Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau

Endbericht Stand 12.2.2016

Forschungsprogramm
Zukunft Bau

Projektlaufzeit 01.01.2015 - 15.02.2016

Aktenzeichen 10.08.17.7 – 14.27

Im Auftrag

des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR)

bearbeitet von Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller Belvederer Allee 53 99524 Weimar

Kurzfassung

Summary report

Inhalt

1	Einleitung	. 14
2	Konzept zur Systematisierung der Einbindung in Stoffkreisläufe	. 16
3	Stand der Technik und Entwicklungen bei der Aufbereitung von Bauabfällen	. 21
3.1	Aufbereitungsanlagen	. 21
3.2	Einführung neuer Aufbereitungstechniken	. 31
3.3	Forschungen zu alternativen Aufbereitungsverfahren	36
4	Merkmale von Primärbaustoffen	. 39
4.1	Herstellungsprinzipien und Klassifizierungsmerkmale	. 39
4.2	Baustoffmengen und Mengen von Bau- und Abbruchabfällen	45
5	Eigenschaftsprofile von Recycling-Baustoffen nach dem Stand der Technik	52
5.1 im E	Recycling-Baustoffe zur Anwendung im Straßenbau, zur Betonherstellu Erdbau oder für Verfüllungen	
5.2	Recycling-Baustoffe als Rohmaterial	. 59
6	Konkretisierung der Verwertungsmatrix und der erforderlichen Technologien	62
6.1	Verwertungskonzepte	62
6.2	Verwertung von Recycling-Baustoffen aus Betonbruch	64
6.3	Verwertung von Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch	67
6.3.	1 Verwertung nach dem Konzept der Stoffsubkreisläufe	67
6.3.	2 Verwertung ohne vorherige Trennung	. 72
7	Szenarien für die Verwertung	. 73
8	Schlussfolgerungen und Ausblick	81
Abb	ildungsverzeichnis	89
Tab	ellenverzeichnis	. 91
Lite	ratur	92
Aus	gewählte Vorschriften	. 97

Erschließung der Ressourceneffizienzpotenziale im Bereich der Kreislaufwirtschaft Bau

Kurzfassung

Ressourceneffizienz auf dem Sektor der abiotischen, nichtenergetischen Rohstoffe steht ausdrücklich im Mittelpunkt des vom Bundeskabinett im März 2012 beschlossenen und gegenwärtig fortgeschriebenen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess. Der Bausektor steht sowohl vom Verbrauch an mineralischen Rohstoffen als auch von der Abfallentstehung her an erster Stelle der Rohstoff- bzw. Abfallwirtschaft. Er hat deshalb eine Schlüsselrolle bei der Verbesserung der Ressourceneffizienz.

Vorgehensweise

Die im Bausektor verbrauchten Rohstoffe und die entstehenden Abfälle sind Gegenstand einer großen Anzahl von Untersuchungen und Studien. Im Unterschied dazu konzentriert sich der vorliegende Bericht auf die Herstellung, die Leistungsfähigkeit und die gegenwärtig genutzten Einsatzgebiete von Recycling-Baustoffen sowie auf zukünftige Verwertungsalternativen. Neben der werkstofflichen Verwertung, die auf den physikalischen Eigenschaften der Recycling-Baustoffe beruht und gegenwärtig (bestenfalls) praktiziert wird, wird die rohstoffliche Verwertung als neue Option eingeführt. Darunter wird die Verwertung in einem stoffumwandelnden Prozess, in dem gezielte Veränderungen der chemischen bzw. mineralogischen Zusammensetzung zur Generierung neuer Produkteigenschaften erfolgen, verstanden.

Aufbereitung

Bauabfälle setzen sich aus Boden und Steinen, Straßenaufbruch aus Asphalt und Beton, Bauschutt aus Beton- und Mauerwerkbruch, gemischten Bau- und Abbruchabfällen sowie Abfällen auf Gipsbasis zusammen. Innerhalb dieser Gruppen sind der Asphaltstraßenaufbruch und die Gipskartonplattenabfälle, die als Verschnitt oder bei der Demontage alter Platten anfallen, vergleichsweise sortenrein. Im Betonstraßenaufbruch bzw. Betonbruch aus Ingenieurbauten dominieren Beton und natürliche Gesteinskörnungen. Bauschutt aus dem Hochbau stellt i. d. R. ein Gemisch verschiedenster Baustoffarten dar. Enthalten sind mineralische Baustoffe, welche Tragfunktionen übernehmen, Baustoffe, welche vor Feuchtigkeit, Verwitterung oder Wärmeverlusten schützen, sowie verschiedenste (Aus)baustoffe.

Die Aufgabe der Aufbereitung besteht darin, aus den mineralischen Bauabfällen Recycling-Baustoffe mit definierten Eigenschaften zu erzeugen. Zur Aufbereitung werden die Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik Zerkleinern – Klassieren – Sortieren genutzt. Die verwendeten Maschinen entsprechen im Wesentlichen denen, die bei der Aufbereitung von natürlichen Gesteinen eingesetzt werden. Der erste Schritt der Behandlung von Bauabfällen ist die nach Materialarten getrennte Annahme der Inputmaterialien. Durch den vorgelagerten selektiven Rückbau, die Vorsortierung auf der Abbruchbaustelle und/oder die Steuerung der Stoffströme über die Annahmegebühren wird eine Trennung nach sortenreinem Beton- bzw. Mauerwerkbruch einerseits und nach mit Störstoffen verunreinigtem Material andererseits erreicht.

