die Produktqualität ist auch bei inhomoge-nem Aufgabematerial steuerbar. Dies erfolgt durch gezielte Annahme, Kontrolle, Up-stream-Sortierung, Zwischenlagerung, mehrstufige Zerkleinerung und Downstream-Sor-tierung. Für den Fall, dass die Anlage qualifizierte Einsatzgebiete wie den Straßenbau oder die Betonherstellung beliefert, ist eine regelmäßige Güteüberwachung erforderlich [15].

Die Vorteile einer mobilen Behandlungsanlage sind: geringe Transportentfernung, Zu-nahme des lokalen Angebots an Aggregaten und ein einfacher Transport zu anderen Bau-stellen [17]. Ein weiterer Vorteil der mobilen Anlagen ist die Möglichkeit der Verwertung der Recycling-Produkte gleich am Ort der Aufbereitung [15]. Diesen gegenübergestellt sind die folgenden Nachteile einer mobilen Anlage: geringe Qualität der Recycling-Pro-dukte, Lärm- und Staubbelastung der Umgebung und Wirtschaftlichkeit nur bei geringe-ren Mengen von Bau- und Abbruchabfällen. Da bei mobilen Anlagen auf die Siebklassie-rung meistens verzichtet wird, ist es möglich, nur ein oder zwei Recycling-Produkte herzustellen. Ein wesentlicher Nachteil der Verwendung von mobilen Anlagen ist die be-schränkte Herstellungskapazität.

Stationäre Behandlungsanlagen verzeichnen vor allem folgende Vorteile: hohe Qualität der Recycling-Produkte, geeignete Korngrößenverteilung und große Produktionskapazi-täten. Große Anschaffungskosten, große Transportentfernung und von konstantem Zu-fluss der Bau- und Abbruchabfällen abhängige Effizienz sind die wesentlichen Nachteile einer stationären Behandlungsanlage [17].

A. Coelho und J. De Brito, 2013 [19] bezeichnet die Entfernung zwischen der Abbruchstelle und der möglichen stationären Recyclinganlage als entscheidenden Faktor, ob eine mobile oder eine stationäre Anlage verwendet wird.

Stationäre Anlagen haben eine höhere Effizienz und geringere umweltrelevante Auswirkungen im Vergleich zu mobilen Anlagen. Der Grund dafür ist, dass diese an Strom angeschlossen werden. Im Gegenteil dazu werden die mobilen Anlagen dieselbetrieben. Andererseits sind die Transportwege für die mobilen Anlagen wesentlich kürzer, was positive Effekte auf die Umwelt aufweist [19]. Der Durchsatz ist ein wichtiges Entscheidungskriterium zwischen einer mobilen und stationären Aufbereitungsanlage. Die Schwelle liegt bei 200.000 Tonnen pro Jahr [20].

3 Stand der Wissenschaft der mechanischen Rezyklierung

Ziel der innovativen Bauschutttaufbereitung ist, die Rezyklate mit einem möglichst geringen Zementsteinanteil zu erzeugen. Zahlreiche Entwicklungen der Zerkleinerungs- und Sortierverfahren folgen diesem Ziel. Im Bereich der Zerkleinerungsverfahren sind die wesentlichen neuen Ansätze die Beanspruchung durch Abrasion bzw. Scherkräfte, thermische Behandlung, direkte Eintragung der Kräfte in Körner und die Vorbehandlung mit Mikrowellen. Im Bereich der Sortierverfahren ist es vor allem die sensorgestützte Sortierung, die die händische Sortierung in der Zukunft ersetzen soll [15].

Die meisten innovativen Methoden sind zurzeit auf Labor-Maßstäbe beschränkt. Ausnahme ist der Smart Crusher, der schon am Markt verfügbar ist [21].

3.1 Innovative Zerkleinerungsverfahren

3.1.1 Smart Crusher

Bei einem modifizierten Backenbrecher, dem sogenannten Smart Crusher kommt die Abrasionsbeanspruchung zum Einsatz. Die Brechprodukte der klassischen Zerkleinerung werden zusätzlich durch Scherkräfte beansprucht. Dies erfolgt durch eine veränderte Kinematik der Brechbacken des Smart Crushers. Diese setzt sich aus einer horizontalen und einer vertikalen Komponente zusammen. Der Materialaustrag wird über eine unterhalb der Austragsöffnung angeordneten rotierende Walze gesteuert. Durch die veränderte Materialbewegung in der Maulöffnung wirken sowohl Druckbeanspruchungen als auch Scherkräfte auf das Material. Eine weitere Modifikation spiegelt sich in einer angepassten Intensität der Beanspruchungen wider. Die Kräfte werden so ausgewählt, dass es zu einem Abtrag des an der Oberfläche anhaftenden Zementsteins kommt, jedoch ohne Kornzertrümmerung. Die Risse werden in der schwächeren Phase des heterogenen Gemisches, d.h. im Zementstein gebildet. Das erzeugte Produkt hat eine Korngrößenverteilung zwischen 50 µm und 50 mm. Die groben Anteile sind zementsteinfrei oder -arm. Im Gegenteil dazu sind die feinen Fraktionen zementsteinreich [15].

Smart Crusher wurde im Jahr 2011 patentiert [22]. Nachdem ein Prototyp mit dem Durchsatz von 0,20 t/h ermutigende Ergebnisse gezeigt hat, wurde ein „real scale Smart Crusher“ gebaut. Dieser erreicht einen Durchsatz von 40 t/h bei einem Energieverbrauch von 1 kWh/t. Ein weiterer Vorteil des Smart Crushers im Vergleich zu den herkömmlichen Brecheranlagen ist ein um 50% geringeres Gewicht bei der gleichen Kapazität, was den Transport eines Smart Crushers zum Einsatzort einfacher macht [21].

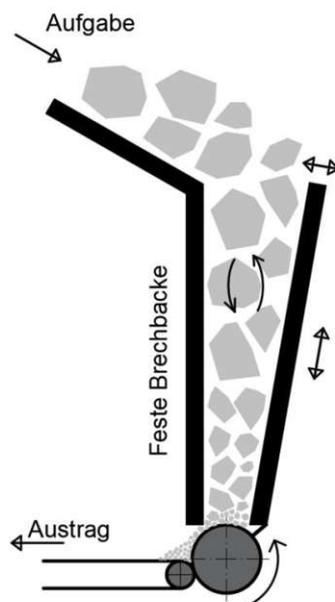


Abb. 3-1: Smart Crusher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

3.1.2 Modifizierter Kegelbrecher

Bei einem modifizierten Kegelbrecher erfolgt die Entfernung des Zementsteins durch die Scherbeanspruchung. Diese entwickelt sich in dem Spalt zwischen dem exzentrisch gelagerten Rotor (Innenzylinder) und dem äußeren Mantel [15]. Der Außenzylinder hat eine Höhe von 800 mm und einen Innendurchmesser von 720 mm. Der Innenzylinder, der gleichzeitig ein Rotor ist, hat einen Außendurchmesser von 600 mm. Die Höhe ist analog dem Außenzylinder 800 mm. Der Spalt zwischen dem Außen- und Innenzylinder weist ein Volumen von rund $0,1 \text{ m}^3$. Der Rotor erzeugt ca. 400 bis 600 Umdrehungen in einer Minute. Die maximale Exzentrizität, die er erreicht, liegt bei 11,7 mm. Ein modifizierter Kegelbrecher hat eine Durchsatzquote von 30 bis 69 Tonnen pro Stunde [23].

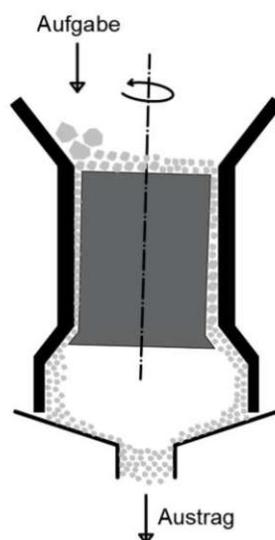


Abb. 3-2: Kegelbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

3.1.3 Thermische Behandlung

Thermische Methoden führen zur Dehydratation der Zementsteinphase. Dehydratation verursacht die Festigkeitsabnahme der Zementsteinphase, was im nächsten Schritt eine Trennung des Betonbruchs in grobe und feine Gesteinskörnung ermöglicht. Die Klassierung erfolgt mittels eines Sichters. Das Ausmaß der Dehydratation ist abhängig von der Behandlungstemperatur. Bei 600°C bleiben noch ca. 15 bis 35 Masse-% des Zementsteins an der Kornoberfläche haften. Wird die Temperatur auf 700°C erhöht, reduziert sich der Zementsteingehalt auf 2 Masse-%. Durch die Erhöhung der Behandlungstemperatur auf 800°C können zementsteinfreie Aggregate hergestellt werden [15].

3.1.4 Autogenmahlung

Das gebrochene Betongranulat wird in eine rotierende Trommel aufgegeben. Die Trommel hat einen Durchmesser von 30 cm und Tiefe von 50 cm und wird bis ca. 33% des Volumens gefüllt. Die Trommel ist auf der Innenseite mit Schlagleisten ausgerüstet. Die Trommel rotiert mit einer Geschwindigkeit von 60 Umdrehungen pro Minute. Nach einer 10 bis 15-minütigen Behandlung werden die Körner gewaschen und anschließend getrocknet mit dem Ziel, die Verunreinigungen abzutrennen. Mit zunehmender Dauer der Behandlung sinkt die Wasseraufnahmekapazität der rezyklierten Gesteinskörnung. Tam et al., 2021 [24] berichtet von einer 53,40% Reduktion der Wasseraufnahme für die Korngröße zwischen 4,75 und 9,50 mm. Für die Korngröße zwischen 9,50 und 19 mm wird eine Verringerung der Wasseraufnahme von 17,20% verzeichnet. Die Rohdichte hat um 13,90% zugenommen und ebenso die Druckfestigkeit nach 28 Tagen [24].

3.1.5 Elektrodynamische Fragmentierung

Bei diesem Verfahren wirken die Beanspruchungen an der Phasengrenze zwischen Zementstein und Gesteinskörnung. Der Beton befindet sich in einem Wasserbad. Durch eine Unterwasserfunkentladung wird die Beanspruchung des Betons ausgelöst. Die Größe der elektrischen Welle wird so gewählt, dass der Durchschlag des Funkens nicht durch den Beton erfolgt. Dieses Verfahren kann einen großen Anteil der zementsteinfreien Partikel erzeugen. Das zu erwartende Zerkleinerungsverhältnis liegt bei circa 2, was wesentlich geringer ist als im Fall einer klassischen Zerkleinerung. Der Vorteil ist jedoch eine große Abtrennung des Zementsteins von der natürlichen Gesteinskörnung [15].

Diese Methode wird zurzeit intensiv geforscht. Der Vorreiter dieser Methodik ist das Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP [25].

3.1.6 Hemmnisse für den Einsatz innovativer Zerkleinerungsverfahren

Nachteile der oben genannten innovativen Methoden sind jedoch hohe Kosten, Umweltauswirkungen zufolge eines erhöhten Energieaufwands und eine erschwerte Umsetzung in der Industrie wegen geringer realisierbarer Durchsätze. Sie sind gleichzeitig die

größten Hürden für den Einsatz der fortgeschrittenen Methoden in der Rezyklierung der mineralischen Bau- und Abbruchabfällen [26]. Die Produkte eines zweistufigen Verfahrens nach aktuellem Stand der Technik verzeichnen zwar eine Wasseraufnahme von 5,50 Masse-%, der Energieverbrauch bezogen auf Aufgabenmaterial beträgt aber 22 MJ/t. Im Gegensatz dazu verbraucht die thermische Behandlung 1.056 MJ pro aufgegebenen Tonne. Die Wasseraufnahme wird aber deutlich verringert und beträgt nur noch 0,40 Masse-%. Die Aufbereitung mit einem Smart Crusher liefert die Recycling-Produkte mit einer Wasseraufnahme von 3,2 Masse-% bei einem Energieverbrauch von 40 MJ bezogen auf eine Tonne des Aufgabematerials. Die Mikrowellenbehandlung verbraucht 23 MJ/t Energie bezogen auf das Aufgabematerial. Die Produkte der Mikrowellenbehandlung verzeichnen eine Wasseraufnahme von 2,8 Masse-% [15].

Nur im Fall, dass alle Produkte der innovativen Zerkleinerungsmethoden einen geeigneten Einsatz finden, können diese Methoden als Alternative zur herkömmlichen Methoden herangezogen werden [15].

3.2 Innovative Sortierverfahren

3.2.1 Sensorbasierte Sortierverfahren

Es wird angestrebt, die händische Sortierung durch automatische bzw. maschinelle Sortierverfahren zu ersetzen. Diese Verfahren beruhen auf dem Prinzip der Erkennung von Abfallpartikel. Das erfolgt im Bereich von Bruchteilen von Sekunden. Nach der Erkennung werden die Abfallpartikel gezielt ausgetragen. Einrichtungen für sensorbasierte Sortierverfahren bestehen aus einem Band, einer Strahlenemissionsquelle, einer Detektor- und Auswerteeinheit, sowie einer Austragsvorrichtung. Um möglichst hohe Produktreinheit zu erreichen, sind gute Vereinzelung und geringe Verschmutzung des zu sortierenden Materials unerlässlich. Die Sortiermerkmale, die für das Verfahren von Relevanz sind, wären: Materialstruktur und Materialbeschaffenheit, Kornform, Korngröße, Korndichte, Leitfähigkeit, Oberflächenbeschaffenheit, Partikelfarbe, Partikelhelligkeit, sowie Opazität [16]. In der Sortierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen haben sich Farbkameras und Nahinfrarotsensoren etabliert [15].

Die Trennkriterien für die Farbsortierung sind: Farbe, Helligkeit, Transparenz, Form und Reflexion. Die Farbsortierung eignet sich gut für die Trennung der grauen von den roten Bestandteilen, das heißt für die Trennung von Ziegelpartikeln. Für den Ziegelgehalt zwischen 20% und 90% und eine Korngröße über 10 mm, erreicht die Farbsortierung gute Trennergebnisse [15].

Nahinfrarotsortierung eignet sich gut für weitere Abtrennung von Störstoffen innerhalb der grauen Bestandteile. Das heißt für die Abtrennung der Gemische aus Beton, Porenbeton, Kalksandstein und Ziegel. Auch Gips lässt sich mit Nahinfrarotsensoren gut abtrennen. Das Trennkriterium, von dem das Nutzen gemacht wird, ist in diesem Fall molekulare Zusammensetzung an der Oberfläche [15].

In Abhängigkeit von der Partikelgröße sind unterschiedliche Durchsätze realisierbar. Bei den feinen Gesteinskörnungen sind wenige Tonnen pro Stunde abtrennbar, während bei größeren Formaten die Durchsätze von bis 200 Tonnen pro Stunde möglich sind [15]. Weitere sensorgestützte Sortierverfahren sind induktive Detektoren, die die elektrische Leitfähigkeit als Trennkriterium nutzen; Röntgendetektoren, die anhand von der Dichte die Partikel abtrennen sowie laserinduzierte Plasmaspektroskopie, die die chemische Zusammensetzung ermitteln [15]. Diese Methoden sind im Recycling von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen bis dato nicht vertreten und werden deshalb nicht näher erläutert.

3.2.2 Advanced dry recovery (ADR)

Advanced dry recovery (ADR) ist ein mechanisches Verfahren, das den Materialstrom mit einer Partikelgröße von 0 bis 16 mm in drei Fraktionen abtrennt, und zwar: 4-16 mm, 1-4 mm und <1 mm. Die ADR-Technologie wurde entwickelt, um die Abtrennung der feuchten feinen Gesteinskörnungen zu ermöglichen. Das geschieht nicht mit herkömmlichen Methoden, weil das feuchte Feingut kleben bleibt, entweder an der groben Gesteinskörnung oder an der Siebmaschine selbst. Die ADR-Technologie wurde auch als Alternative zur thermischen Behandlung entwickelt, die einen enormen Energieverbrauch verursacht und als Alternative zur Nassaufbereitung, die eine große Menge an zu behandelndem Prozesswasser erzeugt. Thermische Behandlung, sowie Nasssortierung verursachen nicht nur hohe Kosten, sondern auch hohe Umweltbelastung [27].

Die Funktionsweise der ADR-Technologie lässt sich folgendermaßen erklären: das abzutrennende Gut wird einem Prallsichter aufgegeben. Die Abtrennung erfolgt anhand der Wurfparabeln der einzelnen Fraktionen, wie es in der Abb. 3-3 dargestellt wird. Die groben Fraktionen werden mittels eines gerichteten Luftstroms von den Leichtstoffen gereinigt. Da im Prallsichter große mechanische Beanspruchungen erzeugt werden, können eventuell vorhandene Agglomerate aufgelöst werden [15].

Die ADR-Technologie wurde an der Technischen Universität Delft mit der Internationalen Patent Nummer WO 2012/ 015299 A1 patentiert. Die aktuelle Konfiguration erlaubt die Durchsätze von 50 Tonnen pro Stunde. Vorteile der ADR-Technologie sind ihre Mobilität, Flexibilität und Wirtschaftlichkeit hinsichtlich des technologischen Aufwands. Nichtsdestotrotz ist der wesentliche Vorteil die Möglichkeit der Abtrennung in feuchtem Zustand [28].

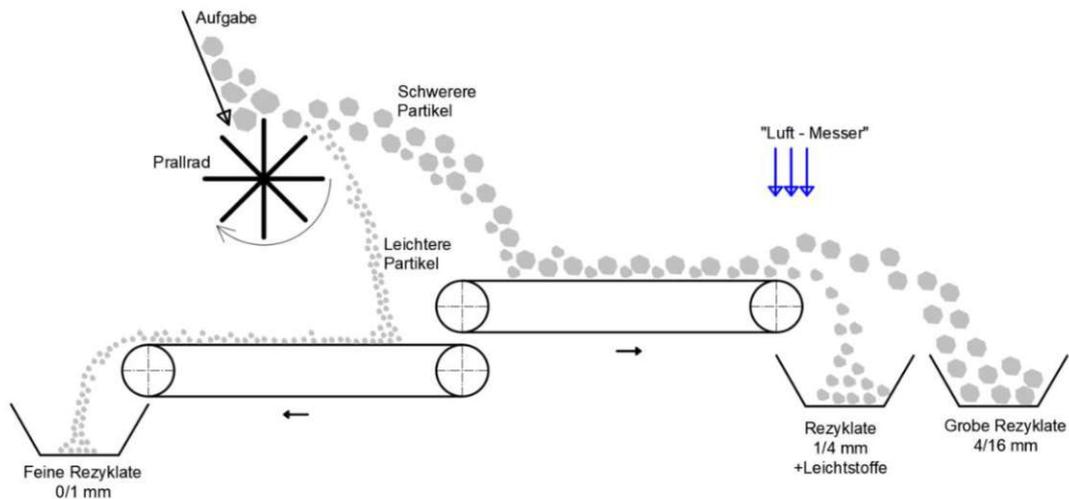


Abb. 3-3: Advanced Dry Recovery, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]

3.2.3 Heating air and classification system (HAS)

Die HAS-Technologie wird im Anschluss an ADR-Technologie verwendet und dient der weiteren Aufbereitung der Produkte aus dem ADR-Verfahren, d.h. der Fraktionen 1-4 mm und <1 mm. Die HAS-Technologie hat zum Ziel, sehr kleine Störstoffe wie Holz oder Plastik von der feinen Fraktion abzutrennen. Dies erfolgt dadurch, dass das Feingut der heißen Luft ausgesetzt und dadurch getrocknet wird. Die Luft hat eine zweifache Funktion. Einerseits dient sie als Wärmeträger, andererseits trennt sie die Partikel nach ihrer Korngröße. Die Partikel werden von oben in die HAS-Einheit aufgegeben. Die Luft strömt in zur Schwerkraft entgegengesetzter Richtung, so dass die schweren Partikeln nach unten fallen und die leichten Partikel von der heißen Luft mitgenommen werden. Die schweren Partikeln sammeln sich am Boden der HAS-Einheit, von wo sie aus dem System ausgelesen werden. Bestandteile des HAS-Reaktors sind: Brenner, Rüttler, Kompressor, Zyklon und Drehschleuse. Im Brenner wird Diesel auf 700°C erhitzt, um den Luftstrom zu erhitzen. Kompressor unterstützt die Luftbewegung. Rüttler sorgen dafür, dass die Feianteile nach unten fließen. Zyklon dient der Abtrennung der ultrafeinen Partikel aus dem Luftstrom. Die Produkte der HAS-Technologie sind feine Partikel mit einer Korngröße von 0,25 – 4 mm und ultrafeine Partikel mit der Korngröße kleiner als 0,25 mm. Ein Nachteil dieser Technologie ist die geringe Abtrennung verschiedener Fraktionen. Der Grund dafür ist, dass die größere Partikeln den Luftstrom blockieren können und somit können die feineren Partikel nicht von der Luftstrom mitgenommen werden [28]. Die HAS-Technologie wurde an der Technischen Universität Delft patentiert. Der mögliche Durchsatz liegt bei 3 t/h [28].