Im ersten Aufbereitungsschritt erfolgt die Zerkleinerung des Bauschutts in Backenbzw. Prallbrechern. Die Zuführung des Aufgabematerials erfolgt über einen Rollenrost oder ein Plattenband, wodurch das feinkörnige Material, das aus Bodenpartikeln und leicht zerkleinerbaren Bestandteilen des Bauschutts besteht, bereits vor dem Brecher abgetrennt wird. Die erzeugten Korngemische weisen einen hohen Anteil an

Partikeln < 4 mm auf. Bei Betonbruch bewegt er sich zwischen 20 und 40 Masse-%. Aufbereiteter Mauerwerkbruch weist einen noch höheren Anteil an Feinkorn von bis zu 50 Masse-% auf.

Der zweite Verfahrensschritt der Bauschuttaufbereitung ist die Klassierung. Sie dient

- der Begrenzung der oberen Korngröße oder der Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen bzw. Fraktionen für die nachfolgende Verwendung, z. B. als Tragschichtmaterial 0/32 mm oder als rezyklierte Gesteinskörnung 16/32 mm
- der Vorbereitung der Sortierung, wenn diese nur bei engem Kornband möglich ist
- ggf. der Sortierung selbst, wenn bestimmte Stoffe in bestimmten Kornfraktionen angereichert sind.

Der dritte Verfahrensschritt ist die Sortierung, die nach der Zerkleinerung und der Klassierung in den Verfahrensablauf eingeordnet ist. Mit Hilfe der Windsichtung als trockenem Sortierverfahren werden leichte Störstoffe wie Folien, Pappe, Papier, Dämmstoffe, Kunststoffformteile und Holzstücke aus dem Zerkleinerungsprodukt abgetrennt. Es können nur Fraktionen > 4 mm oder gröber behandelt werden, so dass ein erheblicher Teil des Zerkleinerungsprodukts unsortiert bleibt. Mit Hilfe der nassen Sortierverfahren können auch leichte mineralische Baustoffe wie Porenbeton, leichte Gipsbaustoffe und Leichtbetone abgetrennt werden. Die Fraktionen < 4 mm sind in entsprechend ausgelegten Maschinen ebenfalls sortierbar. Eine Trennung der unterschiedlichen Wandbaustoffarten kann mit den nassen Sortierverfahren nicht erreicht werden.

Die vergleichsweise sortenreinen Bauabfallvarietäten Ausbauasphalt und demontierte Gipskartonplatten werden mit speziellen Techniken aufbereitet. Im Unterschied zu den o. g. Verfahren sind diese Techniken auf die spezifischen Eigenschaften des jeweiligen Aufgabematerials ausgerichtet. Die Aufbereitungsprodukte weisen eine solche Qualität auf, dass der Einsatz in den ursprünglichen Produkten möglich ist.

Der Schwerpunkt der internationalen Forschung zur Verbesserung der Anlagentechnik liegt auf der Abtrennung des Zementsteins von den Rezyklaten aus Beton. Mechanische Verfahren, denen zum Teil eine thermische Behandlung oder eine Behandlung mittels Mikrowellen vorgeschaltet ist, werden beschrieben. Die Betonzerkleinerung mittels elektrodynamischer bzw. elektrohydraulischer Verfahren, bei welchen die Beanspruchungen direkt an der Phasengrenze zwischen Zementstein und Gesteinskörnung wirken, ist seit den 1990er Jahren Gegenstand von Forschungen.

Die sensorgestützte Einzelkornsortierung wird seit langem für die Aufbereitung von Kunststoffabfällen, Altglas, Altpapier etc. genutzt. In die Aufbereitung von mineralischem Bauschutt hat sie bisher kaum Eingang gefunden, obwohl mehrfach nachgewiesen wurde, dass damit eine Trennung von Mauerwerkbruch nach Baustoffarten möglich ist. Nur zwei Anlagen außerhalb Deutschlands, die über eine sensorgestützte Sortierung verfügen, konnten ermittelt werden.

Merkmale von Primärbaustoffen

Störstofffreier Beton- und Mauerwerkbruch aus dem Hochbau besteht aus Beton, Wandbaustoffen sowie Mörtel und Putz als Hauptbestandteilen. Diese unterscheiden sich in Bezug auf die benötigten Rohstoffe, die Genese, die Festigkeitsbildung und

die Struktur. Beton, Kalksandstein und Porenbeton sind mineralisch gebundene Baustoffe mit hohen SiO₂-Gehalten. Ziegel als keramisch gebundene Baustoffe weisen einen deutlich höheren Al₂O₃-Gehalt auf. Von den physikalischen Merkmalen her ist die Porosität ausschlaggebend für die Leistungsfähigkeit. Sie bewegt sich zwischen 14 Vol.-% für Beton und 74 Vol.-% für Porenbeton. Die chemische Zusammensetzung lässt Schlussfolgerungen für die rohstoffliche Verwertung zu. Der Ziegel scheint hier Vorteile gegenüber den anderen betrachteten Baustoffen zu haben. Die physikalischen Merkmale sind ausschlaggebend für die werkstoffliche Verwertung. Hier bietet der Beton die günstigsten Voraussetzungen.