Sowohl ADR-, als auch HAS-Technologie ermöglichen die Abtrennung des feinen Zementsteines, was ein weiterer Schritt in der fortgeschrittenen Rezyklierung ist. Der rezyklierte Zementstein kann für die Zementherstellung wieder eingesetzt werden. In diesem Fall wird von einer vollständiger Rezyklierung aller Bestandteile des Betons gesprochen. Mit diesem Thema beschäftigt sich das C2CA („Concrete to cement and aggregates“) Projekt, das an der TU Delft entwickelt wurde [28],[29].

4 Methodik der technisch-wirtschaftlichen Bewertung

Die Wirtschaftlichkeit der Aufbereitungsanlagen für Bau- und Abbruchabfälle hängt von unterschiedlichen Faktoren ab. Diese Faktoren lassen sich kategorisieren in: physische, wirtschaftliche und soziale Faktoren [30]. Unterschiedliche Quellen zeigen unterschiedliche Grade der Wirtschaftlichkeit, von keiner bis sehr hoher Wirtschaftlichkeit. Folgende Maßnahmen können die Wirtschaftlichkeit von Aufbereitungsanlagen positiv beeinflussen [30]:

- Besteuern der natürlichen Gesteinskörnungen,
- Besteuern der deponierten Baumaterialien, die rezyklierbar sind. Eventuell Einführung eines Deponierungsverbotes,
- Subventionierung der Rezyklierungsanlagen für Bau- und Abbruchabfälle,
- Einführung und Anpassung der rechtlichen Rahmenbedingungen für rezyklierte Materialien und
- Verringerung der Steuer für die Bauprodukte, die rezyklierte Baustoffe beinhalten.

Rentabilität der stationären Anlagen ist nur dann gegeben, wenn die eingesetzten Geräte nicht neu angeschafft werden und wenn die Produktionsmenge ausreicht [30]. Die Produktionsmenge ist stark von der Nachfrage nach rezyklierten Baumaterialien abhängig. Die rezyklierte Gesteinskörnung findet ihre Anwendung in Straßenbau und als Verfüllungsmaterial. Seltener wird sie in der Asphalt- und Betonproduktion verwendet [17], obwohl in der Betonherstellung ein größerer Bedarf nach Gesteinskörnungen besteht [30]. Rund 1.64 Mio. Tonnen Gesteinskörnungen werden jährlich in den Betonwerken in Portugal gebraucht. Im Vergleich dazu werden für Straßenbau nur rund 83.000 Tonnen der Gesteinskörnung gebraucht [30].

A. Coelho und J. de Brito, 2013 [30] besagt weiter, dass die Wirtschaftlichkeit nur dann gegeben ist, wenn die Deponierungskosten inklusiv Transportkosten die Annahmepreise der Behandlungsanlagen übersteigen und wenn die Preise der natürlichen Gesteinskörnung höher als die Preise der rezyklierten Gesteinskörnung sind.

Die Aufbereitungsanlagen für die rezyklierte Gesteinskörnung unterscheiden sich nicht wesentlich von den Anlagen für die Aufbereitung der natürlichen Gesteinskörnung. Der Aufbereitungsaufwand hängt von Grad der Verunreinigung der Bau- und Abbruchabfällen und von dem geplanten Einsatz der herzustellenden Produkte ab. Liegt sortenreine Baurestmasse vor, reduziert sich die Anzahl der erforderlichen Aufbereitungsschritte. Somit kommt es zur Energieeinsparungen und Reduzierung der Lohnstunden. Das resultiert in geringeren Gesamtkosten. Im Fall eines reinen und unbewehrten Betonabbruchs, kann eine händische oder maschinelle Sortierung entfallen [17].

A. Coelho und J. De Brito, 2013 [19] unterteilt die stationären Aufbereitungsanlagen in drei Stufen:

- Anlagen der Stufe 1 sind mobilen Aufbereitungsanlagen hinsichtlich der eingesetzten Geräte und Technologien ähnlich. Im Vergleich zu einer mobilen Anlage kann eine stationäre Anlage der Stufe 1 mit einer sogenannten Lesestation für händische Sortierung ausgerüstet werden. Die Zerkleinerung ist von Sortierung und eventuell Abtrennung der Metalle gefolgt. In Einzelfällen ist ein Windsichter vorhanden. Dieser trennt leichte Störstoffe wie Papier oder Plastik ab. Feine und sehr feine Anteile werden hier nicht entfernt, weil sie meistens an den groben Körnern anhaften. Sowohl die Produktionsmenge als auch Qualität der Produkte ist sehr gering. Dementsprechend ist die hier hergestellte rezyklierte Gesteinskörnung nur für Verfüllungen und ungebundene Schichten im Straßenbau geeignet.
- Anlagen der Stufe 2 produzieren relativ sortenreine Produkte mit einer bestimmten Korngrößenverteilung, die sogar für den Einsatz in Fundamenten geeignet ist. Die hergestellten Produkte kennzeichnen sich durch eine mittlere Qualität. Um diese zu erreichen, müssen zusätzliche Sortierungsverfahren wie Magnete, Windsichtung oder Nasssortierung eingesetzt werden. Zuletzt genannte Methode ist in Abtrennung der feinen von der groben Gesteinskörnung sehr effektiv. Der Nachteil ist der große Bedarf an Wasser, sowie große Mengen an Prozesswasser, die während der Sortierung entstehen.
- Anlagen der Stufe 3 können alle Bestandteile der gemischten Bau- und Abbruchabfällen aufbereiten. Der Zerkleinerungsprozess wird optimiert und die Sortierung erfolgt mehrmals innerhalb der Produktionskette. Der Reinheitsgrad der Produkte wird mit größer als 99% angegeben. Hier entstandene Produkte können für die Herstellung des rezyklierten Betons eingesetzt werden.

4.1 Systemgrenzen

Betrachtet werden die Prozesse in einer stationären Aufbereitungsanlage für mineralische Bau- und Abbruchabfälle beginnend mit der Annahme der Abfälle. Der letzte Prozess innerhalb der Systemgrenze ist die abschließende Produktsiebung der rezyklierten Gesteinskörnung. Dieser Zugang wird auch als „gate to gate“ bezeichnet. Die Transportkosten für die Anlieferung der Bau- und Abbruchabfälle werden nicht berücksichtigt, weil sie nicht von dem Anlagenbetreiber getragen werden. Die Kosten für den Transport der rezyklierten Gesteinskörnung von der Aufbereitungsanlage zu Kunden werden ebenfalls von Kunden getragen und daher nicht berücksichtigt. Der für die Bewertung relevante Materialfluss ist bewehrter Betonabbruch, typisch für Abbruchbaustellen im Hochbau. Die Kosten werden auf einen Monat gemittelt. Als Bezugseinheit wird eine Tonne der aufzubereitenden Baurestmasse angenommen.

In den Literaturquellen sind viele unterschiedliche Anlagenkonfigurationen zu finden. Die Anlagenkonfiguration ist von den gewünschten Eigenschaften des Recycling-Produktes abhängig. Je qualitativ hochwertiger das Endprodukt ist, desto aufwändiger ist der

Aufbereitungsprozess. Die Anlagekonfiguration in der Abb. 4-1 ermöglicht Erzeugung der Recycling-Produkte mit guter Qualität [5] und wird daher im Laufe der weiteren Arbeit als Referenzprozess betrachtet. Die Produkte eines solchen Prozesses können für die Herstellung von Recycling-Beton verwendet werden, um somit die Ressourceneffizienz zu maximieren.

Die Prozesskette in Abb. 4-1 wird als Szenario 1 für die technisch-wirtschaftliche Analyse herangezogen. Die genauen Geräte samt ihren Kenngrößen werden im Kapitel 4.4 behandelt.

Wie in Abb. 4-1 dargestellt, erfolgt bei der Annahme der Baurestmasse die Feststellung des Gewichts. Dies erfolgt mit einer Fahrzeugwaage. Im Fall, dass sehr große Stücke angenommen werden, werden diese vor der Zugabe zum Aufbereitungsprozess mittels einem Hydraulikbagger und dem daran befestigten Betonknacker zerkleinert. Eine Laderaupe beschickt den Vibrationsaufgeber mit den zerkleinerten Betonstücken. Vibrationsaufgeber dosiert das aufzubereitende Material. Zur Vorabsiebung werden Rollenroste eingesetzt. Die Vorabsiebung dient der Abtrennung des Feinkorns vor der Zerkleinerung. Rollenroste erfüllen hier nicht nur die Funktion eines Siebes, sondern auch eines Förderers. Das heißt, dass Überkorn mittels eines Rollenrostes zum Vorbrecher gefördert wird. Als Vorbrecher wird meistens ein Backenbrecher eingesetzt. Die Produkte der Zerkleinerung mittels eines Backenbrechers gelangen weiter zu einem Förderband. Über das Förderband wird ein Metallscheider angeordnet. Dieser trennt die metallischen Anteile ab. Erneute Abtrennung der Feianteile, die aus der ersten Zerkleinerungsstufe entstanden sind, erfolgt mittels eines 2-Decker Siebs. Die grobe Fraktion gelangt weiter zu einem Nachbrecher. Als Nachbrecher wird der Prallbrecher eingesetzt. Nach der zweiten Zerkleinerungsstufe erfolgt erneute Abtrennung der Eisenanteile mittels eines Metallscheiders. Über das Förderband gelangt das Material zu einem 3-Decker Sieb und anschließend zu einem Windsichter, der die leichten Störstoffe abtrennt. Mittels eines Windsichters erfolgt die Klassierung in die folgenden Produktgruppen: 8/16 und 16/32. Somit ist der Aufbereitungsprozess fertig und das hergestellte Recycling-Betongranulat bereit für die Vermarktung.

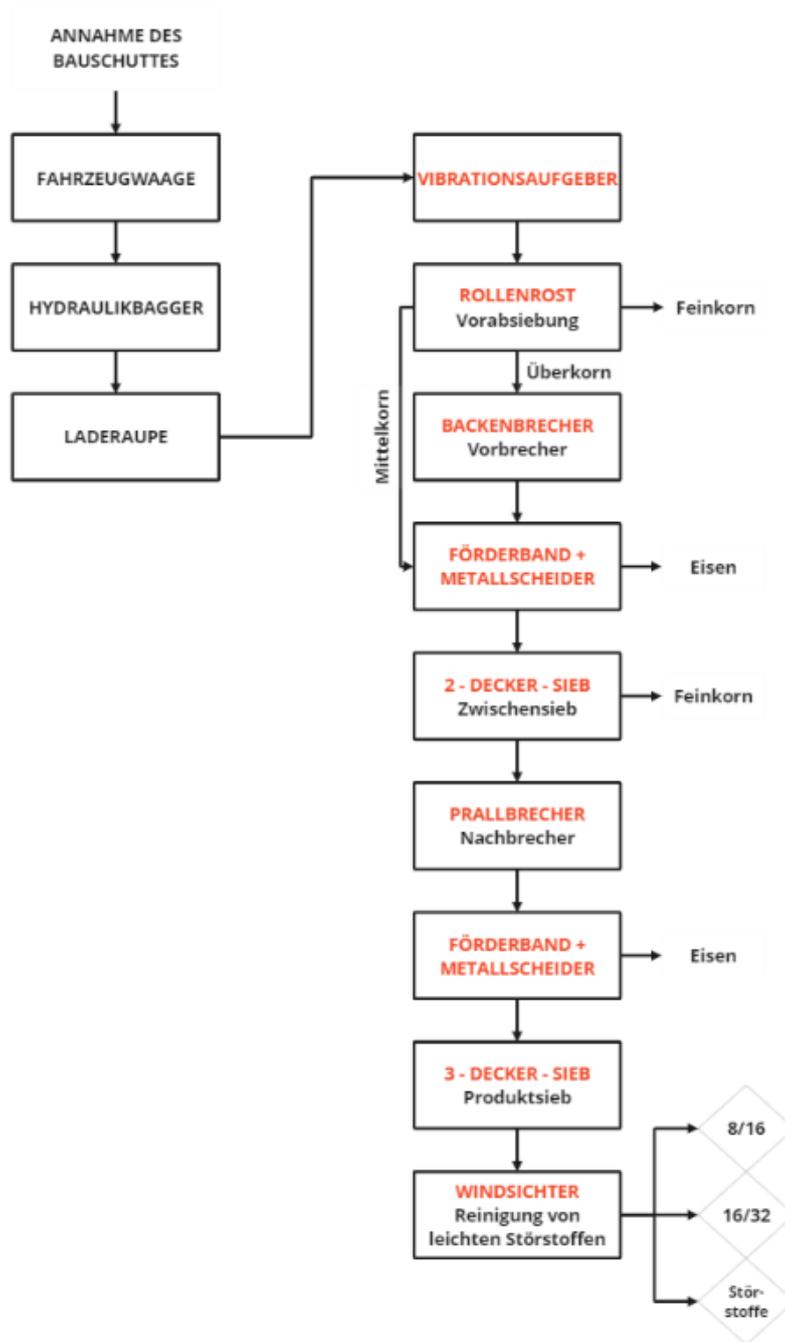


Abb. 4-1: Prozesskette 1, eigene Darstellung in Anlehnung an [5], [16]

Grundsätzlich haben sowohl Backen- als auch Prallbrecher ein großes Zerkleinerungsverhältnis. Backenbrecher zerkleinert nur eine gewisse Menge der ursprünglichen Materialien und eignet sich vor allem zur Zerkleinerung von grobem Betonbruch, während Prallbrecher sowohl den angehefteten Zement als auch die Gesteinskörnungen entfernt. Im Prallbrecher entsteht eine große Menge an Feinanteilen. Eine zweistufige Zerkleinerung mit dem Backenbrecher als Vorbrecher und dem Prallbrecher als Nachbrecher wird empfohlen, weil daraus eine Gesteinskörnung mit vorsehbarer Sieblinie entsteht [17]. Ein

weiteres wichtiges Argument für den zweistufigen Zerkleinerungsprozess ist die Kornform des Produktes. Der Backenbrecher erzeugt nämlich Produkte mit einer plattiger bis splittiger Kornform, während ein Prallbrecher Produkte mit kubischer Kornform erzeugt. Es kann ebenfalls passieren, dass das plattige Aufgabematerial unzerkleinert in den Austragspalt eines Backenbrechers gelangt. Mehrere Zerkleinerungsstufen verringern die Unebenheit, Irregularität und Menge des angehefteten Zementsteins. Durch den zweistufigen Zerkleinerungsprozess wird der Zementsteingehalt der groben Fraktion verringert [15]. Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, die noch eine dritte Zerkleinerungsstufe durchlaufen hat, zeigt eine sehr geringe Verbesserung der Eigenschaften im Vergleich zum zweistufigen Prozess. Mehrere Zerkleinerungsstufen bedeuten auch feinkörnigere Recycling-Produkte, was im Widerspruch zur Anfrage steht. Die grobkörnigen Produkte werden bevorzugt unabhängig von zukünftigen Einsatzbereich [17]. Entscheidende Bedeutung für die Herstellung von hochqualitativen störstofffreien Baustoffen spielt die mehrstufige Siebung und Sortierung [15]. Deshalb wird sie mehrmals in der Prozesskette angeordnet.

Im Vergleich zu den fortgeschrittenen Recycling-Methoden, aus welchen mehr Feianteile produziert werden, sind die CO₂-Emissionen einer zweistufigen Zerkleinerung am geringsten [31]. Ein weiterer Vorteil der klassischen zweistufigen Zerkleinerung ist die höhere Wirtschaftlichkeit verglichen mit den innovativen Methoden. Im Zusammenhang mit der höheren Wirtschaftlichkeit stehen größere Produktionsmengen. Im Gegenteil dazu sind die innovativen Methoden immer noch auf Labor-Maßstäbe begrenzt und werden daher für die technisch-wirtschaftliche Analyse nicht miteinbezogen.

Nach der Betrachtung des Szenarios 1, in welchem die Siebung mehrmals in der Prozesskette angeordnet wird (siehe Abb. 4-1) und welches die Herstellung von hochwertigen Recycling-Produkten ermöglicht, wird noch Szenario 2 betrachtet. In diesem wird auf die mehrmalige Siebung verzichtet. Solche Anlagenkonfiguration sind in der Praxis am meisten vertreten. Das Resultat der reduzierten Prozesskette sind Recycling-Baustoffe mit geringen Reinheitsgraden und einer nicht vorsehbaren und breit gestreuten Körnungslinie. Deshalb sind diese Produkte für die Betonherstellung eher nicht geeignet und können nur im Sinne des „Downcyclings“-Prinzips wiederverwendet werden. Die genauen Prozesse können der Abb. 4-2 entnommen werden.

Auch hier wird eine Fahrzeugwaage eingesetzt, die bei der Annahme der Feststellung von Gewicht des Bauschuttes dient. Danach werden die groben Betonstücke mittels einem Betonknacker zerkleinert. Der Betonknacker wird an dem Hydraulikbagger befestigt. Die Beschickung der Prozesskette mit den zerkleinerten Betonstücken erfolgt mittels einer Laderaupe. Diese befüllt den Vibrationsaufgeber, der das aufzubereitende Material für den weiteren Prozess dosiert. Der Rollenrost dient sowohl der Vorabsiebung des Feinkorns als auch dem Transport des Überkorns zu einem Backenbrecher. Die Produkte der

Vorzerkleinerung mittels eines Backenbrechers werden auf einem Förderband von den Eisenanteilen bereinigt. Dies erfolgt mittels eines Metallscheiders. Der erste wesentliche Unterschied des Szenario 2 (siehe Abb. 4-2) im Vergleich zum Szenario 1 (siehe Abb. 4-1) ist Entfall der Zwischensiebung mittels eines 2-Decker Siebs. Im Szenario 2 gelangt das aufzubereitende Material über dem Förderband direkt zu einem Prallbrecher, der als Nachbrecher eingesetzt wird. Nach der zweiten Zerkleinerungsstufe erfolgt erneute Abtrennung der Eisenanteile mittels eines Metallscheiders. Dies ist die letzte Stufe der Aufbereitung nach dem Szenario 2. Hier ist der zweite wesentliche Unterschied bemerkbar, und zwar, die Produktsiebung mittels eines 3-Decker Siebs, sowie die Klassierung in die einzelnen Korngruppen mittels eines Windsichters finden nicht statt. Das Produkt der Aufbereitung nach dem Szenario 2 ist somit ein Recycling-Betongranulat 0/16.