In Bezug auf die Massenbilanz ist festzustellen, dass die gegenwärtig hergestellte Menge an Wandbaustoffen in etwa der entstehenden Menge an Mauerwerkbruch entspricht. Durch die Verwertung im ursprünglichen Produkt kann somit höchstens ein bestimmter Teil der anfallenden Mengen verbraucht werden. Das dafür erforderliche Wissen über die Anforderungen und die technologischen Lösungen muss aber zunächst erarbeitet werden. Bei Beton übersteigt die hergestellte Menge die entstehende Menge an Betonbruch deutlich, so dass die Rückführung und die damit verbundene Erhöhung der Ressourceneffektivität machbar sind. Betonbruch kann auch natürliche Gesteinskörnungen im Straßenoberbau ersetzen. Somit sind zwei Sektoren vorhanden, deren Aufnahmekapazitäten für das nächste Jahrzehnt und darüber hinaus ausreichend sein sollten.

Merkmale von Recycling-Baustoffen

Betonstämmige Recycling-Baustoffe weisen von der Zusammensetzung und den physikalischen Merkmalen her solche Qualitäten auf, die einen Einsatz für die Betonherstellung oder für Funktionsschichten im Straßenoberbau erlauben. Die Hauptbestandteile sind Partikel aus Beton und natürliche Gesteinskörnungen mit einer Summe von über 80 Masse-%. Die Widerstände gegen Beanspruchungen durch Schlag bzw. Abrasion und gegen Frost-Tau-Wechsel sind geringer als bei natürlichen Gesteinskörnungen, aber ausreichend. Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch sind deutlich heterogener als betonstämmige Rezyklate. Die Hauptbestandteile sind Beton und Ziegel. Zusätzlich sind natürliche Gesteinskörnungen, andere Wandbaustoffarten, Leichtbaustoffe, Mörtel und Putze – zum Teil auf Gipsbasis – sowie geringe Mengen an Asphalt enthalten. Infolge der höheren Porosität der Wandbaustoffe gegenüber Beton können bei der Kornfestigkeit und beim Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel Defizite bestehen.

Von den Nebenbestandteilen, die in Rezyklaten auftreten, muss den Baustoffen auf Gipsbasis besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden. Von ihnen können negative bau- und umwelttechnische Auswirkungen ausgehen. Die Auswertung von im Internet veröffentlichten insgesamt 25 Prüfprotokollen ergab, dass in den Recycling-Baustoffen für Anwendungen im Straßenbau mit einer Ausnahme nur geringe Mengen an eluierbarem Sulfat enthalten sind. Aus Mauerwerkbruch hergestellte Recycling-Baustoffe für Anwendungen im Erdbau sowie für Verfüllungen zeigen deutlich höhere Sulfatgehalte.

Bei der Betrachtung der chemischen Zusammensetzung von Recycling-Baustoffen fällt auf, dass die ursprünglichen Unterschiede der chemischen Zusammensetzung der verschiedenen Baustoffarten geringer geworden sind. Insbesondere bei Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch hat durch die Zusammenführung der verschiedenen Wandbaustoffe, die bereits im Bauwerk beginnt und sich bis zur Aufbereitung fortsetzt, eine "Autohomogenisierung" stattgefunden.

Verwertungsmatrix und erforderliche Technologien

Für betonstämmige Recycling-Baustoffe gibt es Möglichkeiten der werkstofflichen Verwertung für die Herstellung von Tragschichten und für die erneute Betonherstellung. Für diese Einsatzgebiete liegen die technischen Vorschriften und die Anforderungen an die wasserwirtschaftliche Güte vor. Mit den Aufbereitungstechnologien nach dem Stand der Technik lassen sich für diese Sektoren qualitätsgerechte Recycling-Baustoffe auf der Basis von Betonbruch herstellen.

Für aus Mauerwerkbruch hervorgegangene Recycling-Baustoffe ist die werkstoffliche Verwertung nur in eingeschränktem Umfang möglich. Ziegel- und Kalksandsteinkörnungen können bis zu festgelegten Anteilen als Nebenbestandteile im Material für Tragschichten oder in rezyklierten Gesteinskörnungen vorhanden sein. Für sortenreine Ziegelkörnungen besteht zusätzlich die Option, in der Vegetationstechnik verwertet zu werden. Für die rohstoffliche Verwertung von Mauerwerkbruch bzw. dessen Bestandteilen bestehen zwei Konzepte: Zum einen wird der Mauerwerkbruch nach einer Trennung in Baustoffarten in sogenannten Stoffsubkreisläufen als Rohstoffsubstitut für die Herstellung des jeweiligen Baustoffs eingesetzt. Zum anderen dient der gemischte Mauerwerkbruch als Rohstoff, vorausgesetzt er erfüllt die Rohstoffanforderungen für bestimmte Produkte.

In Bezug auf die Rohstoffsubstitution nach dem Konzept der Stoffsubkreisläufe kann anhand der wenigen zum gegenwärtigen Zeitpunkt verfügbaren Informationen abgeschätzt werden, dass kaum mehr als 20 % der natürlichen Rohstoffe durch Rezyklate ersetzt werden können. Die Anforderungen, die an die Substitute gestellt werden müssen, sind ebenfalls noch offen. Soll der gemischte Mauerwerkbruch als Rohstoff dienen, kann anhand seiner chemischen Zusammensetzung gefolgert werden, dass die Herstellung von keramischen Produkten oder Puzzolanen in Frage kommt. In Laborversuchen wurde nachgewiesen, dass er sich tatsächlich für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen, die üblicherweise aus blähfähigen Tonen hergestellt werden, eignet, wenn ein Blähmittel zugegeben wurde. In Bezug auf den Einsatz als Puzzolan wird durch eine Erhöhung der spezifischen Oberfläche allein keine ausreichende Reaktivität erzielt werden können. Verbesserungen können ggf. erreicht werden, wenn durch eine thermische Behandlung reaktive, amorphe Phasen erzeugt werden.