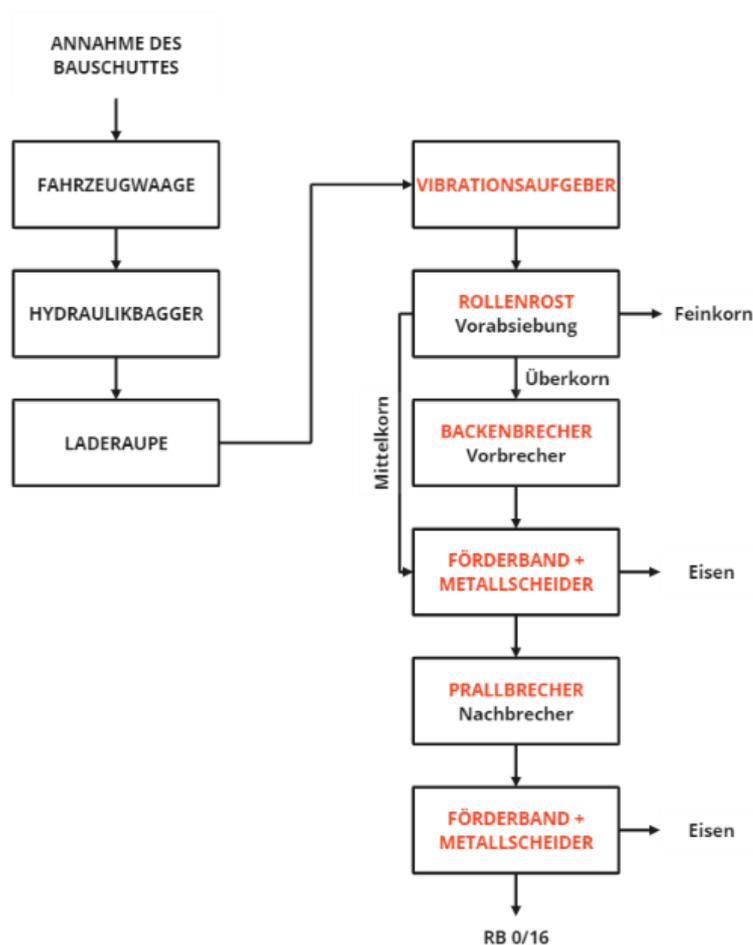


Abb. 4-2: Prozesskette 2, eigene Darstellung

4.2 Erlöse einer Aufbereitungsanlage

Erlöse einer Aufbereitungsanlage setzen sich aus den Annahme- und Abgabepreisen zusammen. Die Annahmepreise steigen mit dem zunehmenden Aufbereitungsaufwand. So

ist beispielsweise Annahmepreis für den sortenreinen unbewehrten Beton niedriger als für bewehrten Beton, weil der Teilprozess der Eisenabtrennung entfällt. In der Tabelle 4-1 werden die Annahmepreise der Aufbereitungsanlagen in Wien und Umgebung angegeben. Die einzelnen Anlagen werden dem Anlagenverzeichnis, das von dem Österreichischen Baustoff-Recycling Verband [32] ausgegeben wurde, entnommen. Die Preise werden den jeweiligen Webseiten der Aufbereitungsanlagen entnommen. Die angeführten Anlagen nehmen auch Aushubmaterial an. Weil die Aufarbeitung des Aushubmaterials dem Rahmen dieser Arbeit entspringt, werden die Annahmepreise für dieses ausgelassen.

Tabelle 4-1: Annahmepreise in Raum Wien

Aufberei- tungsanlage:	Artikelbezeichnung:	Abfallschlüssel- nummer:	Annahmepreis in €/t:
Anlage 1	Bauschutt	31409	38,50
	Asphalt oder Betonfräsmate- rial	31410	13,20
	Altschotter Gemisch	31410	9,90
	Beton-Asphalt-Schotter Ge- misch	31410	15,40
	Beton bis max. 100 cm unbe- wehrt	31427	3,30
	Beton über 100 cm unbewehrt	31427	3,90
	Beton bis max. 100 cm be- wehrt	31427	4,40
	Beton über 100 cm x 100 cm bewehrt	31427	16,50
	Beton verunreinigt	31427	11,00
	Asphaltaufbruch recyclingfä- hig	54912	13,20
	Restasphalt	54912	13,20
Anlage 2	Bauschutt Baurestmassende- poniequalität lt. DVO	31409, 31410, 31427, 54912	47,30
	Bauschutt Baurestmassende- poniequalität / Gleisschotter	31409, 31467	47,30
	Bitukies / Technisches Schütt- material	31410, 31411-25, 54912	17,50
	Beton unbewehrt, sortenrein, max. 40x40 cm Kantenlänge / Techn. Schüttmaterial	31411-34, 31427	13,50

	Beton bewehrt, sortenrein	31427	15,00
	Beton unsortiert, verunreinigt	31427	23,00
Anlage 3	Ziegelschutt rein, ohne Fremd- stoffanteile	31409	14,00
	Ziegelschutt mit max. 30% Feinanteile (Putz, Mörtel)	31409	16,00
	Ziegelschutt unsortiert, Bau- schutt, recyclingfähig	31409	35,00
	Straßenaufbruch, sortenrein	31410	17,50
	Beton sortenrein, unbewehrt, max. 40x40 cm Kantenlänge	31427	13,50
	Beton bewehrt, sortenrein	31427	15,00
	Beton unsortiert, verunreinigt	31427	23,00
Anlage 4	Ziegel / Betongemisch 50/50	31409	30,00
	Ziegelschutt, Hochbauabbruch	31409	30,00
	Altschotter, Straßenunterbau	31410	12,65
	Asphalt-Beton-Schotterge- misch	31410	12,65
	Betonaufbruch, kleinschollig, unbewehrt	31427	3,50
	Betonaufbruch bis 70x70 cm, bewehrt	31427	5,00
	Betonaufbruch über 70x70 cm, bewehrt	31427	10,00
	Betongroßteile (Fertigteile)	31427	24,15
	Betonaufbruch mit Aushub vermischt	31427	15,00
	Gleisschottermaterial	31467	12,65
	Asphaltaufbruch bis 70x70 cm	54912	10,00
	Asphaltaufbruch über 70x70 cm	54912	11,00

Die Abgabepreise steigen mit zunehmender Qualitätsklasse des Recycling-Baustoffes. Die Qualität ist im direkten Zusammenhang mit dem Aufbereitungsaufwand. Um hoch qualitative Recycling-Produkte herzustellen sind mehrere und aufwändigere Prozessschritte erforderlich. Somit steigen die Betriebskosten und die Lohnkosten, sofern eine händische

Sortierung stattfindet. Folgende Tabelle verschafft einen Überblick über die Abgabepreise der Recycling-Baustoffe in Wien und Umgebung.

Tabelle 4-2: Abgabepreise der Recycling-Produkte in Raum Wien

Aufbereitungsanlage:	Produkt:	Abgabepreis in €/t:
Anlage 1	RB S 0/32 U1 U-A	7,70
	RB S 0/63 U1 U-A	7,70
	RA I 0/32 U-A	3,30
	RG S 0/32 U1 U-A E-Kü	3,30
	RM I 0/32 U1 U-A	3,30
	RM I 0/63 U1 U-A	3,30
	RS III 0/4 U-A	4,40
Anlage 2	RB I 0/63 U3 U-A	12,50
	RM I 0/32 U3 U-A	10,00
Anlage 3	RB S 0/32 U1 U-A	12,50
	RB S 0/63 U1 U-A	12,50
	RB I 32/63 U3 U-A	12,50
	RZ 2/8 mm Mineraldrän	38,50
	RZ 2/11mm Mineraldrän	38,50
	RZ 8/11mm Mineraldrän	38,50
	RZ 8/11mm Mineraldrän Sackware (25kg)	Pro Sack: 6,40
	RM 0/45 mm (auf Anfrage)	Auf Anfrage
	RM 0/63 mm (auf Anfrage)	Auf Anfrage
	RA 0/32 mm	12,00
Anlage 4	RB S 0/32 U1 U-A3/10	8,25
	RB S 0-45 U1 U-A	8,25
	RB S 0/63 U1 U-A	8,25
	RB II 22/63 U-A	8,25
	RA I 0-32 U-A	7,15
	RM I 0-32 U3 U-A	6,60
	RMH IV 0-63 U11 U-A	1,10
	RM III 0/63 U10 U-A	3,85
	RS III 0-4 U-A	4,95
	RM II 0-63 U6 U-A	6,05

Aus der Tabelle 4-2 ist ersichtlich, dass die Preise der rezyklierten Baustoffe starken Schwankungen unterliegen. Am günstigsten sind das gebrochene Mischgranulat aus Beton, Asphalt und natürlichem Gestein, sowie das gebrochene Asphaltgranulat. Diese Recycling-Baustoffe werden überwiegend für ungebundene obere und untere Tragschichten, sowie für gebundene Tragschichten und im landwirtschaftlichen Wegebau verwendet. Das teuerste Recycling-Produkt ist der rezyklierte Ziegelsplitt bzw. -sand. Die hohen Preise lassen sich mit einem sehr hohem Aufbereitungsaufwand erklären.

4.3 Kosten einer Aufbereitungsanlage

Im Rahmen der ersten Forschungsfrage dieser Arbeit wird versucht die wesentlichen Kosten, die während des Produktionsprozesses entstehen, zu identifizieren und quantifizieren. A. Coelho und J. de Brito, 2013 [30] definiert die folgenden Kosten einer Aufbereitungsanlage:

- Anschaffungskosten der Geräte
- Betriebskosten
 - * Energiekosten
 - * Instandhaltungskosten
 - * Lohnkosten
 - * Kosten für die Deponierung von für Aufbereitung nicht geeigneten Materialien
 - * Transportkosten
 - * Kreditkosten
 - * Andere Betriebskosten wie Versicherungs- und Administrationskosten etc.

Diese Arbeit beschränkt sich jedoch auf die einmaligen Anschaffungskosten und die monatlichen Betriebskosten. Kredit-, sowie Versicherungs- und Administrationskosten werden nicht berücksichtigt.

Es werden folgende Gerätekosten berücksichtigt:

- Einmalige Anschaffungskosten umgerechnet in die monatlichen Beträge
- Monatliche kalkulatorische Abschreibung und Verzinsung (A+V)
- Monatliche Reparaturkosten
- Monatliche Treibstoff- oder Energiekosten

Als Grundlage für die Kostenermittlung wird ÖNORM B 2061:2020-05 [33] herangezogen. Diese ÖNORM ist eine Verfahrensnorm, die die wesentlichen Regelungen zur Preisermittlung für Bauleistungen umfasst.

ÖNORM B 2061 definiert die einmaligen Kosten als solche, die nur einmalig bzw. innerhalb eines kurzen Zeitabschnitts anfallen. Die Anschaffung und Inbetriebsetzung der erforderlichen Gerätschaften lassen sich diesen Kosten zuordnen [33].

Zeitgebundene Kosten fallen laut ÖNORM B 2061 über längere Zeitabschnitte in annähernd gleichbleibender Höhe je Zeiteinheit [33].

4.3.1 Gerätekosten

Gerätekosten werden entsprechend den Regelungen der ÖNORM B 2061: Preisermittlung für Bauleistungen ermittelt. Grundlage für die Ermittlung der Gerätekosten bildet die österreichische Baugeräteliste in der Ausgabe vom Jahr 2020. Die in der ÖBGL 2020 definierten Werte stellen technische und wirtschaftliche Durchschnittswerte dar. Die Preisbasis ist das Jahr 2020. Weil die Anschaffungskosten jedoch zeitabhängig sind, muss die durchschnittliche Entwicklung der Anschaffungskosten berücksichtigt werden. Das erfolgt mittels eines Erzeugerpreisindex für die Maschinen in der Bauwirtschaft. Für das Jahr 2022 beträgt der Erzeugerpreisindex 108,7% [34].

Maßgebende Zeiteinheiten werden ebenfalls der ÖBGL entnommen [34]:

- 1 Monat = 21 Arbeitstage
- 1 Monat = 170 Arbeitsstunden

ÖNORM B 2061 definiert folgende Begriffe, die für Kostenermittlung im Rahmen dieser Arbeit relevant sind: Nutzungsdauer, Abschreibung, Kosten für Reparatur und Instandhaltung, Betriebsstoff.

„Nutzungsdauer ist in Jahren ausgedrückte Zeit, während der ein Baugerät bei einschichtigem Betrieb und durchschnittlicher Auslastung wirtschaftlich genutzt werden kann.“ [33]

In der ÖBGL 2020 wird die Nutzungsdauer in Nutzungsjahren ausgedrückt. Nutzungsjahre bilden die Grundlage für die Berechnung der Absetzung für Abnutzung (AfA) sowie für die Ermittlung der kalkulatorischen Verzinsung. Die Nutzungsdauer wird von den folgenden Faktoren beeinflusst [34]:

- Technische Überalterung
- Verschleiß
- Wartung und Pflege
- Reparaturen
- Witterungseinflüsse
- Gesetzliche Vorschriften
- Einsatzbedingungen

„Abschreibung ist Wertminderung der Betriebsmittel infolge Abnutzung oder technischer/rechtlicher Überalterung.“ [33]

Unter kalkulatorischer Abschreibung ist die Erfassung der Wertminderung der Geräte und ihre Verrechnung als Kosten zu verstehen. In der Baupraxis wird von einer linearen Entwicklung der kalkulatorischen Abschreibung ausgegangen. Der Ausgangswert für die Berechnung der kalkulatorischen Abschreibung ist der mittlere Neuwert. Unter Berücksichtigung der Vorhaltemonate ergibt sich der monatliche Anteil für Abschreibung. Dieser wird in Prozent vom mittlerem Neuwert angegeben [34].

$$a = \frac{100}{v(2a)}$$

- a durchschnittliche monatliche Abschreibung in Prozent vom mittleren Neuwert [%]
- v Vorhaltemonate [Monat]

Vorhaltemonate sind als die durchschnittliche Einsatzdauer eines Gerätes zu verstehen. Die Einsatzdauer ergibt sich nach dem Abzug der Zeiten, in denen das Gerät nicht genutzt wird, von der Nutzungsdauer. Die Vorhaltemonate sind in der Baupraxis ermittelte Erfahrungswerte. Sie gelten unter der Voraussetzung einer mittelschweren Belastung, bei einschichtiger Arbeitszeit und einer sach- und fachgemäßen Wartung und Pflege sowie rechtzeitiger Ausführung von erforderlichen Reparaturen [34].

Unter kalkulatorischer Verzinsung ist die rechnerische Verzinsung jenes Kapitals zu verstehen, welches in den jeweiligen kalkulatorisch noch nicht abgeschriebenen Restwerten der Geräte gebunden ist. In Abhängigkeit von den Nutzungsjahren, Vorhaltemonaten und kalkulatorischem Zinssatz ergibt sich der durchschnittliche Anteil der monatlichen Verzinsung. Dieser wird in Prozent vom mittleren Neuwert ausgedrückt [34].

$$z = \frac{p * n}{2 * v}$$

- z durchschnittliche monatliche Verzinsung in Prozent vom mittleren Neuwert [%]
- p kalkulatorischer Zinssatz [%];
In BGL 2020 mit 6,5 % pro Jahr festgelegt
- n Nutzungsjahre [Jahr]

Im Rahmen der Berechnung werden die monatlichen Kosten für Abschreibung und Verzinsung zusammen betrachtet, wobei die Daten aus der ÖGBl übernommen werden. Somit ergibt sich der monatlicher Abschreibungs- und Verzinsungssatz, der entweder im Prozentsatz vom Neuwert oder als fixer Betrag angegeben werden kann [34].

$$k = a + z = \frac{100}{v} + \frac{p * n}{2 * v}$$

$$K = \frac{k}{100} * M$$

- K Monatlicher Abschreibungs- und Verzinsungssatz [€]
- k monatlicher Abschreibungs- und Verzinsungssatz in Prozent vom mittleren Neuwert [%]
- M Mittlerer Neuwert der BGL 2020 [€]

In der Tabelle 5 der ÖBGL 2020 werden die in der Baupraxis übliche Werte für k in Abhängigkeit von der Nutzungsdauer und Vorhaltemonaten angegeben.

„Kosten für Reparatur- und Instandhaltung sind Kosten, die aufgewendet werden müssen, um die Einsatzfähigkeit eines Baugerätes zu erhalten oder wiederherzustellen.“ [33]

Die Reparaturkosten sind ein wesentlicher Bestandteil der Gesamtgerätekosten. Sie sind bedingt durch die hohe Beanspruchung im Baubetrieb, den häufigen Wechsel des Einsatzortes, den fehlenden Schutz gegen Witterungseinflüsse in allen Jahreszeiten und den Wechsel des Bedienungs- und Wartungspersonals. Es wird zwischen folgenden Maßnahmen unterschieden [34]:

- Instandhaltung: Diese umfasst die laufenden Reparaturen während der Vorhaltezeit, um das Gerät auf der Baustelle einsatzbereit zu erhalten
- Instandsetzung: Diese umfasst alle Reparaturen außerhalb der Vorhaltezeiten, um das Gerät für einen neuen Baustelleneinsatz in den bestmöglichen Betriebszustand und die volle Leistungsfähigkeit zu versetzen.

Mit zunehmender Einsatzdauer nehmen auch die tatsächlichen Reparaturkosten zu. Vereinfacht werden die Reparaturkosten nach der ÖBGL über die gesamte Nutzungsdauer als konstant angegeben. Die monatlichen Beträge hängen vom monatlichen Satz für Reparaturkosten und vom mittleren Neuwert ab. Die Werte sind bezogen auf einen Vorhaltemonat [34].

$$R = \frac{r}{100} * M$$

- R monatlicher Reparaturkostenbetrag [€/Monat]
- r monatlicher Satz für Reparaturkosten in Prozent vom mittleren Neuwert
- M Mittlerer Neuwert der BGL 2020 [€]

Folgende Kosten sind im monatlichen Satz für Reparaturkosten nicht berücksichtigt [34]:

- Wartung und Pflege (z. B. Abschmieren, Ölwechsel, Filterwechsel),
- Überprüfungen (bspw. periodisch Überprüfungen der Maschinensicherheit),
- Einstellarbeiten und Nachregulierungen sowie die dazugehörigen Materialkosten,
- Beseitigen von Verschmutzungen durch Baustoffe und Boden,
- Beseitigung von Gewaltschäden und
- Ersatz von Verschleißteilen, die bei der jeweiligen Geräteart unter „Verschleißteile“ aufgeführt sind.

„Betriebsstoff ist Material, das zum Betrieb und zur Wartung der für die Erbringung der Leistung eingesetzten Geräte, Anlagen und sonstigen Betriebsmittel benötigt wird.“ [33]

Die Mehrheit der berücksichtigten Geräte verbraucht den elektrischen Strom. Die Ausnahmen sind Hydraulikbagger, sowie Laderaupe, die dieselbetrieben werden. In diesem Fall wird vom folgenden Zusammenhang ausgegangen: 0,10 – 0,15 l / kW h [35].

4.4 Prozesskette

Die Prozesskette beginnt wie im Kapitel 4.1 beschrieben mit der Annahme der Bau- und Abbruchabfälle. Hier wird eine Fahrzeugwaage benötigt. In der ÖGBL sind mehrere Varianten der Fahrzeugwaage zu finden. Die primäre Kenngröße ist die Nenn-Brückenlänge in Meter. Unter Nenn-Brückenlänge ist die Länge der Fahrzeugwaage zu verstehen. In Abhängigkeit von der Brückenlänge unterscheidet sich der Wiegebereich, sowie das Gewicht der Waage selbst. Der gemittelte Neuwert ist ebenfalls von der erwähnten primären Kenngröße abhängig. Die Prozentsätze für monatliche Abschreibung und Verzinsung, sowie für Reparaturkosten sind unabhängig von den genannten Gerätegrößen. Der monatliche Satz für die Abschreibung und Verzinsung liegt bei 3,7% des mittleren Neuwertes, während der monatliche Satz für Reparaturkosten 1,8% des mittleren Neuwertes beträgt. Die Nutzungsdauer einer umsetzbaren Fahrzeugwaage liegt bei 20 Jahren. Für die weitere Berechnung wird der Geräteschlüssel A.90.00.0012 angenommen. Mit einer Nenn-Brückenlänge von 12 m und einem Wiegebereich zwischen 40 und 50 Tonnen ist diese Waage geeignet für die üblich eingesetzten Drei- und Vierachsen-LKW. Sämtliche Gerätegrößen sind der folgenden Tabelle zu entnehmen.

Tabelle 4-3: Gerätegrößen für A.9.00.0012 Fahrzeugwaage, umsetzbar [34]

Geräteschlüssel	Nenn-Brückenlänge in m	Wiege Bereich in t	Brückenbreite in m	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.90.00.0012	12	40-50	3	14.000	46.300,00	1.710,00	835,00

Die gelieferten groben Bau- und Abbruchabfälle müssen vor der Zuführung zur Aufgabeneinheit zerkleinert werden. Dies erfolgt mittels eines Hydraulikbaggers auf dem Raupenfahrwerk. Die Nutzungsdauer eines solchen Baggers beträgt 7 Jahre. Der monatliche Satz für Abschreibung und Verzinsung beträgt 2% des mittleren Neuwertes und für die Reparaturkosten beträgt dieser 1,6% des mittleren Neuwertes. Die primäre Kenngröße ist die Motorleistung in kW. Der Hydraulikbagger wird dieselbetrieben. Für die Analyse wird ein herkömmlicher Bagger mit der Motorleistung von 80 kW herangezogen. Geräteschlüssel der ÖGBL ist D.1.03.0080. Für die Zerkleinerung von Beton ist ein Betonknacker anzusetzen und den Kosten für den Hydraulikbagger dazu zu rechnen. Die monatlichen

Prozentsätze sind analog den Sätzen für den Hydraulikbagger. Der ausgewählte Betonknacker hat den Geräteschlüssel D.1.85.1750.

Tabelle 4-4: Gerätegrößen für D.1.03.0080 Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk 36-150 kW [34]

Geräteschlüssel	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
D.1.03.0080	80	17.000	157.500,00	3.150,00	2.520,00

Tabelle 4-5: Gerätegrößen für D.1.85.1750 Betonknacker, Betonbeißer [34]

Geräteschlüssel	Gewicht Arbeitstool in kg	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
D.1.85.1750	1.750	1.750	41.300,00	825,00	660,00

Für die Beschickung des Vibrationsaufgebers wird eine Laderaupe benötigt. Sie ist für eine Nutzungsdauer von 4 Jahren vorgesehen. 3,2% des mittleren Neuwertes beträgt der monatliche Satz für die Abschreibung und Verzinsung. Auf die Reparaturkosten entfällt auf monatlicher Basis 2,7% des mittleren Neuwertes. Die primäre Kenngröße ist die Motorleistung in kW. Für die weitere Berechnung wird eine Laderaupe mit Motorleistung von 110 kW herangezogen. Dementsprechend lautet der Geräteschlüssel D.3.00.0110.

Tabelle 4-6: Gerätegrößen für D.3.00.0110 Frontlader auf Raupen (Laderaupe) [34]

Geräteschlüssel	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
D.3.00.0110	110	17.000	256.500,00	8.200,00	6.950,00

Die nächste Anlage in der Prozesskette ist ein Vibrationsaufgeber. Der Vibrationsaufgeber hat eine Nutzungsdauer von 6 Jahren. Auf monatlicher Basis beträgt der Prozentsatz für Abschreibung und Verzinsung 2,7% des mittleren Neuwertes. Reparaturkosten liegen bei 1,8% des mittleren Neuwertes. ÖBGL definiert die Breite in mm als primäre Kenngröße. Wesentliche Rolle für die weitere Anlagenkonfiguration spielt der Massendurchsatz. Dieser muss an den Durchsatz der nachgeschalteten Brecheranlage angepasst werden. Weil in Rahmen dieser Arbeit mehrere Anlagenkonfigurationen analysiert werden, sind in der Tabelle 4-7 mehrere Varianten des Vibrationsaufgeber samt dazugehörigen Gerätegrößen zu finden.

Tabelle 4-7: Gerätegrößen für A.0.10.1000 und A.0.10.1500 Vibrationsaufgeber [34]

Geräteschlüssel	Breite in mm	Länge in mm	Massendurchsatz in t/h	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.0.10.1000	1000	6,5	250-350	13.200	121.000,00	3.270,00	2.180,00

A.0.10.1500	1500	6,5	420-600	15.000	137.500,00	3.710,00	2.480,00
-------------	------	-----	---------	--------	------------	----------	----------

Um die Aufgabe der Vorabsiebung zu erfüllen, werden Rollenroste zwischen dem Vibrationsaufgeber und dem Backenbrecher angeordnet. Gleichzeitig zur Vorabsiebung fördern sie das zu brechende Gut zu dem Vorbrecher. Die Rollenroste werden für eine Nutzungsdauer von 6 Jahren ausgelegt. Monatliche Prozentsätze betragen 2,7% des mittleren Neuwertes für die Abschreibung und Verzinsung, sowie 1,8% für Reparaturkosten. Die primäre Kenngröße ist die maximale Aufgabenleistung in t/h. In der ÖBGL werden die maximalen Aufgabenleistungen zwischen 600 und 700 Tonnen pro Stunde erfasst. Für weitere Berechnungen wird der Vibrationsaufgeber mit der Kapazität von 600 t/h herangezogen. Somit ergeben sich gemäß der ÖBGL folgende Gerätegrößen für den Geräteschlüssel A.2.14.0600:

Tabelle 4-8: Gerätegrößen für A.2.14.0600 Rollenrost [34]

Geräteschlüssel	Max. Aufgabenleistung in t/h	Rostbreite in mm	Rostlänge in mm	Rollenachsen in Stück	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.2.14.0600	600	1250	2400	6	11	9.450	111.000,00	2.990,00	2.000,00

Als Vorbrecher wird ein Einschwingen-Backenbrecher eingesetzt. Die Nutzungsdauer eines Backenbrechers liegt gemäß ÖGBNL bei 7 Jahren. Verschleißteile, deren Nutzungsdauer in der Praxis kürzer sind, sind sowohl feste als auch bewegliche Backe. Auf die Abschreibung und Verzinsung entfällt monatlich 2% des mittleren Neuwertes. Auf die Reparaturkosten entfällt 1,3% des Neuwertes. Die primäre Kenngröße eines Backenbrechers ist die Maulbreite in mm. Für diese Arbeit ist der Massendurchsatz interessant und wird als Entscheidungskriterium herangezogen. Es werden drei Fälle betrachtet. In der Tabelle 4-9 sind die relevanten Gerätegrößen für verschiedenen Geräteschlüssel angegeben.

Tabelle 4-9: Gerätegrößen für A.1.00.0080/0090/1300 Einschwingen Backenbrecher [34]

Geräteschlüssel	Maulbreite in mm	Maultiefe in mm	Massendurchsatz in t/h	Leistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.1.00.0080	800	600	115-160	55	9.900	103.000,00	2.060,00	1.340,00
A.1.00.0090	900	700	125-200	75	13.200	123.000,00	2.460,00	1.600,00
A.1.00.1300	1300	1200	440-575	160	41.500	309.000,00	6.200,00	4.020,00

Dem Backenbrecher ist ein Förderband nachgeschaltet. Dieses fördert das gebrochene Gut zum Nachbrecher und ermöglicht eine Aussortierung der Metalle mit Hilfe eines

darüber angeordneten Magnetabscheiders. Die Nutzungsdauer eines Förderbandes liegt bei 7 Jahren. Die monatlichen Prozentsätze sind 2,2% für Abschreibung und Verzinsung, sowie 1,4% für Reparaturkosten. Die Prozentsätze beziehen sich immer auf den mittleren Neuwert. Die Gurtbreite in mm ist die primäre Kenngröße für stationäre Förderbänder nach der ÖBGL. Die Gurtbreite wird immer so gewählt, dass es im Einklang mit der Maulbreite des Backenbrechers ist. Die Geräteschlüssel nach der ÖBGL samt Gerätegrößen sind in der nachfolgenden Tabelle 4-10 angegeben.

Tabelle 4-10: Gerätegrößen für A.5.12.0825/1025/1225, Förderband stationär [34]

Geräteschlüssel	Gurtbreite in mm	Achsabstand in mm	Massenstrom in t/h	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.5.12.0825	800	25	450	15	6.200	43.700,00	960,00	610,00
A.5.12.1025	1000	25	720	22	7.100	50.900,00	1.120,00	710,00
A.5.12.1225	1200	25	825	30	8.600	50.000,00	1.100,00	700,00

Die ÖBGL gibt keinen mittleren Neuwert für den Magnetabscheider für Metalle an. Dieser ergibt sich aus einer Marktrecherche. Der Neuwert liegt zwischen 13.000 und 26.000 €. Für die weitere Berechnung wird ein Mittelwert von 19.500 € angenommen. Die Recherche zeigt ebenfalls, dass die durchschnittliche Leistung eines Magnetabscheiders bei 5,5 kW liegt. Die ÖBGL definiert jedoch die monatlichen Prozentsätze, und zwar 3,2% des mittleren Neuwertes für Abschreibung und Verzinsung, sowie 1,1% für Reparaturkosten. Diese Prozentsätze angewandt auf den angenommenen Neuwert ergeben die in der Tabelle 4-11 angeführten monatliche Kosten. Die ÖBGL geht von einer achtjährigen Nutzungsdauer aus.

Tabelle 4-11: Kosten eines Magnetabscheiders

Mittlerer Neuwert	Monatliche Abschreibung und Verzinsung	Monatliche Reparaturkosten
19.500,00	624,00	214,50

Als Zwischensieb wird ein Zweidecker-Sieb angeordnet. Die vorgesehene Nutzungsdauer beträgt 6 Jahre. Die Verschleißteile sind Siebbespannung und Siebgewebe. 2,7% des mittleren Neuwertes beträgt der monatliche Satz für die Abschreibung und Verzinsung. Auf die Reparaturkosten entfällt auf monatlicher Basis 1,8% des mittleren Neuwertes. Die primäre Kenngröße ist die Siebfläche in m². Relevant für diese Arbeit ist jedoch die Durchsatzleistung in t/h. Diese ist nicht explizit in der ÖBGL angegeben und wird aus den Erfahrungswerten und in Abhängigkeit von der Siebfläche ermittelt. Die Recherche hat gezeigt, dass ein Zweidecker-Sieb mit der Siebfläche von rund 7 m² bis zu 350 t/h

aufbereiten kann. Ein Zweidecker-Sieb mit einer Siebfläche von ca. 10 m² bereitet bis zu 500 t/h auf.

Tabelle 4-12: Gerätegrößen für A.2.03.0720 und A.2.03.1000 Zweidecker-Schwingsieb Normalausführung N [34]

Geräteschlüssel	Siebfläche in m ²	Siebbreite in mm	Sieblänge in mm	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.2.03.0720	7,20	1,80	4,00	11	3.600	42.300,00	1.140,00	760,00
A.2.03.1000	10,00	2,00	5,00	18,5	5.700	55.500,00	1.500,00	1.000,00

Durch die Zwischensiebung wird rund 20% des Brechgutes abgetrennt und die restlichen 80% dem Nachbrecher zugeführt [31]. Diese sekundäre Zerkleinerung erfolgt mittels einem Prallbrecher mit horizontalem Rotor. Die ÖBGL geht von einer achtjährigen Nutzungsdauer aus. Folgende Verschleißteile können definiert werden: Schleißplatten, Schlagleisten und Prallplatten. Die monatlichen Kosten für Ausschreibung und Verzinsung liegen bei 2,8% des mittleren Neuwertes. 1,8% des mittleren Neuwertes entfällt auf die Reparaturkosten. Die primäre Kenngröße ist die Rotorbreite in mm. In dieser Arbeit spielt jedoch der Massendurchsatz eine wesentliche Rolle und dient deshalb als Entscheidungskriterium für das konkrete Gerät. Der Massendurchsatz wird so ausgelegt, dass der Prallbrecher ca. 80% des Outputs des Backenbrechers aufbereiten kann [31]. Somit ergeben sich drei für diese Arbeit relevante Geräteschlüssel und dazugehörige Gerätegrößen. Diese werden in der Tabelle 4-13 angeführt.

Tabelle 4-13: Gerätegrößen für A.1.03.1000/1340/1600 Prallbrecher mit horizontalem Rotor [34]

Geräteschlüssel	Rotorbreite in mm	Rotordurchmesser in mm	Massendurchsatz in t/h	Leistungsbedarf in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.1.03.1000	1.000	1.000	80	90	8.000	68.100,00	1.910,00	1.230,00
A.1.03.1340	1.340	1.340	160	132	17.600	129.500,00	3.630,00	2.330,00
A.1.03.1600	1.600	1.500	400	250	40.500	340.500,00	9.550,00	6.150,00

Nach der zweiten Zerkleinerungsstufe wird das gebrochene Gut mittels eines Förderbandes weiter transportiert. Über dem Förderband wird ein weiterer Magnetabscheider angeordnet, um den Rest der metallischen Stoffe abzutrennen. Die Kosten des für einen Förderband sind der Tabelle 4-10 zu entnehmen. Tabelle 4-11 gibt die Kosten für einen Magnetabscheider an.

Die nächste Anlage, die das gebrochene Gut durchläuft, ist ein Dreidecker-Schwingsieb. Dieses übernimmt die Rolle eines Produktsiebes und klassiert die einzelnen Fraktionen.

Sechs Jahre ist die übliche Nutzungsdauer laut ÖBGL. Auf die Abschreibung und Verzinsung entfällt monatlich 2,7% des mittleren Neuwertes. Für die Reparaturkosten beträgt dieser Prozentsatz 1,8% des mittleren Neuwertes. Die Siebfläche in m² ist die primäre Kenngröße. Sie ist im direkten Zusammenhang mit der Aufgabelistung, die leider in der ÖBGL nicht explizit angeführt wird. Recherche der am Markt vertretenen Geräte hat gezeigt, dass eine Siebfläche von 7 m² eine Durchsatzleistung von ca. 350 t/h gewährleistet und eine Siebfläche von 10 m² eine Durchsatzleistung von ca. 500 t/h.

Tabelle 4-14: Gerätegrößen für A.2.06.0070 und A.2.06.1000 Dreidecker-Schwingsieb Normalausführung N [34]

Geräteschlüssel	Siebfläche in m ²	Siebbreite in mm	Sieblänge in mm	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.2.06.0700	7	1,55	4,50	15	3.500	52.400,00	1.410,00	945,00
A.2.06.1000	10	2,05	5,00	22	6.300	78.400,00	2.120,00	1.410,00

Die letzte Anlage in der Prozesskette ist ein Windsichter, der die leichten Störstoffe ausscheidet und die Recycling-Baustoffe in die bestimmten Klassen auftrennt. Die Nutzungsdauer wird mit 7 Jahren definiert. 1,7% des mittleren Neuwertes betragen die monatlichen Kosten für Reparatur und Verzinsung. Reparaturkosten betragen 1,8% des mittleren Neuwertes. ÖBGL gibt den Durchmesser in mm als die primäre Kenngröße an. Für diese Arbeit ist jedoch der Massendurchsatz in t/h relevant. Das ausgewählte Gerät hat einen Durchsatz von 72 t/h.

Tabelle 4-15: Gerätegrößen für A.2.10.3500 Windsichter [34]

Geräteschlüssel	Durchmesser in mm	Massendurchsatz in t/h	Motorleistung in kW	Gewicht kg	Mittlerer Neuwert €	Monatliche A+V	Monatliche Reparatur
A.2.10.3500	3500	72	37	11.200	236.500,00	6.400,00	4.260,00

5 Ergebnisse und Diskussion

Wie im Kapitel 4.3.1 erläutert, beträgt die monatliche Arbeitszeit 170 Stunden. Dieser Wert dient einerseits als Grundlage für die Ermittlung des monatlichen Betriebsstoffverbrauchs. Andererseits werden ausgehend von diesem Wert die monatlichen Anlagen-durchsätze berechnet.

Bis auf Hydraulikbagger und Laderaupe werden alle Anlagen strombetrieben. Diese zwei Ausnahmen werden dieselbetrieben. Für die Berechnung des Treibstoffverbrauchs in Liter wird von folgendem Zusammenhang Nutzen gemacht: 0,10 bis 0,15 L/kWh. Weiters wird angenommen, dass die Kosten für benötigte Schmierstoffe rund 5 bis 10% der Treibstoffkosten betragen [35].

Der angenommene Dieselpreis beträgt 1,64 €/L. Dieser Wert ergibt sich als Mittelwert der Dieselpreise im Jahr 2023 an insgesamt 52 Stichtagen. Die Dieselpreise an Stichtagen wurden von Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie veröffentlicht [36].

Der durchschnittliche Strompreis für Industriekunden im Jahr 2023 lag laut der Datenbank Statista bei 25,54 ct [37].

Für die Fahrzeugwaage sowie den Betonknacker fallen keine Betriebsstoffkosten an. Vereinfacht wird von einer zehnjährigen Nutzungsdauer der Aufbereitungsanlage ausgegangen. Diese Nutzungsdauer dient als Basis für die Berechnung der monatlichen Beträge der Anschaffungskosten.

Es werden drei Fallbeispiele mit unterschiedlichen Durchsätzen für die technisch-wirtschaftliche Analyse herangezogen. Für alle drei Fallbeispiele werden jeweils zwei Szenarien betrachtet:

- 1) Szenario 1, in welchem die Siebung mehrmals innerhalb der Prozesskette angeordnet wird (siehe Abb. 4-1). Somit werden getrennte Fraktionen des Recycling-Betongranulats erhalten, welche zur Herstellung von Recycling-Beton geeignet sind. Diese Fraktionen sind: 0-4, 4-8, 8-16, 16-32.
- 2) Szenario 2, in welchem auf mehrmalige Siebung verzichtet wird (siehe Abb. 4-2). Somit wird ein Recycling-Betongranulat 0-16 erhalten.