Szenarien für die Verwertung

Ausgehend von der Verwertungsmatrix für die Bestandteile von Bauschutt werden drei Szenarien der Verwertung entwickelt. Im *Szenario 1* erfolgt die Aufbereitung und Verwertung nach dem Stand der Technik. Der Recycling-Baustoff aus Beton wird im Straßenbau verwertet und/oder für die Betonherstellung eingesetzt. Aus dem Mauerwerkbruch wird nur ein geringer Teil der Ziegelpartikel händisch ausgelesen und in vegetationstechnischen Einsatzgebieten wie Dachbegrünungen, Schotterrasen oder Baumsubstraten verwertet. Die überwiegende Menge an Mauerwerkbruch wird entweder direkt auf der Abbruchbaustelle oder nach einer Zerkleinerung anderenorts für Verfüllungen eingesetzt. Die rohstoffliche Verwertung für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen stellt eine Verwertungsalternative für einen Teil des Mauerwerkbruchs dar.

Im Szenario 2 wird der Betonbruch wie im Szenario 1 aufbereitet und verwertet. Beim Mauerwerkbruch wird angenommen, dass die Ziegelpartikel > 8 mm mittels optischer Sortierung aus dem Mauerwerkbruch abgetrennt werden. Dadurch ist zumindest für diesen Teil eine Verwertung sowohl für Schotterrasen, Baumsubstrate oder Dachbe-

grünungen als auch als Bestandteil von Tragschichtmaterial oder rezyklierten Gesteinskörnungen möglich. Ferner kann die Ziegelkörnung durch eine Mahlung auf Partikelgrößen < 150 µm aufbereitet und rohstofflich bei der Ziegelherstellung eingesetzt werden. Die Körnungen < 8 mm mit Mauerwerkzusammensetzung wären wiederum als Rohstoff für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen geeignet. Für die Körnungen > 8 mm, die hauptsächlich aus mineralisch gebundenen Wandbaustoffen bestehen und von ihrer chemischen Zusammensetzung her dafür nicht geeignet sind, müssten andere Verwertungen gefunden werden.

Im Szenario 3 wird bei den Recycling-Baustoffen aus Betonbruch weiterhin wie oben beschrieben vorgegangen. Auf die Abtrennung des Zementsteins mit neuen Aufbereitungstechniken wird verzichtet, solange keine attraktiven Verwertungswege für dieses Nebenprodukt bestehen. Beim Mauerwerkbruch wird eine feinkornarme Zerkleinerung realisiert. Die dabei trotzdem entstehende Fraktion < 8 mm wird als Rohstoff für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen und/oder von puzzolanischen Zusatzstoffen – sofern technologisch umsetzbar – genutzt. Die groben Fraktionen werden in einer mehrstufigen Sensorsortierung in die Materialfraktionen Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton, Mörtel und Putz getrennt. Alle Materialfraktionen werden nach dem Konzept der Stoffsubkreisläufe verwertet. Bei Ziegeln werden die verbleibenden Überschüsse anteilig in Recycling-Baustoffen für Tragschichten bzw. für die Betonherstellung eingesetzt oder für die Vegetationstechnik verwendet. Kalksandsteinkörnungen > 8 mm können in geringerem Umfang ebenfalls in diesen Anwendungsgebieten eingesetzt werden. Bei Porenbeton, Leichtbeton sowie Mörtel und Putz bestehen diese Möglichkeiten nicht.

Es ist fraglich, ob die im Szenario 3 angenommene starke Differenzierung durchweg sinnvoll ist, da für die Verwertung ein ausreichend dichtes Netz von Abnehmern vorhanden sein muss. Insbesondere die Verwertung im ursprünglichen Produkt ist bei Mauerwerkbaustoffen an bestimmte Standorte gebunden. Das kann zu unwirtschaftlichen Transportentfernungen führen. Eine Verknüpfung der Logistik für die Verteilung der Produkte mit einer Rücknahmelogistik könnte dieses Manko verringern.

Ausblick

Um das Baustoffrecycling über den gegenwärtig erreichten Stand hinaus weiterzuentwickeln und so seinen Beitrag zur Einsparung von mineralischen Ressourcen zu erhöhen, müssen die Forschung ebenso wie die Herstellung und der Einsatz von Recycling-Baustoffen gefördert werden. In der Forschung sollten folgende Fragestellungen bearbeitet werden:

- Systematische Auswertung der Güteüberwachungsprotokolle einschließlich der Einflüsse der jeweiligen Anlagenkonfiguration auf die Qualität der Rezyklate
- Weiterentwicklung der Güteüberwachung unter besonderer Berücksichtigung der Heterogenität der Rezyklate
- Weiterentwicklung der Vorschriften für die Betonherstellung
- Entwicklung von Lösungen für die Sortierung und Ermittlung der stofflichen Anforderungen als Voraussetzung für die Realisierung von Stoffsubkreisläufen
- Entwicklungen von Techniken für die Abtrennung von Gipsputzen und Estrichen aus Bauschutt

- Entwicklung von Technologien für die rohstoffliche Verwertung von Gemischen bis hin zur Errichtung von Pilotanlagen
- Entwicklung von Methoden zur Bewertung der Rezyklierbarkeit von Neuentwicklungen von Baustoffen oder Baustoffverbunden

Recycling-Baustoffe werden sich gegenüber den traditionellen Baustoffen ohne gezielte Förderung kaum in dem avisierten Zeitraum durchsetzen. Die bei den erneuerbaren Energien gesammelten Erfahrungen sollten deshalb auf die Recycling-Baustoffe übertragen werden. Durch gezielte Fördermaßnahmen, beispielsweise steuerliche Entlastungen bei der Herstellung und beim Einsatz von Recycling-Baustoffen, könnte eine verstärkte Anwendung erreicht werden. Welche Maßnahmen im Einzelnen geeignet sind, sollte Gegenstand ökonomischer Untersuchungen sein.

Utilization resource efficiency potentials in construction-related recycling

Summary report

Resource efficiency in the field of non-energetic abiotic resources is explicitly mentioned as being at the core of the ProgRess resource efficiency program adopted by the German federal government in March 2012, which is currently under review. In the field of resource and waste management, the construction industry ranks first both in terms of its consumption of mineral materials and generation of waste. It should thus play a crucial role in improving resource efficiency.

Approach

Many analyses and studies deal with the raw materials consumed in the construction industry and the waste generated in this sector. This report, however, concentrates on the production, performance and current areas of use of recycled construction materials as well as on future options for recycling and reuse. The principle of reuse of finished construction materials that is currently being applied (at least in an ideal scenario) utilizes the physical characteristics of recycled materials; it will be complemented by recycling and reuse of the constituent raw materials as a new option. This process will be associated with modifications of the constituent materials where targeted changes to their chemical and mineralogical composition will be introduced to generate new product characteristics.

Processing

Construction waste is composed of soil and rocks; crushed road pavements consist of asphalt and concrete; site debris comprises concrete and masonry rubble, mixed construction and demolition waste and gypsum-based waste. Within these groups, asphalt rubble and plasterboard waste generated during cutting or when removing old boards are relatively pure. Crushed concrete road pavements or concrete rubble from engineering structures are primarily composed of concrete and natural mineral aggregates. Debris from building construction is usually a mixture of many different types of building materials. It normally contains mineral materials that assume a structural function, materials that protect the structure from moisture, weathering or heat loss, and a variety of other (finishing) materials.

Processing aims to utilize this mineral construction waste to create recycled construction materials with defined characteristics. Processing uses the basic mechanical operations of crushing, classifying and sorting. Equipment and machinery are largely similar to those used for processing naturally occurring rocks and minerals. The first step of treating construction waste involves acceptance of input materials separated according to the type of material. Prior to this stage, selective demolition, preliminary sorting on the demolition site and/or appropriate management of material flows through acceptance fees divide this waste into pure concrete or masonry rubble on the one hand and contaminated materials on the other.

In the first processing step, construction debris is comminuted using jaw or impact crushers. The input material is fed into the system via a roller screen or plate conveyor, which separates the fine-grained material composed of soil particles and easy-to-crush rubble constituents upstream of the crusher. The particle mixes generated in this processing step include a high share of particles under 4 mm in size. This ratio amounts to 20 to 40 wt.-% in concrete rubble. Processed masonry rubble has an even higher share of fines amounting to up to 50 wt.-%.

Classifying is the second step in the processing of construction debris. It is designed to

- limit the maximum particle size or create specific particle size distributions or fractions for subsequent use, such as a 0-32 mm base course material or 16-32 mm recycled mineral aggregate
- prepare sorting if sorting is possible only for a narrowly graded particle range
- sort the material itself if specific particle fractions contain a particularly high amount of certain constituents.

The third processing step involves sorting downstream of the crushing and classifying stages. Lightweight contaminants such as plastic film, cardboard, paper, insulating materials, molded plastics, and pieces of wood, are separated from the crushed product using an air classifier in a dry sorting process. Only particles of at least 4 mm in size can be processed so that a significant portion of the crushed product is left unsorted. Wet sorting methods are also suitable for separating lightweight mineral materials including aerated concrete, lightweight gypsum materials and lightweight concrete grades. Particles smaller than 4 mm can also be sorted on appropriately designed machines. Wet sorting techniques are not suitable for separating the various types of wall construction materials from each other.

Specially designed techniques are applied to process relatively pure types of construction materials, such as asphalt rubble and removed plasterboards. Unlike the process steps referred to above, these methods are geared towards the specific characteristics of the respective feed material. Processed products conform to a quality standard that enables their reuse in primary products.

International research to improve related equipment and machinery concentrates on separating the cement paste from materials recycled from concrete. Mechanical processes are described; they are sometimes preceded by thermal or microwave treatment. Concrete comminution by means of electrodynamic or electrohydraulic processes in which a direct impact on the interface between cement paste and mineral aggregate is created has been subject to research since the 1990s.

Sensor-based separation of individual particles has long been used for the processing of waste plastics, glass, paper etc. However, this method has hardly been applied yet in the context of processing mineral construction debris although it was repeatedly shown to enable separation of masonry rubble into individual types of construction material. Only two installations equipped with sensor-based separation systems were found outside Germany.

Characteristics of primary construction materials

Contaminant-free concrete and masonry rubble from building construction is primarily composed of concrete, wall building materials, and mortar and render. These constituents differ in terms of required raw materials, origin, strength development, and structure. Concrete, sand-lime brick and aerated concrete are minerally bound materials that exhibit a high SiO₂ content. Brick is a ceramically bound material with a significantly higher share of Al₂O₃. Among the range of physical characteristics, porosity is the key parameter that determines the performance of the individual materials. It ranges from 14 vol.-% for concrete to 74 vol.-% for aerated concrete. The chemical composition of materials permits conclusions regarding recycling of the individual raw materials. Brick seems to provide some benefits compared to the other materials in-

vestigated in this research. Physical characteristics are the key with regard to reusing the finished material. This is where concrete provides the most favorable setting.