5.1 Fallbeispiel 1 mit jährlichem Durchsatz von 200.000 t

Zuerst wird eine stationäre Anlage betrachtet, die einen jährlichen Output von rund 200.000 Tonnen verzeichnet. Genau ab diesem Wert ist eine stationäre Aufbereitungsanlage wirtschaftlicher als eine mobile Anlage [20]. Unter Berücksichtigung der monatlichen Arbeitszeit von 170 Stunden, ergibt sich ein stündlicher Durchsatz von ca. 100 t/h.

5.1.1 Szenario 1

Anschaffungskosten

Die Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 1 setzen sich aus den im Kapitel 4.4 angegebenen Anschaffungskosten der einzelnen Geräte zusammen. Im Sinne der Übersichtlichkeit werden die Werte in der Tabelle 5-1 zusammengefasst.

Tabelle 5-1: Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 1

Gerät	Geräteschlüssel aus der ÖBGL	Mittlerer Neuwert in €
Fahrzeugwaage	A.90.00.0012	46.300,00
Hydraulikbagger	D.1.03.0080	157.500,00
Betonknacker	D.1.85.1750	41.300,00
Laderaupe	D.3.00.0110	256.500,00
Vibrationsaufgeber	A.0.10.1000	121.000,00
Rollenrost	A.2.14.0600	111.000,00
Backenbrecher	A.1.00.0800	103.000,00
Förderband 1	A.5.12.0825	43.700,00
Magnetabscheider 1	-	19.500,00
Zweidecker-Sieb	A.2.03.0720	42.300,00
Prallbrecher	A.1.03.1000	68.100,00
Förderband 2	A.5.12.0825	43.700,00
Magnetabscheider 2	-	19.500,00
Dreidecker-Sieb	A.2.06.0700	52.400,00
Windsichter	A.2.10.3500	236.500,00

Die einmaligen Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 1 ergeben sich durch die Aufsummierung der in Tabelle 5-1 angegebenen mittleren Neuwerte. Unter Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von 10 Jahren ergeben sich jährliche Beträge zu 10% der einmaligen Anschaffungskosten. Der monatliche Anteil der Anschaffungskosten ergibt sich durch weitere Division der jährlichen Beträge durch den Faktor 12. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-2 dargestellt.

Tabelle 5-2: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 1

Einmalige Anschaffungskosten [€]	1.362.300,00
Jährliche Beträge [€]	136.230,00
Monatliche Beträge [€]	11.352,50

Monatliche Betriebskosten

Diese setzen sich aus den monatlichen Kosten für Abschreibung und Verzinsung, Reparaturkosten, sowie Betriebsstoffkosten zusammen. Tabelle 5-3 gibt einen Überblick über die eingesetzten Geräte und dazugehörige Kosten.

Tabelle 5-3: Betriebskosten für das Fallbeispiel 1

Gerät	Geräteschlüssel aus der ÖBGL	Leistung in kW	Monatliche A+V in €	Monatliche Reparaturkosten in €	Monatlicher Energieverbrauch in kWh*	Monatliche Betriebsstoffkosten in €
Fahrzeugwaage	A.90.00.0012	-	1.710,00	835,00	-	-
Hydraulikbagger	D.1.03.0080	80,00	3.150,00	2.520,00	13.600,00	2.230,40
	<i>Anmerkung: dieselbetrieben: 0,10 L/kWh → *Verbrauch in L:</i>				1.360,00	
Betonknacker	D.1.85.1750	-	825,00	660,00	-	-
Laderraupe	D.3.00.0110	110,00	8.200,00	6.950,00	18.700,00	3.066,80
	<i>Anmerkung: dieselbetrieben: 0,10 L/kWh → *Verbrauch in L:</i>				1.870,00	
Vibrationsaufgeber	A.0.10.1000	30,00	3.270,00	2.180,00	5.100,00	1.300,50
Rollenrost	A.2.14.0600	11,00	2.990,00	2.000,00	1.870,00	476,85
Backenbrecher	A.1.00.0800	55,00	2.060,00	1.340,00	9.350,00	2.384,25
Förderband 1	A.5.12.0825	15,00	960,00	610,00	2.550,00	650,25
Magnetabscheider 1	-	5,50	624,00	214,50	935,00	238,43
Zweidecker-Sieb	A.2.03.0720	11,00	1.140,00	760,00	1.870,00	476,85
Prallbrecher	A.1.03.1000	90,00	1.910,00	1.230,00	15.300,00	3.901,50
Förderband 2	A.5.12.0825	15,00	960,00	610,00	2.550,00	650,25
Magnetabscheider 2	-	5,50	624,00	214,50	935,00	238,43
Dreidecker-Sieb	A.2.06.0700	15,00	1.410,00	945,00	2.550,00	650,25
Windsichter	A.2.10.3500	37,00	6.400,00	4.260,00	6.290,00	1.603,95

Die dieselbetriebenen Geräte, das heißt der Hydraulikbagger und die Laderraupe verbrauchen in Monat 3.230 Liter Diesel. Wird der Treibstoffverbrauch mit dem in Kapitel 0 angegebenen Dieselpreis von 1,64 €/L multipliziert, ergeben sich monatliche

Treibstoffkosten zu 5.297,20 €. Die Kosten der benötigten Schmierstoffe betragen 5% der Treibstoffkosten. Die gesamten Betriebsstoffkosten für beide Geräte betragen somit 5.562,06 €.

Alle Geräte von Vibrationsaufgeber bis Windsichter werden strombetrieben. Der gesamte Stromverbrauch liegt für das Fallbeispiel 1 bei 49.300 kWh pro Monat. Unter Berücksichtigung eines Strompreises von 25,54 ct ergibt das 12.571,50 € pro Monat.

Monatliche Betriebskosten ergeben sich aus der Aufsummierung der in Tabelle 5-3 angegebenen Kosten für Abschreibung und Verzinsung, der Reparaturkosten und der Betriebsstoffkosten der einzelnen Geräte. In der folgenden Tabelle werden die Ergebnisse zusammengefasst.

Tabelle 5-4: Monatliche Betriebskosten für das Fallbeispiel 1

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	36.233,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	25.329,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	18.133,56
Monatliche Betriebskosten [€]	79.695,56

Die Summe der monatlichen Beträge der Anschaffungskosten und den monatlichen Betriebskosten ergeben die monatlichen Gesamtkosten für das Fallbeispiel 1. Die Ergebnisse sind der Tabelle 5-5 zu entnehmen.

Tabelle 5-5: Monatliche Gesamtkosten für das Fallbeispiel 1

Monatlicher Anteil der Anschaffungskosten [€]	11.352,50
Monatliche Betriebskosten [€]	79.695,56
Monatliche Gesamtkosten [€]	91.048,06

Umrechnung des Stundendurchsatzes auf monatliche Basis ergibt einen Durchsatz von 17.000 t/Mo. Werden die monatlichen Gesamtkosten durch diesen Wert dividiert, ergeben sich Gerätekosten bezogen auf die Produktionseinheit. Diese betragen für das erste Fallbeispiel 5,36 €/t.

5.1.2 Szenario 2

Wie im Kapitel 4.1 beschrieben, wird im Szenario 2 auf die mehrmalige Siebung verzichtet. Das heißt, dass 2- und 3-Decker Sieb, sowie Windsichter aus der Prozesskette herausgenommen werden. Das bedeutet einerseits die Reduktion der Anschaffungskosten, andererseits die Reduktion des monatlichen Energieverbrauchs und demzufolge der monatlichen Betriebsstoffkosten.

Anschaffungskosten

Ausgehend von den in Tabelle 5-1 angeführten mittleren Neuwerte ergibt sich folgende Verringerung der einmaligen Anschaffungskosten:

Tabelle 5-6: Differenz der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1

Einmalige Anschaffungskosten [€]	-331.200,00
Jährliche Beträge [€]	-33.120,00
Monatliche Beträge [€]	-2.760,00

Für das Szenario 2 ergeben sich unter Berücksichtigung der in Tabelle 5-2 angegebenen Anschaffungskosten und der in Tabelle 5-6 angegebenen Kostendifferenz folgende Werte für das Szenario 2:

Tabelle 5-7: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1

	Szenario 1	Kostendifferenz	Szenario 2
Einmalige Anschaffungskosten [€]	1.362.300,00	-331.200,00	1.031.100,00
Jährliche Beträge [€]	136.230,00	-33.120,00	103.110,00
Monatliche Beträge [€]	11.352,50	-2.760,00	8.592,50

Monatliche Betriebskosten

Die einzelnen Kostenkategorien der oben genannten Geräte können der Tabelle 5-3 entnommen werden. In der Tabelle 5-8 werden die monatlichen Kosten für Abschreibung und Verzinsung, die Reparaturkosten sowie Betriebsstoffkosten für diese Geräte zusammengefasst und mit einem negativen Vorzeichen angegeben, um eine Kostenverminderung erkennbar zu machen.

Tabelle 5-8: Differenz der Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	-8.950,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	-5.965,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	-2.731,05
Monatliche Betriebskosten [€]	-17.646,05

Ausgehend von den Gerätekosten, die in der Tabelle 5-4 angegeben sind, und unter Berücksichtigung der Kostendifferenz in der Tabelle 5-8 ergeben sich folgende monatliche Betriebskosten für den vereinfachten Herstellungsprozess des Recycling-Betongranulats:

Tabelle 5-9: Monatliche Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1

	Szenario 1	Kostendifferenz	Szenario 2

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	36.233,00	-8.950,00	27.283,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	25.329,00	-5.965,00	19.364,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	18.133,56	-2.731,05	15.402,51
Monatliche Betriebskosten [€]	79.695,56	-17.646,05	62.049,51

Monatliche Gesamtkosten

Für das Szenario 2 ergeben sich die in Tabelle 5-10 angeführten monatlichen Gesamtkosten.

Tabelle 5-10: Monatliche Gesamtkosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1

Monatlicher Anteil der Anschaffungskosten [€]	8.592,50
Monatliche Betriebskosten [€]	62.049,51
Monatliche Gesamtkosten [€]	70.642,01

Der monatliche Output des Recycling-Betons bleibt unverändert und beträgt 17.000 Tonnen. Eine Umrechnung der monatlichen Gesamtkosten auf die Produktionseinheit ergibt die Produktionskosten von 4,16 €/t.

5.2 Fallbeispiel 2 mit jährlichem Durchsatz von 408.000 t

Typische Durchsätze der Bauschuttrecyclinganlagen betragen ca. 200 t/h [15]. Auf jährlicher Basis ergibt das einen Output von rund 408.000 Tonnen. Dieser Durchsatz wird als Fallbeispiel 2 für die technisch-wirtschaftliche Bewertung herangezogen.

5.2.1 Szenario 1

Anschaffungskosten

Auch hier werden die einzelnen Geräte mit entsprechenden Durchsätzen eingesetzt. Tabelle 5-11 gibt die mittleren Neuwerte der einzelnen Geräte an.

Tabelle 5-11: Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 2

Gerät	Geräteschlüssel aus der ÖBGL	Mittlerer Neuwert in €
Fahrzeugwaage	A.90.00.0012	46.300,00
Hydraulikbagger	D.1.03.0080	157.500,00
Betonknacker	D.1.85.1750	41.300,00
Laderaupe	D.3.00.0110	256.500,00
Vibrationsaufgeber	A.0.10.1000	121.000,00
Rollenrost	A.2.14.0600	111.000,00
Backenbrecher	A.1.00.0900	123.000,00
Förderband 1	A.5.12.1025	50.900,00
Magnetabscheider 1	-	19.500,00

Zweidecker-Sieb	A.2.03.0720	42.300,00
Prallbrecher	A.1.03.1340	129.500,00
Förderband 2	A.5.12.1025	50.900,00
Magnetabscheider 2	-	19.500,00
Dreidecker-Sieb	A.2.06.0700	52.400,00
Windsichter	A.2.10.3500	236.500,00

Die Summe der einzelnen mittleren Neuwerte der Geräte liefert die einmaligen Anschaffungskosten. Die jährlichen, sowie die monatlichen Anteile werden analog zu der im Kapitel 5.1.2 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt und in der Tabelle 5-12 zusammengefasst.

Tabelle 5-12: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 2

Einmalige Anschaffungskosten [€]	1.458.100,00
Jährliche Beträge [€]	145.810,00
Monatliche Beträge [€]	12.150,83

Monatliche Betriebskosten

Tabelle 5-13 verschafft einen Überblick über die eingesetzten Geräte und deren monatlichen Kosten.

Tabelle 5-13: Betriebskostenkosten für das Fallbeispiel 2

Gerät	Geräteschlüssel aus der ÖBGL	Leistung in kW	Monatliche A+V in €	Monatliche Reparaturkosten in €	Monatlicher Energieverbrauch in kWh*	Monatliche Betriebsstoffkosten in €
Fahrzeu- gwaage	A.90.00.0012	-	1.710,00	835,00	-	-
Hydrau- likbagger	D.1.03.0080	80,00	3.150,00	2.520,00	13.600,00	2.230,40
	<i>Anmerkung: dieselbetrieben: 0,10 L/kWh → *Verbrauch in L:</i>				1.360,00	
Betonkna- cker	D.1.85.1750	-	825,00	660,00	-	-
Lade- raupe	D.3.00.0110	110,00	8.200,00	6.950,00	18.700,00	3.066,80
	<i>Anmerkung: dieselbetrieben: 0,10 L/kWh → *Verbrauch in L:</i>				1.870,00	
Vibrati- onsaufge- ber	A.0.10.1000	30,00	3.270,00	2.180,00	5.100,00	1.300,50
Rollenrost	A.2.14.0600	11,00	2.990,00	2.000,00	1.870,00	476,85
Backen- brecher	A.1.00.0900	75,00	2.460,00	1.600,00	12.750,00	3.251,25

Förderband 1	A.5.12.1025	22,00	1.120,00	710,00	3.740,00	953,70
Magnetabscheider 1	-	5,50	624,00	214,50	935,00	238,43
Zweidecker-Sieb	A.2.03.0720	11,00	1.140,00	760,00	1.870,00	476,85
Prallbrecher	A.1.03.1340	132,00	3.630,00	2.330,00	22.440,00	5.722,20
Förderband 2	A.5.12.1025	22,00	1.120,00	710,00	3.740,00	953,70
Magnetabscheider 2	-	5,50	624,00	214,50	935,00	238,43
Dreidecker-Sieb	A.2.06.0700	15,00	1.410,00	945,00	2.550,00	650,25
Windsichter	A.2.10.3500	37,00	6.400,00	4.260,00	6.290,00	1.603,95

Der Dieserverbrauch des Hydraulikbaggers und der Laderaupe, sowie die dazugehörigen Treib- und Schmierstoffkosten werden analog dem Kapitel 5.1.1 ermittelt. Der Dieserverbrauch beträgt 3.230 Liter Diesel pro Monat. Die gesamten Betriebsstoffkosten für diese zwei Geräte betragen 5.562,06 €.

Der gesamte Stromverbrauch der strombetriebenen Geräte liegt für die Anlagenkonfiguration 2 bei 62.220 kWh pro Monat. Unter Berücksichtigung eines Strompreises von 25,54 ct ergibt das 15.866,10 € pro Monat.

Die monatlichen Gesamtkosten ergeben sich aus der Summe der in Tabelle 5-13 angegebenen Kosten für Abschreibung und Verzinsung, der Reparaturkosten und der Betriebsstoffkosten der einzelnen Geräte. Die Ergebnisse werden in der Tabelle 5-14 zusammengefasst.

Tabelle 5-14: Monatliche Betriebskosten für das Fallbeispiel 2

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	38.673,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	26.889,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	21.428,16
Monatliche Betriebskosten [€]	86.990,16

Monatliche Gesamtkosten

Die Addition der monatlichen Betriebskosten und des monatlichen Anteils der Anschaffungskosten ergibt die in Tabelle 5-15 angeführten monatlichen Gesamtkosten für das Fallbeispiel 2.

Tabelle 5-15: Monatliche Gesamtkosten für das Fallbeispiel 2

Monatlicher Anteil der Anschaffungskosten [€]	12.150,83
Monatliche Betriebskosten [€]	86.990,16
Monatliche Gesamtkosten [€]	99.140,99

Unter Berücksichtigung der monatlichen Arbeitszeit von 170 Stunden ergibt sich die monatliche Produktionsmenge von 34.000 Tonnen. Somit können Gesamtkosten von 2,92 €/t bezogen auf eine Tonne des Recycling-Produktes ermittelt werden.

5.2.2 Szenario 2

Analog zu der in Kapiteln 4.1 und 5.1.2 beschriebenen Vorgehensweise wird für das Fallbeispiel 2 im ersten Schritt die Kostendifferenz zufolge der Entfernung der 2- bzw. 3-Decker Siebs, sowie des Windsichters aus der Prozesskette ermittelt. Unter Berücksichtigung dieser Kostendifferenz werden die Gerätekosten erneut ermittelt.

Anschaffungskosten

Werden die 2- und 3-Decker Siebe, sowie Windsichter aus dem Prozessstrang ausgeschlossen, so ergibt sich eine Abnahme der Anschaffungskosten die in Tabelle 5-16 dargestellt wird.

Tabelle 5-16: Differenz der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2

Einmalige Anschaffungskosten [€]	-331.200,00
Jährliche Beträge [€]	-33.120,00
Monatliche Beträge [€]	-2.760,00

Werden die Beträge in Tabelle 5-17 den Anschaffungskosten aus der Tabelle 5-12 gegenübergestellt, so ergeben sich folgende monatliche Anteile der Anschaffungskosten:

Tabelle 5-17: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2

	Szenario 1	Kostendifferenz	Szenario 2
Einmalige Anschaffungskosten [€]	1.458.100,00	-331.200,00	1.126.900,00
Jährliche Beträge [€]	145.810,00	-33.120,00	112.690,00
Monatliche Beträge [€]	12.150,83	-2.760,00	9.390,83

Monatliche Betriebskosten

Die monatlichen Betriebskosten der oben angeführten Geräte werden in der Tabelle 5-13 angegeben. Das Summieren der Kosten für Abschreibung und Verzinsung, für Reparatur sowie der Betriebsstoffkosten ergibt folgende Kostenverringerung:

Tabelle 5-18: Differenz der Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	-8.950,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	-5.965,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	-2.731,05
Monatliche Gesamtkosten [€]	-17.646,05

Die in der Tabelle 5-18 angegebenen Kosten werden den monatlichen Gesamtkosten in der Tabelle 5-14 gegenübergestellt, um die reduzierten monatlichen Gesamtkosten zufolge der Verringerung des Aufbereitungsaufwands zu ermitteln. Die Ergebnisse für das Szenario 2 können der folgenden Tabelle entnommen werden:

Tabelle 5-19: Monatliche Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2

	Szenario 1	Kostendifferenz	Szenario 2
Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	38.673,00	-8.950,00	29.723,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	26.889,00	-5.965,00	20.924,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	21.428,16	-2.731,05	18.697,11
Monatliche Gesamtkosten [€]	86.990,16	-17.646,05	69.344,11

Monatliche Gesamtkosten

Die monatlichen Gesamtkosten ergeben sich wiederum als Summe des monatlichen Anteiles der Anschaffungskosten und der monatlichen Betriebskosten.