When having a closer look at the mass balance, we find that the currently produced amount of wall construction materials is roughly equivalent to the amount of generated masonry rubble. Thus, reuse in primary products can only account for a certain portion of generated quantities. However, the knowledge and expertise with respect to the specifications required for this purpose needs to be gained first; the same applies to related technological solutions. In the case of concrete, produced quantities clearly surpass the volumes of concrete rubble generated during demolition. This is why its recycling and the associated increase in resource efficiency appear to be feasible. Concrete rubble can also replace natural mineral aggregates used in the construction of road pavements. Two sectors have thus been identified whose material absorption capacities should be sufficient for the next ten years or more.

Characteristics of recycled construction materials

In terms of their composition and physical characteristics, construction materials recycled from concrete provide a quality standard that makes them suitable for use in concrete production or functional layers of road pavements. They mainly consist of concrete particles and natural mineral aggregates that together account for over 80 wt.-%. The materials' impact, abrasion and freeze-thaw resistance parameters are lower than those of primary natural aggregates, but still sufficiently high. Construction materials recycled from masonry rubble are much more heterogeneous than materials recycled from concrete. Its main constituents include concrete and brick. Furthermore, they contain natural aggregates, other wall building materials, lightweight materials, mortar and (partly gypsum-based) render as well as small amounts of asphalt. Due to the greater porosity of wall building materials compared to concrete, deficits may occur especially with respect to their grain strength and resistance to freeze-thaw cycles.

Particular attention needs to be paid to gypsum-based building materials because of their secondary constituents occurring in such materials in the recycled state, which may adversely affect both structural characteristics and the environment. An analysis of 25 test logs published on the Internet revealed that all but one samples of recycled materials intended to be used in road construction contained only small amounts of leachable sulfate. Construction materials recycled from masonry rubble for use in earthworks and backfilling exhibited significantly higher sulfate ratios.

When analyzing the chemical composition of recycled construction materials, we find that the differences that originally existed between the chemical compositions of the individual types of construction materials have been reduced. Particularly for materials recycled from masonry rubble, the process of blending the individual wall construction materials that begins as early as in the building and continues right to the processing stage leads to a phenomenon referred to as "auto-homogenization".

Recycling matrix and required technologies

Construction materials recycled from concrete can be reused in their unprocessed state for producing base courses as well as for the manufacture of new concrete. For these areas of use, technical specifications and quality requirements in relation to water management have been defined. Currently available processing technologies are suitable for producing recycled construction materials based on concrete rubble that conform to the quality requirements for these sectors.

Construction materials recycled from masonry rubble can be reused in their unprocessed state only to a limited extent. Up to certain specified ratios, brick and sand-lime brick particles may be present as secondary constituents in materials for base courses or in recycled mineral aggregates. Pure brick minerals can also be reused in vegetation technology. There are two concepts for reusing masonry rubble or its constituents as raw materials: Firstly, masonry rubble is separated according to the individual types of construction material and used in so-called material sub-streams as a raw material substitute for the production of the relevant building material. Secondly, mixed masonry rubble can serve as a raw material under the condition that it meets the raw material requirements for certain specified products.

Currently, there is very little information available on raw material substitution according to the concept of material sub-streams. However, this limited information permits the conclusion that recycled materials can hardly replace more than 20% of natural raw materials. Furthermore, specifications for substitutes have not yet been defined. If mixed masonry rubble is to be used as an input material, its chemical composition makes it possible to assess its suitability for either ceramic products or pozzolanic admixtures. Laboratory tests revealed that it is suitable for producing lightweight aggregates that are usually manufactured from expandable clays, provided an expanding agent is added. When considering its use as a pozzolanic material, an increase in the specific surface area alone will not lead to sufficient reactivity of the material. Improvements may be achieved if the material is heat-treated to create reactive, amorphous phases.

Scenarios for recycling

Three reuse scenarios were developed on the basis of the recycling and reuse matrix for the constituents of construction debris. *Scenario 1* includes processing and reuse according to the current state of the art. Building materials recycled from concrete are reused in road construction and/or for concrete production. Only a minor portion of brick particles is manually picked from the masonry rubble in order to be used in vegetation technology applications such as green roofs, gravel turfs or tree substrates. The major part of masonry rubble is used either directly on the demolition site or, in the crushed state, for backfilling purposes on other sites. A certain amount of masonry rubble can also be reused as a raw material for producing lightweight mineral aggregates.

In *Scenario 2*, concrete rubble is processed and reused as described in Scenario 1. For masonry rubble, it is assumed that brick particles smaller than 8 mm in size are separated from the masonry rubble in an optical sorting step. This process makes at least this part of the material suitable for reuse both for gravel turfs, tree substrates or green roofs and as a constituent of base courses or recycled mineral aggregates. Furthermore, brick particles can be ground to sizes under 150 µm and reused as a raw material for brick production. Masonry particles smaller than 8 mm would again be suitable for the manufacture of lightweight aggregates. Other types of reuse would have to be identified for particles in excess of 8 mm that mainly consist of minerally bound wall construction materials and are not suitable for this purpose due to their chemical composition.

In Scenario 3, construction materials recycled from concrete rubble are treated in the same way as described above. No new processing techniques are used to separate the cement paste as long as there are no attractive reuse options for this secondary product. Masonry rubble is crushed in such a way that it contains only a minor amount of fines. Particles under 8 mm in size that are generated nonetheless are

used as a raw material for producing lightweight aggregates and/or pozzolanic admixtures as far as possible from a technological point of view. Coarse fractions are divided into brick, sand-lime, aerated concrete, lightweight concrete, mortar and render in a multi-stage, sensor-based sorting sequence. All material fractions are reused according to the concept of material sub-streams. A certain portion of the remaining brick particles is used in recycled building materials for base courses or for concrete production and vegetation technology. Sand-lime particles that are greater than 8 mm can also be used in these fields to a lesser extent. These options are not available for aerated concrete, lightweight concrete, mortar and render.

It is questionable whether the marked differentiation introduced in Scenario 3 is useful from all of the above-described perspectives because any reuse would require a sufficiently dense network of customers who accept these materials. Masonry-based materials require certain locations especially if they are intended to be reused in primary products, which might result in commercially unviable transport distances. This disadvantage could be partially overcome by combining product distribution logistics with a return logistics system.

Outlook

Both research and the production and utilization of recycled construction materials need to be encouraged to continuously improve the recycling of building materials beyond its current stage and to increase its contribution to saving mineral resources. Research activities should concentrate on the following topics:

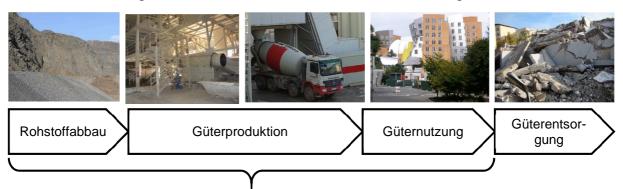
- Systematic analysis of quality control logs, including influences of specific configurations of plant and equipment on the quality of recycled materials
- Continuous improvement of quality control schemes whilst paying particular attention to the heterogeneity of recycled materials
- Continuous improvement of specifications and standards for concrete production
- Development of solutions for sorting and determining material-related requirements as a prerequisite for implementing material sub-streams
- Development of techniques for the separation of gypsum plasters and floor screeds
- Development of technologies to reuse the raw materials contained in mixed construction waste, including installation of pilot plants
- Development of methods to assess the recyclability of newly developed construction materials or composites

Without targeted funding and support, it will be very difficult for recycled construction materials to gain significant ground against conventional materials within the envisaged timeframe. Thus, the experience gained in the renewable energy sector should be transferred to recycled building materials. Targeted funding initiatives could be devised to provide, for instance, tax incentives for the production and use of such materials in order to increase their overall share. Economic studies should be conducted to determine the most appropriate measures in this regard.

1 Einleitung

Ressourceneffizienz auf dem Sektor der abiotischen, nichtenergetischen Rohstoffe steht ausdrücklich im Mittelpunkt des vom Bundeskabinett im März 2012 beschlossenen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess. Das Ziel ist es, die Rohstoffproduktivität vom gegenwärtigen Stand auf 200 % im Jahre 2020 zu steigern. Bei einfacher Extrapolation der vorliegenden Daten auf das Jahr 2020 ergibt sich eine Rohstoffproduktivität von 184,3 %. Mit "Buisness as usual" kann das Ziel also nicht erreicht werden. Vielmehr müssen neue Wege beschritten werden, für die eine Reihe von Handlungsansätzen gegeben werden.

Das nachhaltige Stoffstrommanagement entlang der Wertschöpfungskette im Bausektor (Abbildung 1) bezieht sich gegenwärtig hauptsächlich auf den Rohstoffabbau sowie die Güterproduktion. Auf diesen Sektoren liegt auch der Schwerpunkt der Forschung. Produktentwicklungen zielen darauf ab, Vorteile bei der Güternutzung zu erreichen, beispielsweise im Hinblick auf die Wärmedämmeigenschaften. Jüngstes Beispiel sind Ziegel mit porosiertem Scherben oder Leichtbetonsteine, deren Hohlräume zusätzlich mit wärmedämmendem Material gefüllt sind. Das macht eine zusätzliche Dämmung der Außenwände von Gebäuden überflüssig.



Traditioneller Schwerpunkt der Forschung

Abbildung 1: Wertschöpfungskette des Bausektors (Bildquellen: A. Müller)

Die positiven Effekte während der Nutzung können durch fehlende Verwertungsmöglichkeiten am Nutzungsende konterkariert werden, weil die Phase der "Güterentsorgung" am Nutzungsende bisher kaum einbezogen wird. Im Kreislaufwirtschaftsgesetz ist eine Rangfolge für den Umgang mit Abfällen vorgegeben. Die Vermeidung steht an erster Stelle, die Beseitigung an letzter. Dazwischen liegen die Stufen "Vorbereitung zur Wiederverwendung", "Recycling" und "sonstige Verwertung insbesondere thermische Verwertung und Bergeversatz". Die Abfallvermeidung muss bereits im Entwurf von Bauwerken berücksichtigt werden und ist deshalb bei vorhandener Bausubstanz nicht realisierbar. Die Vorbereitung zur Verwendung bedeutet, dass Massenbaustoffe nach dem sorgfältigen Rückbau im "Manufakturbetrieb" für den Wiedereinsatz vorbereitet werden. Eine solche Aufarbeitung scheint für den gesamten, gegenwärtig anfallenden Stoffstrom an Bauabfällen kaum möglich. Da die thermische Verwertung für mineralische Baustoffe ohne nennenswerte organische Anteile nicht in Frage kommt und der Bergeversatz sowie die Beseitigung keine Kreislaufwirtschaft darstellen, kann nur das an dritter Stelle der Hierarchie stehende "Recycling" für die Realisierung der Kreislaufwirtschaft genutzt werden. Dafür sind Verfahren erforderlich, die zum Teil aus der Primärrohstoffverarbeitung übernommen werden können oder speziell für Bauabfälle entwickelt werden müssen.