Tabelle 5-20: Monatliche Gesamtkosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2

Monatlicher Anteil der Anschaffungskosten [€]	9.390,83
Monatliche Betriebskosten [€]	69.344,11
Monatliche Gesamtkosten [€]	78.734,94

Die Umrechnung der monatlichen Gesamtkosten unter Berücksichtigung der monatlichen Herstellungsmenge von 34.000 Tonnen ergibt die monatlichen Kosten von 2,32 € pro hergestellte Tonne des rezyklierten Betongranulats.

5.3 Fallbeispiel 3 mit jährlichem Durchsatz von 1.000.000 t

In den stationären Aufbereitungsanlagen für Bau- und Abbruchabfälle sind jährliche Durchsätze bis zu 1.000.000 Tonnen realisierbar [15]. Deshalb wird dieser Durchsatz als

Grenzfall für die technisch-wirtschaftliche Analyse herangezogen. Unter Berücksichtigung der 170 monatlichen Arbeitsstunden, ergibt sich ein Durchsatz von rund 490 t/h.

5.3.1 Szenario 1

Anschaffungskosten

Tabelle 5-21 gibt einen Überblick über die eingesetzten Geräte und deren mittleren Neuwerte, die als Basis für die Ermittlung der einmaligen Anschaffungskosten dienen.

Tabelle 5-21: Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 3

Gerät	Geräteschlüssel aus der ÖBGL	Mittlerer Neuwert in €
Fahrzeugwaage	A.90.00.0012	46.300,00
Hydraulikbagger	D.1.03.0080	157.500,00
Betonknacker	D.1.85.1750	41.300,00
Laderaupe	D.3.00.0110	256.500,00
Vibrationsaufgeber	A.0.10.1500	137.500,00
Rollenrost	A.2.14.0600	111.000,00
Backenbrecher	A.1.00.1300	309.000,00
Förderband 1	A.5.12.1225	50.000,00
Magnetabscheider 1	-	19.500,00
Zweidecker-Sieb	A.2.03.1000	55.500,00
Prallbrecher	A.1.03.1600	340.500,00
Förderband 2	A.5.12.1225	50.000,00
Magnetabscheider 2	-	19.500,00
Dreidecker-Sieb	A.2.06.1000	78.400,00
Windsichter	A.2.10.3500	236.500,00

Die einmaligen Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 3 ergeben sich durch Aufsummierung der mittleren Neuwerte in der Tabelle 5-21. Die jährlichen Beträge der einmaligen Anschaffungskosten ergeben sich zu 10% unter Berücksichtigung einer Nutzungsdauer von 10 Jahren. Der monatliche Betrag der Anschaffungskosten ergibt sich durch die Division des jährlichen Betrages durch den Faktor 12. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 5-22 dargestellt.

Tabelle 5-22: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 3

Einmalige Anschaffungskosten [€]	1.909.000,00
Jährliche Beträge [€]	190.900,00
Monatliche Beträge [€]	15.908,33

Monatliche Betriebskosten

Die monatlichen Kosten für Abschreibung und Verzinsung, Reparaturkosten und Betriebsstoffkosten bilden die monatlichen Betriebskosten. Diese sind abhängig von den eingesetzten Geräten und deren Kenngrößen. Tabelle 5-23 gibt sowohl die Geräte für das Fallbeispiel 3 als auch deren Kenngrößen an.

Tabelle 5-23: Betriebskosten für das Fallbeispiel 3

Gerät	Geräteschlüssel aus der ÖBGL	Leistung in kW	Monatliche A+V in €	Monatliche Reparaturkosten in €	Monatlicher Energieverbrauch in kWh*	Monatliche Betriebsstoffkosten in €
Fahrzeugwaage	A.90.00.0012	-	1.710,00	835,00	-	-
Hydraulikbagger	D.1.03.0080	80,00	3.150,00	2.520,00	13.600,00	
	<i>Anmerkung: dieselbetrieben: 0,10 L/kWh → *Verbrauch in L:</i>				1.360,00	2.230,40
Betonknacker	D.1.85.1750	-	825,00	660,00	-	-
Ladearaupe	D.3.00.0110	110,00	8.200,00	6.950,00	18.700,00	
	<i>Anmerkung: dieselbetrieben: 0,10 L/kWh → *Verbrauch in L:</i>				1.870,00	3.066,80
Vibrationsaufgeber	A.0.10.1500	37,00	3.710,00	2.480,00	6.290,00	1.603,95
Rollenrost	A.2.14.0600	11,00	2.990,00	2.000,00	1.870,00	476,85
Backenbrecher	A.1.00.1300	160,00	6.200,00	4.020,00	27.200,00	6.936,00
Förderband 1	A.5.12.1225	30,00	1.100,00	700,00	5.100,00	1.300,50
Magnetabscheider 1	-	5,50	624,00	214,50	935,00	238,43
Zweidecker-Sieb	A.2.03.1000	18,50	1.500,00	1.000,00	3.145,00	801,98
Prallbrecher	A.1.03.1600	250,00	9.550,00	6.150,00	42.500,00	
Förderband 2	A.5.12.1225	30,00	1.100,00	700,00	5.100,00	1.300,50
Magnetabscheider 2	-	5,50	624,00	214,50	935,00	238,43
Dreidecker-Sieb	A.2.06.1000	22,00	2.120,00	1.410,00	3.740,00	953,70

Windsichter	A.2.10.3500	37,00	6.400,00	4.260,00	6.290,00	1.603,95
-------------	-------------	-------	----------	----------	----------	----------

Dieselbetriebene Geräte verbrauchen 3.230 L Diesel monatlich. Analog der im Kapitel 5.1.1 erläuterten Vorgehensweise betragen die monatlichen Betriebsstoffkosten für diese Geräte 5.562,06 €.

Strombetriebene Geräte verbrauchen in der Summe 103.105,00 kWh monatlich. Unter Berücksichtigung des in Kapitel 0 angegebenen Strompreises von 25,54 ct / kWh ergeben sich die monatlichen Stromkosten zu 26.291,78 €.

In Tabelle 5-24 werden die monatlichen Betriebskosten für das Fallbeispiel 3 aus den Kosten für Abschreibung und Verzinsung, den Reparaturkosten, sowie den Betriebsstoffkosten ermittelt.

Tabelle 5-24: Monatliche Betriebskosten für das Fallbeispiel 3

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	49.803,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	34.114,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	31.853,84
Monatliche Betriebskosten [€]	115.770,84

Monatliche Gesamtkosten

Die monatlichen Betriebskosten zusammen mit den monatlichen Anteilen der Anschaffungskosten bilden die monatlichen Gesamtkosten für das Fallbeispiel 3.

Tabelle 5-25: Monatliche Gesamtkosten für das Fallbeispiel 3

Monatlicher Anteil der Anschaffungskosten [€]	15.908,33
Monatliche Betriebskosten [€]	115.770,84
Monatliche Gesamtkosten [€]	131.679,17

Für diesen Grenzfall, der die jährliche Produktion von 1 Millionen Tonnen Recycling-Betongranulat annimmt, beträgt die monatliche Herstellungsmenge ca. 83.300 Tonnen. Umgerechnet betragen die Gesamtkosten 1,58 Euro pro hergestellte Tonne des Recycling-Baustoffes.

5.3.2 Szenario 2

Wie in vorherigen Kapiteln erläutert, werden 2- sowie 3-Decker Sieb und Windsichter aus der Aufbereitungskette herausgenommen. Dadurch reduzieren sich die Anschaffungskosten, sowie Kosten für Abschreibung und Verzinsung, die Reparaturkosten und auch Betriebsstoffkosten.

Anschaffungskosten

Werden die 2- und 3-Decker Sieb, sowie Windsichter aus dem Aufbereitungsprozess entfernt, so ergeben sich folgende Ersparnisse bei der Anschaffung von Geräten:

Tabelle 5-26: Differenz der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3

Einmalige Anschaffungskosten [€]	-370.400,00
Jährliche Beträge [€]	-37.040,00
Monatliche Beträge [€]	-3.086,67

Somit ergeben sich folgende Anschaffungskosten, sowie deren Aufteilung auf jährlicher bzw. monatlicher Basis für das Szenario 2:

Tabelle 5-27: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1

	Szenario 1	Kostendifferenz	Szenario 2
Einmalige Anschaffungskosten [€]	1.909.000,00	-370.400,00	1.538.600,00
Jährliche Beträge [€]	190.900,00	-37.040,00	153.860,00
Monatliche Beträge [€]	15.908,33	-3.086,67	12.821,67

Monatliche Betriebskosten

Ausgehend von den in der Tabelle 5-23 angeführten Kosten für jeweilige Geräte wird die Kostendifferenz ermittelt.

Tabelle 5-28: Differenz der Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3

Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	-10.020,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	-6.670,00
Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	-3.359,63
Monatliche Betriebskosten [€]	-20.049,63

Nach Abzug der Kostendifferenz von den für das Szenario 1 ermittelten Kosten, die in der Tabelle 5-24 angegeben sind, ergeben sich folgende monatliche Gesamtkosten für eine vereinfachte Prozesskette:

Tabelle 5-29: Monatliche Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3

	Szenario 1	Kostendifferenz	Szenario 2
Monatliche Abschreibung und Verzinsung [€]	49.803,00	-10.020,00	39.783,00
Monatliche Reparaturkosten [€]	34.114,00	-6.670,00	27.444,00

Monatliche Betriebsstoffkosten [€]	31.853,84	-3.359,63	28.494,21
Monatliche Gesamtkosten [€]	115.770,84	-20.049,63	95.721,21

Monatliche Gesamtkosten

Unter Berücksichtigung der monatlichen Anteile der Anschaffungskosten, sowie den monatlichen Betriebskosten ergeben sich folgende Beträge der monatlichen Gesamtkosten für das Fallbeispiel 3:

Tabelle 5-30: Monatliche Gesamtkosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3

Monatlicher Anteil der Anschaffungskosten [€]	12.821,67
Monatliche Betriebskosten [€]	95.721,21
Monatliche Gesamtkosten [€]	108.542,88

Unter Berücksichtigung der in Kapitel 5.3.1 definierten monatlichen Produktionsmenge von 83.300 Tonnen ergeben sich folgende Produktionskosten für das Szenario 2: 1,30 €/t.

5.4 Vergleich der Ergebnisse

Die Ergebnisse, das heißt die monatlichen Gesamtkosten, sowie die Einheitskosten werden in Tabelle 5-31 zusammengefasst.

Tabelle 5-31: Zusammenfassung der monatlichen Gesamtkosten und Einheitskosten für 3 Fallbeispiele und jeweils 2 Szenarien

		Fallbeispiel 1	Fallbeispiel 2	Fallbeispiel 3
		200.000 t/a	408.000 t/a	1.000.000 t/a
		100 t/h	200 t/h	490 t/h
Szenario 1	Monatliche Gesamtkosten [€]	91.048,06	99.140,99	131.679,17
	Einheitskosten [€/t]	5,36	2,92	1,58
Szenario 2	Monatliche Gesamtkosten [€]	70.642,01	78.734,94	108.542,88
	Einheitskosten [€/t]	4,16	2,32	1,30

Wie in Tabelle 5-31 ersichtlich wird, steigen die monatlichen Gesamtkosten mit steigender Produktionsmenge. Für das Szenario 1 bedeutet die Verdoppelung der Produktionsmenge von 100 auf 200 Tonnen pro Stunde eine neunprozentige Zunahme der monatlichen Gesamtkosten. Diese steigen nämlich von 91.048,06 Euro auf 99.140,99 Euro. Eine rund fünffache Vergrößerung der Produktionsmenge führt zu einer 45% Zunahme der monatlichen Gesamtkosten. Somit betragen diese 131.679,17 Euro für die

Produktionsmenge von 490 Tonnen pro Stunde. Die Ursache für die Zunahme der monatlichen Gesamtkosten ist Einsatz von leistungsfähigeren Geräten. Diese verzeichnen einerseits höhere Neuwerte und somit erhöhen sich die monatlichen Anteile der Anschaffungskosten. Andererseits verbrauchen diese Geräte mehr Strom, wodurch die monatlichen Energiekosten steigen.

Leistungsfähigere Geräte können mehr Material aufbereiten, was größere Produktionsmengen bedeutet. Hier ist der sogenannte Skaleneffekt zu bemerken. Das heißt, dass mit steigender Produktionsmenge die Kosten bezogen auf die Produktionseinheit sinken. Wie in Tabelle 5-31 ersichtlich wird, sind die Einheitskosten für die Produktionsmenge von 100 Tonnen pro Stunde am höchsten und liegen für das Szenario 1 bei 5,36 €/t. Für die Produktionsmenge von 200 Tonnen pro Stunde betragen die Einheitskosten 2,92 €/t, was einer Verringerung der Einheitskosten von rund 54% entspricht. Für die Anlagenkonfiguration mit dem Durchsatz von 490 Tonnen pro Stunde betragen die Einheitskosten nur noch 1,58 €/t. In diesem Fall heißt es, dass eine ca. fünffache Vergrößerung der Produktionsmenge eine Reduktion der Einheitskosten von rund 71% pro hergestellte Tonne des Recycling-Produktes bedeutet.

Abb. 5-1 zeigt die Entwicklung der monatlichen Gesamtkosten und der Einheitskosten für das Szenario 1.

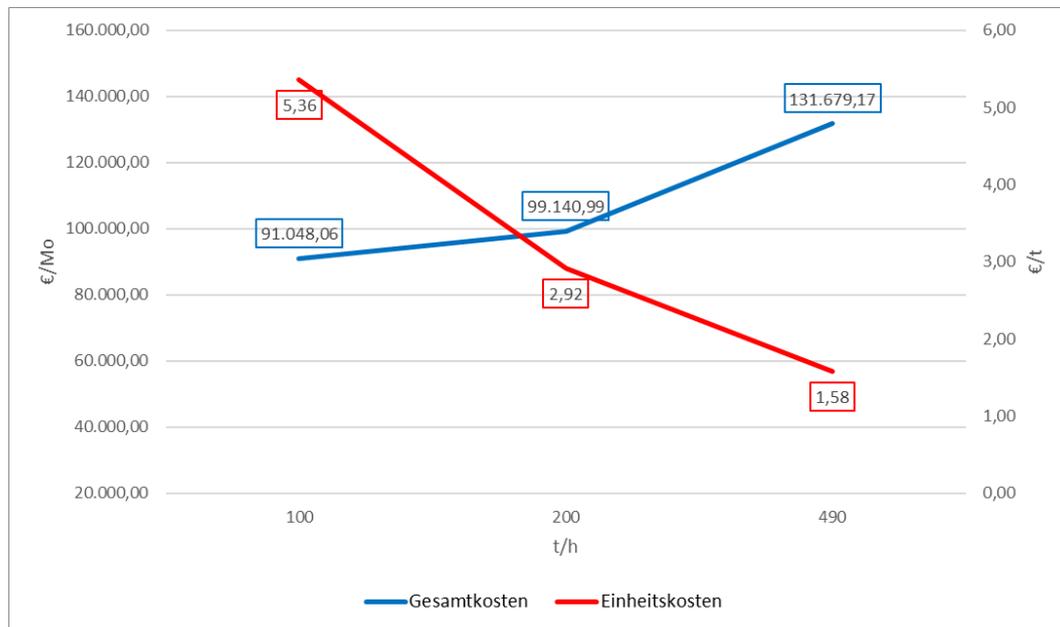


Abb. 5-1: Monatliche Gesamtkosten und Kosten bezogen auf Produktionseinheit der 3 Fallbeispiele für das Szenario 1 mit Siebung

Für das Szenario 2 sind ähnliche Zusammenhänge wie für Szenario 1 erkennbar. Die monatlichen Gesamtkosten nehmen um 11% zu, wenn sich die Produktionsmenge verdoppelt. So erhöhen sich die monatlichen Gesamtkosten von ursprünglichen 70.642,01 Euro für einen Durchsatz von 100 Tonnen pro Stunde auf 78.734,94 Euro für 200 Tonnen pro

Stunde. Die monatlichen Gesamtkosten von 108.542,88 Euro für einen Durchsatz von 490 Tonnen pro Stunde sind um 54% höher als die monatlichen Gesamtkosten für den fünfmal geringeren Durchsatz von 100 t/h.

Im Falle des Szenarios 2 kann der Skaleneffekt ähnlich wie in Szenario 1 beobachtet werden. Für eine Produktionsmenge von 100 Tonnen pro Stunde betragen die Einheitskosten 4,16 €/t. Die Verdoppelung des Durchsatzes führt zu einer 56% Verringerung der Einheitskosten. Somit betragen diese 2,32 €/t für einen Durchsatz von 200 Tonnen pro Stunde. Für den Grenzfall mit 490 t/h hergestellten Recycling-Betons betragen die Einheitskosten 1,30 €/t. Analog zum Szenario 1 ist auch hier bemerkbar, dass eine fünffache Vergrößerung der Produktionsmenge eine Reduktion der Einheitskosten von ca. 69% bedeutet.

Entwicklung der monatlichen Gesamtkosten, sowie der Einheitskosten für das Szenario 2 wird in Abb. 5-2 ersichtlich.

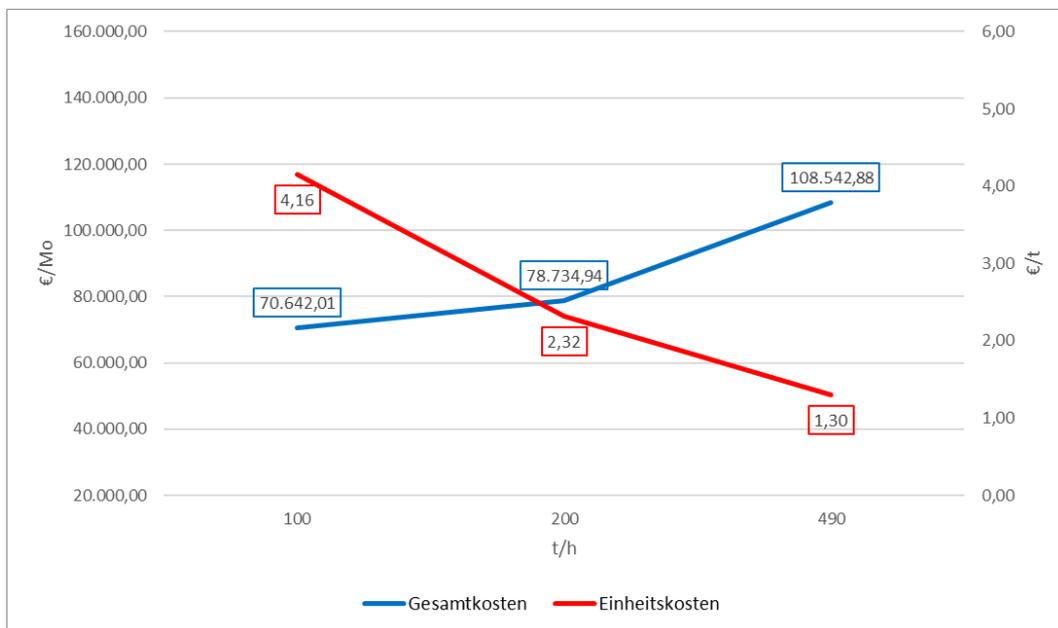


Abb. 5-2: Monatliche Gesamtkosten und Kosten bezogen auf Produktionseinheit der 3 Fallbeispiele für das Szenario 2 ohne Siebung

Die erste Forschungsfrage dieser Diplomarbeit beschäftigt sich mit der Entwicklung der Produktionskosten in Abhängigkeit von der Produktionsmenge und versucht anschließend die wirtschaftlichste Produktionsmenge zu identifizieren. Tabelle 5-31, sowie Abb. 5-1 und Abb. 5-2 zeigen die Entwicklung der Produktionskosten des Recycling-Betongranulats und antworten somit auf die erste Forschungsfrage. Auf Basis der in Tabelle 5-31, sowie in Abb. 5-1 und Abb. 5-2 dargestellten Daten lässt sich darauf schließen, dass die Anlage mit einem jährlichen Durchsatz von 1 Mio. Tonnen die wirtschaftlichste Variante ist. Einerseits verringern sich die Einheitskosten zu 71% für das Szenario 1 bzw. 69% für das Szenario 2 im Vergleich zu dem Fallbeispiel mit jährlichem Durchsatz von 200.000

Tonnen. Andererseits bedeuten größere Produktionsmengen größere sowohl Annahmepreise als auch Abgabemengen, was zusätzliche Erlöse bedeutet.

Unter Berücksichtigung der in Tabelle 4-1 angeführten Annahmepreise in Wien und Umgebung ergeben sich folgende Erlöse aus der Annahme des Betonabbruchs. Anlage 1 verlangt 4,40 €/t für die Annahme des bewehrten Betonabbruchs bis maximal 100 cm Kantenlänge. Wenn die Kantenlänge 100 cm übersteigt, erhöht sich der Annahmepreis auf 16,50 €/t. Diese Erhöhung des Annahmepreises ist auf einen zusätzlichen Aufbereitungsschritt zurückzuführen. Dieser ist die Vorzerkleinerung mittels des Hydraulikbaggers und Betonknackers. Im Fall eines verunreinigten Betonabbruchs beträgt der Annahmepreis 11,00 €/t. Anlagen 2 und 3 verlangen 15,00 Euro für eine Tonne des sortenreinen, bewehrten Betons und 23,00 Euro für eine Tonne des unsortierten und verunreinigten Betons. Annahme eines bewehrten Betonaufbruchs bis 70x70 cm Größe von der Anlage 4 kostet 5,00 €/t. Wenn der Betonaufbruch die Größe von 70x70 cm überschreitet, verdoppelt sich der Annahmepreis und beträgt hier 10,00 Euro. Anlage 4 nimmt auch Betongroßteile, das heißt Betonfertigteile an. Der Annahmepreis dafür beträgt 24,15 €/t.

Neben den Erlösen aus der Annahme des Betonabbruchs ergeben sich Erlöse auch durch den Verkauf des fertigen Recycling-Produktes, in konkretem Fall des Recycling-Betongranulats. In Tabelle 4-2 werden die Abgabepreise für die Anlagen in Wien und Umgebung angeführt. Eine Tonne des Recycling-Betongranulats (RB) kostet bei der Anlage 1 7,70 Euro unabhängig von der Korngruppe. Die Abgabepreise für das RB betragen bei den Anlagen 2 und 3 12,50 €/t. Anlage 4 verkauft das Recycling-Betongranulat um 8,25 €/t unabhängig von der Korngruppe.

Werden die oben angeführten Annahme- und Abgabepreise den Einheitskosten gegenübergestellt, lässt sich darauf schließen, dass die Wirtschaftlichkeit für alle drei Fallbeispiele gegeben ist. Diese ist jedoch am größten für das Fallbeispiel 3 mit dem jährlichen Durchsatz von 1 Mio. Tonnen. Für dieses Fallbeispiel betragen die Einheitskosten 1,58 Euro pro hergestellte Tonne für das Szenario 1. Verglichen mit dem kleinsten Abgabepreis von 7,70 €/t ergibt sich hier ein Gewinn von 6,12 €/t, welcher durch den Verkauf des Recycling-Betongranulats entsteht. Zusätzlicher Gewinn ergibt sich aus der Differenz der Einheitskosten zu dem Annahmepreis. Am Beispiel der Aufbereitungsanlagen in Wien und Umgebung übersteigt der dadurch entstandene Gewinn 10 €/t. Der gesamte Erlös aus den Annahme- und Abgabepreisen ergibt sich somit zu über 16,00 €/t. Somit lässt sich sagen, dass für das Fallbeispiel 3 nicht nur Wirtschaftlichkeit gegeben ist, sondern auch ein sogenannter „Puffer“ für die nicht berücksichtigten Kosten für Kredite, Versicherungen etc. vorhanden ist.

Die Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit ist jedoch der konstante Zufluss von Betonabbruch. Tabelle 1-2 gibt an, dass im Jahr 2021 rund 12,5 Mio. Tonnen mineralischer

Bau- und Abbruchabfälle entstanden sind. Der Anteil des Betonabbruchs war dabei rund 4,5 Mio. Tonnen. Davon wurden rund 3,5 Mio. Tonnen rezykliert und der Rest wurde deponiert. Tabelle 1-3 gibt an, dass im Jahr 2021 in Österreich 165 Behandlungsanlagen für die mineralischen Bau- und Abbruchabfälle existierten. Die Daten stammen aus dem Bericht des Bundesministeriums für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie: „Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich“ [2]. Der Bericht gibt nicht an, wie viele dieser Behandlungsanlagen ausschließlich Betonabbruch aufbereiten. Die Recherche hat gezeigt, dass die Aufbereitungsanlagen in Wien und Umgebung am meisten das Recycling-Mischgranulat (RM) produzieren. Nur rund ein Drittel der Anlagen in Wien und Umgebung produziert unter anderem das Recycling-Betongranulat (RB). Geringere Anzahl der Anlagen für die Aufbereitung von Betonabbruch bedeutet größere mögliche Materialzuflüsse zu einzelnen Anlagen. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist Reduktion der deponierten Mengen auf das Minimum. Am Beispiel des Jahres 2021 würde das bedeuten, dass den Aufbereitungsanlagen zusätzlich rund 1 Mio. Tonnen des Betonabbruchs zugeführt werden können.

Unter Berücksichtigung der genannten Aspekte lässt sich darauf schließen, dass die Produktionskapazitäten von bis zu 1 Mio. Tonnen im Jahr realistisch sind. Grundsätzlich gilt, dass die Produktionskapazitäten der Aufbereitungsanlage an die lokalen Bedürfnisse anzupassen sind. In diesem Sinne ist Anordnung der Aufbereitungsanlagen in und rund um die größeren Städte vorteilhaft, da in diesen viele Bestandsobjekte abgebrochen werden. Wenn die tatsächlichen Produktionsmengen die maximal möglichen Produktionsmengen unterschreiten, reduzieren sich zwar die monatlichen Betriebskosten aber die monatlichen Anteile der Anschaffungskosten bleiben unverändert. Die Einheitskosten werden größer im Vergleich zu dem Fall vollständiger Ausnutzung der Produktionskapazitäten. Die Erlöse aus den Annahme- und Abgabepreisen fallen auch geringer aus. Nur wenn eine Aufbereitungsanlage ihre volle Kapazität ausnutzen kann, ist die Wirtschaftlichkeit des Aufbereitungsprozesses gegeben.

Im Rahmen der zweiten Forschungsfrage wurde die Abweichung der Produktionskosten für fraktioniertes Recycling-Betongranulat (0/8, 8/16, 16/32) und nicht fraktioniertes Recycling-Betongranulat (0/16) bestimmt. Wie in Tabelle 5-31 ersichtlich wird, fallen sowohl monatliche Gesamtkosten als auch Einheitskosten für das Szenario 2 im Vergleich zum Szenario 1 mit mehreren Siebvorgängen etwas kleiner aus, weil einige Geräte aus dem Prozessstrang entfernt werden. Dementsprechend verringern sich die Einheitskosten. Die genauen Werte der monatlichen Gesamtkosten können der Abb. 5-3 entnommen werden. Die Einheitskosten werden in Abb. 5-4 dargestellt.

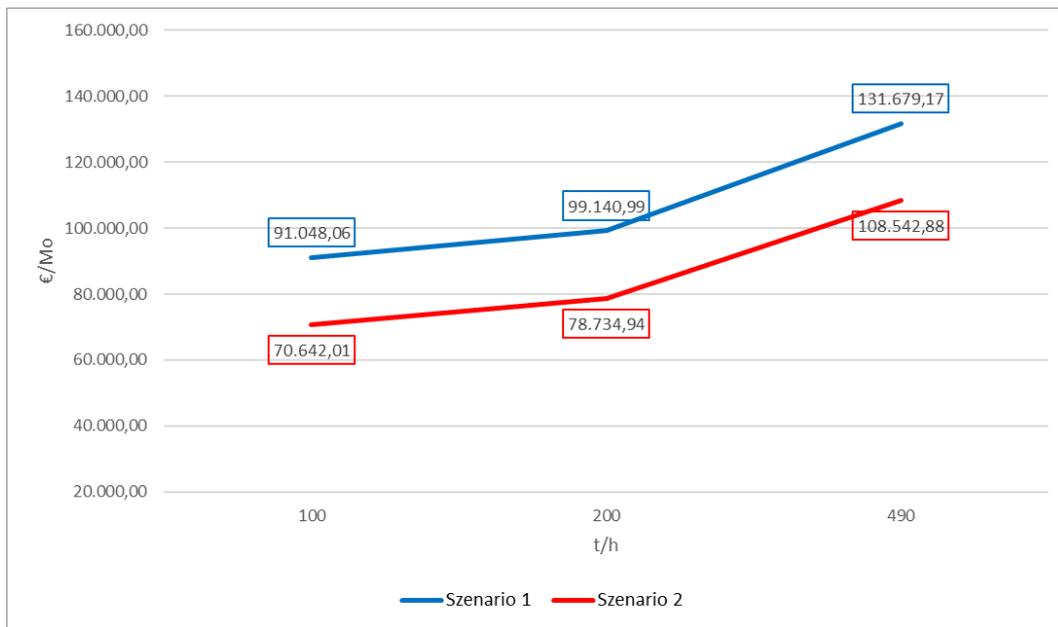


Abb. 5-3: Vergleich der monatlichen Gesamtkosten für 3 Fallbeispiele und 2 Szenarien

Abb. 5-3 zeigt, wie sich monatliche Gesamtkosten sowohl für das Szenario 1 als auch für das Szenario 2 entwickeln. Für das Fallbeispiel 1 betragen die monatlichen Gesamtkosten 91.048,06 Euro für das Szenario 1. Für das Szenario 2 liegt dieser Wert bei 70.642,01 Euro. Das heißt, dass auf mehrmalige Siebung 20.406,05 Euro entfällt. Für das Szenario 1 macht die mehrmalige Siebung rund 22% der monatlichen Gesamtkosten aus. Die restlichen 78% der monatlichen Gesamtkosten entfallen auf die zweistufige Zerkleinerung mittels Backen- und Prallbrechers, sowie auf die zwischengeschalteten Anlagen wie Förderbänder, Magnetabscheider, Rollenroste, Vibrationsaufgeber und Zerkleinerung mittels des Hydraulikbaggers. Für die Fallbeispiele 1 und 2 werden nämlich gleiche Siebanlagen eingesetzt. Deshalb ergibt sich auch für das Fallbeispiel 2 eine Differenz der Gesamtkosten zu 20.406,05 Euro. Die Kosten für das Szenario 1 betragen für dieses Fallbeispiel 99.140,99 Euro und für das Szenario 2 78.734,94 Euro. Für das Fallbeispiel 3 werden wegen der größeren Produktionsmenge leistungsfähigere Geräte eingesetzt. Für das Szenario 1 betragen die monatlichen Gesamtkosten 131.679,17 Euro. Die monatlichen Gesamtkosten für das Szenario 2 betragen 108.542,88 Euro. Daraus ergibt sich eine Differenz der monatlichen Gesamtkosten zu 23.136,29 Euro. Der Anteil der monatlichen Gesamtkosten für Siebvorgänge bezogen auf die monatlichen Gesamtkosten des Szenarios 1 beträgt rund 18%. Somit ergibt sich der Anteil der Gesamtkosten aus der Zerkleinerung und den restlichen Aufbereitungsschritten zu 82% der monatlichen Gesamtkosten. Es wird deutlich, dass die Siebvorgänge im Vergleich zu diesen Teilprozessen weniger kostenintensiv sind.

Mehrmalige Siebung ermöglicht die Herstellung von Recycling-Betongranulat mit einem höheren Reinheitsgrad, sowie einer besser abgestuften Sieblinie. Diese Eigenschaften sind von wesentlicher Bedeutung für eine höherwertige Verwertung des Recycling-

Betongranulats, wie zum Beispiel für die Verwendung in der Betonherstellung. Die Verwendung in der Betonherstellung hat folgende Vorteile: die deponierte Masse wird verringert und somit wird die Umwelt entlastet, der Bedarf nach natürlicher Gesteinskörnung wird kleiner, sowie der CO₂-Abdruck, der aus dem Beschaffungsprozess der natürlichen Gesteinskörnung entsteht. Wesentliche Voraussetzung für die Verwendung des Recycling-Betongranulats in der Betonherstellung ist die Verringerung des Gehalts der Feinanteile. Hoher Gehalt der Feinanteile wirkt sich negativ auf die Eigenschaften des Recycling-Betons wie die Wasseraufnahme und somit die Festigkeit und Dauerhaftigkeit aus. Einhaltung der Grenzwerte von Feinanteilen ist auch hinsichtlich der chemischen Beständigkeit des Recycling-Betons notwendig. Die Beständigkeit gegen Chlorid-Ionen-, sowie Sulfat- oder Alkali-Kieselsäure-Angriff liegt im direkten Zusammenhang mit dem Gehalt der Feinanteile. Der Gehalt der Feinanteile kann ausschließlich durch mehrere Siebvorgänge gesteuert werden. Aus diesem Grund sollte auf die Siebvorgänge nicht verzichtet werden. Kostentechnisch spielen sie eine untergeordnete Rolle, aber hinsichtlich der Eigenschaften des Recycling-Betongranulats und seiner späteren Verwertung sind sie unerlässlich.

Hinsichtlich umweltrelevanter Aspekte hat sich zweistufige Aufbereitung samt Siebvorgängen als die günstigste Variante im Vergleich zu innovativen Methoden erwiesen. Diese Art der Aufbereitung von Betonabbruch verbraucht am wenigsten Energie und liefert Recycling-Betongranulat mit den Eigenschaften, die den Anforderungen für die Verwendung in der Betonherstellung entsprechen. Ein weiterer wichtiger Punkt ist, dass alle Anlagenteile bis auf Hydraulikbagger und Laderaupen strombetrieben werden. Dies bedeutet geringere Emissionen des CO₂-Äquivalents, das von dem Energieträger abhängig ist. Andererseits bedeutet eine hochwertige Verwendung von Recycling-Betongranulat in der Betonherstellung die Verringerung des deponierten Volumens und somit Entlastung des Bodens beziehungsweise der Umwelt. Durch die Verwendung von Recycling-Betongranulat verringern sich auch CO₂-Emissionen des fertigen Produktes Beton. Eine Wiederverwendung der feinen Anteile bringt ebenso Ersparnisse der CO₂-Emissionen, die bei der Zementherstellung entstehen.

Abb. 5-4 zeigt die Entwicklung der Kosten bezogen auf die Produktionseinheit für beide betrachtete Szenarien.

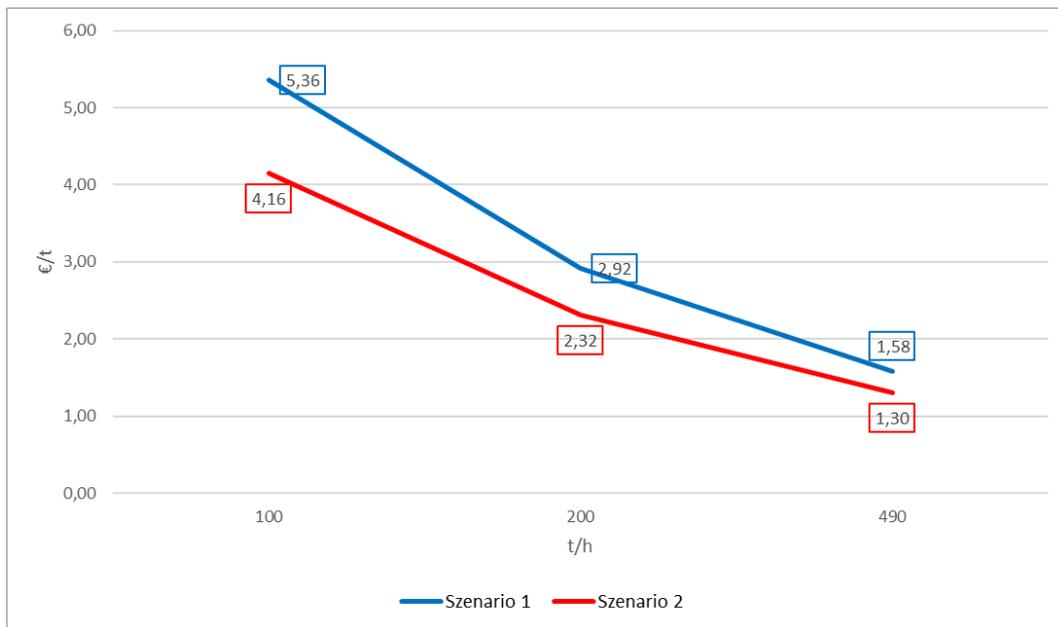


Abb. 5-4: Vergleich der Kosten pro Produktionseinheit für 3 Fallbeispiele und 2 Szenarien

Hier ist erkennbar, dass mit der zunehmenden Produktionsmenge die Differenz der Kosten zwischen der vereinfachten (Szenario 2) und der fortgeschrittenen Aufbereitung (Szenario 1) immer kleiner wird. Für die Produktionsmenge von 100 Tonnen pro Stunde betragen die Einheitskosten für das Szenario 1 5,36 €/t und für das Szenario 2 4,16 €/t. Somit beträgt die Differenz der Einheitskosten 1,20 €/t. Für das Fallbeispiel 2 verringern sich die Einheitskosten von 2,92 €/t für das Szenario 1 auf 2,32 €/t für das Szenario 2. Für dieses Fallbeispiel beträgt die Differenz der Einheitskosten 0,60 €/t, während sie für das Fallbeispiel 3 mit der Produktionsmenge von 490 t/h nur noch 0,28 €/t beträgt. In diesem Fallbeispiel liegen die Einheitskosten für das Szenario 1 bei 1,58 €/t und für das Szenario 2 bei 1,30 €/t. Mit steigender Produktionsmenge hat die mehrmalige Siebung immer weniger Einfluss auf die Einheitskosten, wie es in Abb. 5-4 ersichtlich wird. Daraus lässt sich schließen, dass sich vor allem bei höheren Produktionsmengen eine fortgeschrittene Aufbereitung mit mehreren Stufen der Siebung auszahlt. An dieser Stelle wird nochmals betont, dass mehrmalige Siebung für eine gut gestufte Sieblinie und Gehalt an Feinanteilen des Recycling-Betongranulats eine wesentliche Rolle spielt. Diese Tatsache in Kombination mit den durchgeführten Berechnungen bildet ein starkes Argument dazu, dass mehrmalige Siebung unerlässlich ist.

Die durchgeführten Berechnungen haben zu zwei wesentlichen Schlussfolgerungen geführt. Zum einen ist der Skaleneffekt zu erkennen. Das heißt, dass mit zunehmender Produktionsmenge die Einheitskosten abnehmen. Dieser Effekt ist unabhängig von dem betrachteten Szenario erkennbar. Eine ca. fünffache Erhöhung der Produktionskapazitäten führt zu einer Verringerung der Einheitskosten von 71% für das Szenario 1 und 69% für das Szenario 2. Das zeigt, dass mit steigenden Anlagenkapazitäten die Wirtschaftlichkeit

der Anlagen auch steigt. Die Voraussetzung für die Wirtschaftlichkeit ist jedoch ein langfristig gesichertes Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen und Einsatz des Recycling-Betongranulats innerhalb eines begrenzten Gebiets. Nur wenn die Anlage mit ihrer vollen Kapazität arbeitet, ist mit wirtschaftlichem Vorteil zu rechnen.

Das zweite wichtige Erkenntnis ist, dass die Siebvorgänge kostentechnisch eine untergeordnete Rolle spielen. Für die Fallbeispiele 1 und 2 entfällt auf die mehrmalige Siebung 22% der monatlichen Gesamtkosten. Dieser Prozentsatz beträgt für das Fallbeispiel 3 18%. Diese Erkenntnis ist ein wichtiges Argument dafür, dass auf die mehrmalige Siebung nicht verzichtet werden soll. Durch die mehrmalige Siebung werden Recycling-Baustoffe hergestellt, die eine vorhersehbare und gut gestufte Körnungslinie haben. Die Herstellung von verschiedenen Korngruppen ist nur bei mehrmaliger Siebung möglich. Ein weiterer Vorteil der mehrmaligen Siebung ist höherer Reinheitsgrad der Recycling-Baustoffe. Die leichte Störstoffe wie Papier oder Holz, sowie die Feinanteile werden abgetrennt. Dadurch werden die Eigenschaften der Recycling-Produkte verbessert, was den Einsatzbereich dieser Produkte vergrößert. Nur Recycling-Produkte mit den im Kapitel 1.9.2 erläuterten Eigenschaften können für die Betonherstellung verwendet werden. Da diese Eigenschaften durch die in Kapitel 4.1 definierte fortgeschrittene Aufbereitung erreichbar sind, ist die mehrmalige Siebung unerlässlich.

6 Zusammenfassung

Im Rahmen der ersten Forschungsfrage wurde gezeigt, dass die Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses gegeben ist und dass sie mit steigender Produktionsmenge des Recycling-Betongranulats auch steigt. Die wirtschaftliche Aufbereitungsanlage ist solche mit einem Durchsatz von rund 1 Mio. Tonnen jährlich. Die größeren Produktionsmengen bedeuten sowohl geringere Einheitskosten als auch höhere Erlöse, die sich aus der Annahme des Betonabbruchs und Verkauf des fertigen Recycling-Betongranulats zusammensetzen. Daraus ergeben sich wirtschaftliche Vorteile für den Anlagenbetreiber.

Die zweite Forschungsfrage hat gezeigt, dass die Kosten für Aufbereitung des Betonabbruchs zu einem hochwertigen, fraktionierten Recycling-Betongranulat (0/8, 8/16, 16/32) nur wenig von den Kosten für die Herstellung von nicht fraktionierten Recycling-Betongranulat (0/16) abweichen. Prozentuell machen die Kosten für die Siebung nur rund 20% der Gesamtkosten einer Aufbereitungsanlage aus. Die Kosten für die komplexere Aufbereitung sind im Einklang mit den Annahme- und Abgabepreisen am Markt. Die Wirtschaftlichkeit einer solcher Aufbereitung ist gegeben und die Qualität des Recycling-Betongranulats entspricht den Anforderungen für die Verwendung in der Betonherstellung.

Es könnte darauf geschlossen werden, dass der Herstellung von großen Mengen des hochqualitativen Recycling-Betongranulats nicht mehr im Wege steht. Weil es aber weitere Faktoren gibt, die die hochwertige Verwendung von Recycling-Betongranulat für die Betonherstellung beeinflussen, müssen diese in Einklang gebracht werden. Als erstes muss die Marktakzeptanz von Recycling-Baustoffen für eine hochwertige Verwertung geschaffen werden und die Skepsis gegenüber diesen überwunden werden. Dies geschieht einerseits durch mehr Forschung und öffentlich zugängliche Ergebnisse. Es soll gezielt daran gearbeitet werden, sowohl die Anlagenbetreiber als auch die Endbenutzer über die Kosten, Vorteile, sowie Umwelteinflüsse, die sich aus der Herstellung und Verwendung von Recycling-Produkte ergeben, besser zu informieren. Dies erfolgt durch verschiedene Seminare, Workshops oder Messen. Andererseits muss eine Anpassung der aktuellen Normenlage stattfinden. Die Normenlage soll sowohl einen breiteren Einsatzbereich als auch höhere Austauschraten für diese Produkte schaffen. Gute Beispiele für die Auflockerung der Normenlage sind Schweiz und Niederlanden, die als Vorreiter in der hochwertigen Verwertung von rezyklierten Baustoffen gelten. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Anpassung der Marktpreise. Auch wenn die Einheitskosten für die Herstellung von Recycling-Betongranulat mit den Annahme- und Abgabepreisen gut auskommen, sind weitere Maßnahmen notwendig. Diese Maßnahmen wären unter anderem die Erhöhung der Preise der natürlichen Gesteinskörnung, Erhöhung der Deponiepreisen, finanzielle

Unterstützung der Anlagenbetreiber, sowie Begünstigungen für den Endverbraucher bei der Verwendung der rezyklierten Gesteinskörnung.

Nur durch Kombination dieser Maßnahmen kann mit einem vermehrten Einsatz von Recycling-Betongranulat für hochwertige Zwecke gerechnet werden.

Literaturverzeichnis

- [1] European Commission. Joint Research Centre., *Use of recycled aggregates in concrete: opportunities for upscaling in Europe*. LU: Publications Office, 2023. Zugegriffen: 15. November 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://data.europa.eu/doi/10.2760/144802>
- [2] Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, *Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich, Statusbericht 2023 für das Referenzjahr 2021*. 2023.
- [3] „RIS - Abfallwirtschaftsgesetz 2002 - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 22.01.2024“.
- [4] „Richtlinie - 2008/98 - EN - EUR-Lex“.
- [5] H. Martens und D. Goldmann, *Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2016.
- [6] „ÖNORM EN 12620:2014 Gesteinskörnungen für Beton“.
- [7] F. Trebut und B. Pfefferer, „Anforderungen an die Kreislauffähigkeit von Massivbaustoffen“.
- [8] B. Wang, L. Yan, Q. Fu, und B. Kasal, „A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 171, S. 105565, Aug. 2021.
- [9] „The European Green Deal - European Commission“.
- [10] „RIS - Abfallverzeichnisverordnung 2020 Anl. 1 - Bundesrecht konsolidiert, tagesaktuelle Fassung“.
- [11] „RIS - Recycling-Baustoffverordnung - Bundesrecht konsolidiert, Fassung vom 16.12.2023“.
- [12] „ÖNORM B 3140:2020 Rezyklierte Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Anwendungen sowie für Beton“.
- [13] „Recycling-Baustoffe – Österreichischer Baustoff- Recycling Verband“.
- [14] „ÖNORM B 4710-1:2018-01 Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität Teil 1: Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206 für Normal- und Schwerbeton“.
- [15] A. Müller, *Baustoffrecycling: Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018.
- [16] B. Bilitewski und G. Härdtle, *Abfallwirtschaft: Handbuch für Praxis und Lehre*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2013.
- [17] R. V. Silva, J. De Brito, und R. K. Dhir, „Availability and processing of recycled aggregates within the construction and demolition supply chain: A review“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 143, S. 598–614, Feb. 2017.
- [18] C. Nobis und A. Vollpracht, *Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand*. Institut für Bauforschung Aachen, 2015.
- [19] A. Coelho und J. De Brito, „Preparation of concrete aggregates from construction and demolition waste (CDW)“, in *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier, 2013, S. 210–245.
- [20] E. Garbarino und G. A. Blengini, „The economics of construction and demolition waste (C&DW) management facilities“, in *Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste*, Elsevier, 2013, S. 108–138.
- [21] M. V. A. Florea, „Secondary materials applied in cement-based products : treatment, modelling and environmental interaction“, Phd Thesis 1 (Research TU/e / Graduation TU/e), Technische Universiteit Eindhoven, Eindhoven, 2014.

- [22] K. J. Schenk, „Separating device“, WO2011142663A1, 17. November 2011 Zugegriffen: 2. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://patents.google.com/patent/WO2011142663A1/en?q=WO2011142663A1>
- [23] R. K. Dhir, T. D. Dyer, und J. E. Halliday, Hrsg., *Challenges of Concrete Construction: Volume 5, Sustainable Concrete Construction: Proceedings of the International Conference held at the University of Dundee, Scotland, UK on 9–11 September 2002*. Thomas Telford Publishing, 2002.
- [24] V. W. Y. Tam, M. Soomro, und A. C. J. Evangelista, „Quality improvement of recycled concrete aggregate by removal of residual mortar: A comprehensive review of approaches adopted“, *Construction and Building Materials*, Bd. 288, S. 123066, Juni 2021.
- [25] „Elektrodynamische Fragmentierung“, Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP. Zugegriffen: 3. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/mineralische-werkstoffe-baustoffrecycling/aufbereitungsverfahren/elektrodynamische-fragmentierung.html>
- [26] J. Pacheco und J. De Brito, „Recycled Aggregates Produced from Construction and Demolition Waste for Structural Concrete: Constituents, Properties and Production“, *Materials*, Bd. 14, Nr. 19, S. 5748, Okt. 2021.
- [27] W. de Vries und P. Rem, „ADR: A classifier for fine moist materials“, *Separating Pro-environment Technologies for Waste Treatment, Soil and Sediments Remediation*, S. 43–58, Jan. 2012.
- [28] „Innovative technologies for recycling End-of-Life concrete waste in the built environment“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 163, S. 104911, Dez. 2020.
- [29] S. Lotfi, J. Deja, P. Rem, R. Mróz, E. van Roekel, und H. van der Stelt, „Mechanical recycling of EOL concrete into high-grade aggregates“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 87, S. 117–125, Juni 2014.
- [30] A. Coelho und J. de Brito, „Economic viability analysis of a construction and demolition waste recycling plant in Portugal – part I: location, materials, technology and economic analysis“, *Journal of Cleaner Production*, Bd. 39, S. 338–352, Jan. 2013.
- [31] M. Quattrone, S. C. Angulo, und V. M. John, „Energy and CO2 from high performance recycled aggregate production“, *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 90, S. 21–33, Sep. 2014.
- [32] „Recycling-Anlagen – Österreichischer Baustoff- Recycling Verband“. Zugegriffen: 12. Dezember 2023. [Online]. Verfügbar unter: <https://brv.at/recycling-anlagen/>
- [33] „ÖNORM B 2061:2020 Preisermittlung für Bauleistungen - Verfahrensnorm“.
- [34] B. G. L. Online, „BGL Baugeräteliste 2020 | Baugeräteliste - Bauverlag“. Zugegriffen: 1. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.bgl-online.info/>
- [35] Univ.-Prof Dr. Andreas Kropik, „Kalkulation und Preisbildung für den Einsatz von Erdbaugeräten“, Bundesinnung Bau, Wien, Feb. 2022. [Online]. Verfügbar unter: <https://www.wko.at/oe/gewerbe-handwerk/bau/kalkulation-erdbaugeraete.pdf>
- [36] 2023 BMK, „Dieselpreise 2023“. Zugegriffen: 17. Februar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://www.bmk.gv.at/themen/energie/preise/aktuelle_preise/2023.html
- [37] „Österreich - Strompreis Industrie 2023“, Statista. Zugegriffen: 7. März 2024. [Online]. Verfügbar unter: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/287849/umfrage/strompreise-fuer-industrielle-verbraucher-in-oesterreich/>

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Abfallhierarchie [4].....	5
Abb. 1-2: Zusammensetzung des Gesamtabfallaufkommens im Jahr 2021 [2].....	10
Abb. 1-3: Entwicklung des Aufkommens von Bau- und Abbruchabfällen 2017–2021 [2]	11
Abb. 1-4: Die 10 Qualitätsbaustoffe nach RBV [13].....	16
Abb. 1-5: Die 10 Qualitätsbaustoffe nach RBV [13].....	17
Abb. 2-1: Einschwingenbackenbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	28
Abb. 2-2: Prallbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	29
Abb. 2-3: Schlagwalzenbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	30
Abb. 2-4: Kegelbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	31
Abb. 2-5: Fräsbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	31
Abb. 2-6: Fester Rost (links) und Rollenrost (rechts); entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	33
Abb. 2-7: Trommelsieb, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	34
Abb. 2-8: Windsichter unterschiedlicher Bauart, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	35
Abb. 2-9: Schrägbandscheider (links) und Leichtstoffabscheider (rechts), entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	38
Abb. 2-10: Schnecken–Aufstromsortierer, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	39
Abb. 2-11: Hydrotrommel, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	39
Abb. 2-12: Hydrobandscheider, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	40
Abb. 2-13: Setzvorgang, entnommen aus Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	40
Abb. 2-14: Verfahrensfliießbild einer mobilen Aufbereitungsanlage, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	41
Abb. 2-15: Verfahrensfliießbild einer stationären Aufbereitungsanlage, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]	42
Abb. 3-1: Smart Crusher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15].....	46

Abb. 3-2: Kegelbrecher, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]	46
Abb. 3-3: Advanced Dry Recovery, eigene Darstellung in Anlehnung an Müller, A.: Baustoffrecycling. Springer Vieweg 2018 [15]	50
Abb. 4-1: Prozesskette 1, eigene Darstellung in Anlehnung an [5], [16].....	55
Abb. 4-2: Prozesskette 2, eigene Darstellung.....	57
Abb. 5-1: Monatliche Gesamtkosten und Kosten bezogen auf Produktionseinheit der 3 Fallbeispiele für das Szenario 1 mit Siebung.....	86
Abb. 5-2: Monatliche Gesamtkosten und Kosten bezogen auf Produktionseinheit der 3 Fallbeispiele für das Szenario 2 ohne Siebung.....	87
Abb. 5-3: Vergleich der monatlichen Gesamtkosten für 3 Fallbeispiele und 2 Szenarien	90
Abb. 5-4: Vergleich der Kosten pro Produktionseinheit für 3 Fallbeispiele und 2 Szenarien	92

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Zusammensetzung von Bau- und Abbruchabfällen Quelle: [2]	7
Tabelle 1-2: Aufkommen, Input in Behandlungsanlagen und Deponierung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen im Jahr 2021 [2]	11
Tabelle 1-3: Auflistung der stationären und mobilen Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle in den jeweiligen Bundesländern im Jahr 2021 [2]	12
Tabelle 1-4: Output [t] an Recyclingbaustoffen gemäß Recyclingbaustoffverordnung aus Behandlungsanlagen für mineralische Bau- und Abbruchabfälle im Jahr 2021 [2] ..	13
Tabelle 1-5: Kategorien der Bestandteile von groben rezyklierten Gesteinskörnungen [6]	19
Tabelle 1-6: Kategorien für die Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen gemäß ÖNORM EN 12620 [12]	20
Tabelle 4-1: Annahmepreise in Raum Wien.....	58
Tabelle 4-2: Abgabepreise der Recycling-Produkte in Raum Wien	60
Tabelle 4-3: Gerätegrößen für A.9.00.0012 Fahrzeugwaage, umsetzbar [34].....	65
Tabelle 4-4: Gerätegrößen für D.1.03.0080 Hydraulikbagger mit Raupenfahrwerk 36-150 kW [34]	66
Tabelle 4-5: Gerätegrößen für D.1.85.1750 Betonknacker, Betonbeißer [34]	66
Tabelle 4-6: Gerätegrößen für D.3.00.0110 Frontlader auf Raupen (Laderaupen) [34]	66
Tabelle 4-7: Gerätegrößen für A.0.10.1000 und A.0.10.1500 Vibrationsaufgeber [34]	66
Tabelle 4-8: Gerätegrößen für A.2.14.0600 Rollenrost [34]	67
Tabelle 4-9: Gerätegrößen für A.1.00.0080/0090/1300 Einschwingen Backenbrecher [34].....	67
Tabelle 4-10: Gerätegrößen für A.5.12.0825/1025/1225, Förderband stationär [34]	68
Tabelle 4-11: Kosten eines Magnetabscheiders.....	68
Tabelle 4-12: Gerätegrößen für A.2.03.0720 und A.2.03.1000 Zweidecker-Schwingsieb Normalausführung N [34].....	69
Tabelle 4-13: Gerätegrößen für A.1.03.1000/1340/1600 Prallbrecher mit horizontalem Rotor [34]	69
Tabelle 4-14: Gerätegrößen für A.2.06.0070 und A.2.06.1000 Dreidecker-Schwingsieb Normalausführung N [34].....	70
Tabelle 4-15: Gerätegrößen für A.2.10.3500 Windsichter [34].....	70
Tabelle 5-1: Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 1	72
Tabelle 5-2: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 1	72
Tabelle 5-3: Betriebskosten für das Fallbeispiel 1.....	73
Tabelle 5-4: Monatliche Betriebskosten für das Fallbeispiel 1	74
Tabelle 5-5: Monatliche Gesamtkosten für das Fallbeispiel 1.....	74
Tabelle 5-6: Differenz der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels	175

Tabelle 5-7: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1	75
Tabelle 5-8: Differenz der Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1	75
Tabelle 5-9: Monatliche Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1	75
Tabelle 5-10: Monatliche Gesamtkosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1	76
Tabelle 5-11: Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 2	76
Tabelle 5-12: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 2	77
Tabelle 5-13: Betriebskostenkosten für das Fallbeispiel 2	77
Tabelle 5-14: Monatliche Betriebskosten für das Fallbeispiel 2	78
Tabelle 5-15: Monatliche Gesamtkosten für das Fallbeispiel 2	79
Tabelle 5-16: Differenz der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2	79
Tabelle 5-17: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2	79
Tabelle 5-18: Differenz der Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2	80
Tabelle 5-19: Monatliche Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2	80
Tabelle 5-20: Monatliche Gesamtkosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 2	80
Tabelle 5-21: Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 3	81
Tabelle 5-22: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Fallbeispiel 3	81
Tabelle 5-23: Betriebskosten für das Fallbeispiel 3	82
Tabelle 5-24: Monatliche Betriebskosten für das Fallbeispiel 3	83
Tabelle 5-25: Monatliche Gesamtkosten für das Fallbeispiel 3	83
Tabelle 5-26: Differenz der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3	84
Tabelle 5-27: Aufteilung der Anschaffungskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 1	84
Tabelle 5-28: Differenz der Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3	84
Tabelle 5-29: Monatliche Betriebskosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3	84
Tabelle 5-30: Monatliche Gesamtkosten für das Szenario 2 des Fallbeispiels 3	85
Tabelle 5-31: Zusammenfassung der monatlichen Gesamtkosten und Einheitskosten für 3 Fallbeispiele und jeweils 2 Szenarien	85