Das erklärte Ziel der Steigerung der Ressourceneffizienz kann auf verschiedenen Wegen erreicht werden:

- Auf der Roh- und Baustoffebene nimmt die Kreislaufwirtschaft eine Schlüsselstellung ein.
- Auf der Bauwerksebene stehen der Erhalt des Bauwerksbestands und der Übergang zu ressourcenschonenden, in der Regel leichteren Konstruktionen im Mittelpunkt.

Der Ersatz von abiotischen durch biotische Rohstoffe ist nur in begrenztem Umfang möglich. Dagegen ist die Nutzung von Stoffströmen aus dem Rückbau von vorhandenen Bauwerken für die Errichtung von neuen Objekten ausbaufähig. Das betrifft zum einen die Herstellung von Recycling-Baustoffen, wie sie gegenwärtig erfolgt. Zum anderen muss das Potenzial von Stoffströmen, die aus heutiger Sicht ungeeignet sind, einbezogen werden. Eine Möglichkeit besteht darin, sie als Rohstoffsubstitut in die Wertschöpfungskette der Baustoffhersteller zurückzuführen. Auf diese Weise kann der Verbrauch mineralischer Rohstoffe bereits in vorgelagerten Prozessen vermindert werden.

Der vorliegende Bericht konzentriert sich auf die Herstellung und die Leistungsfähigkeit von Recycling-Baustoffen nach dem Stand der Technik. Die Voraussetzungen, Bauabfälle als Rohstoffsubstitut bei der Neuproduktion von Baustoffen einzusetzen, bilden den zweiten Schwerpunkt.

Als Beginn des Baustoffrecyclings unter dem Gesichtspunkt der Ressourcenschonung können etwa die 1980er Jahre ausgemacht werden. Stationäre Recyclinganlagen mit umfangreicher Maschinenausstattung entstanden, die zum überwiegenden Teil noch heute in Betrieb sind. Aus dieser Zeit liegen Forschungsberichte, die mit Mitteln des Bundesministeriums für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau gefördert wurden, zu den Themen Aufbereitung von Bauabfällen und Recycling von Beton vor (Ivanyi/Lardi/Esser 1985, Schulz/Wesche 1986, Willkomm 1988, Michels 1988). In der früheren Fachliteratur wird häufig über nasse Sortierverfahren wie Hydrobandscheider und Setzmaschinen, die in Recyclinganlagen eingesetzt wurden, berichtet (Rohr 1987, Schütze 1987, Jungmann/Neumann 1991, Kellerwessel 1993, Derks/Moskala/Schneider-Kühn 1997). Die in diesen Quellen gemachten Aussagen werden in die Auswertung zu den Verwertungswegen für die Bestandteile von Bauabfällen einbezogen.

Werden die genannten Veröffentlichungen zugrunde gelegt, so sind in den zurückliegenden 30 Jahren in Bezug auf die Entwicklung von Aufbereitungs- oder Verwertungsverfahren für Bauschutt oder bestimmte Bauschuttbestandteile nur geringe Fortschritte gemacht worden.

2 Konzept zur Systematisierung der Einbindung in Stoffkreisläufe

Hochbauten stellen eine Aggregation verschiedenster Baustoffarten dar. Enthalten sind mineralische Baustoffe, welche Tragfunktionen übernehmen, Baustoffe, welche vor Feuchtigkeit, Verwitterung oder vor Wärmeverlusten schützen, (Aus-) Baustoffe, welche das Gebäude erst gebrauchstauglich machen und Baustoffe mit eher ästhetischen Funktionen. Der Baustoffbestand in Wohngebäuden, berechnet auf der Basis von drei unterschiedlichen Quellen, ist in Abbildung 2 dargestellt. Übereinstimmung besteht in der "Zusammensetzung" nach Baustoffarten. Die Masseanteile unterscheiden sich ebenfalls nicht grundsätzlich, so dass folgende Abstufung festgestellt werden kann:

- Baustoffe mit Anteilen von 10 bis 100 Masse-%: Beton, Ziegel einschließlich anderer mineralischer Wandbaustoffe
- Baustoffe mit Anteilen von 1 bis 10 Masse-%: Gips, Holz und Stahl
- Baustoffe mit Anteilen von 0,1 bis 1 Masse-%: Glas, Kunststoffe, Dämmstoffe
- Baustoffe mit Anteilen < 0,1 Masse-%: gemischte Metalle, Sonstiges.

Bei den Dämmstoffen fällt ein Unterschied auf, der methodisch bedingt ist. Während das von Doka 2000 entwickelte Mustergebäude die im Baubestand vorhandenen Gebäude repräsentieren soll, beziehen sich die Angaben von Weber-Blaschke/Faulstich 2005 auf aktuelle, in den vergangenen 10 Jahren errichtete Gebäude. Die Werte von Deilmann 2014 bilden den Bestand ab und beziehen sich auf Wohn- und Nichtwohngebäude. Bei den Hauptbestandteilen bestehen nur geringe Unterschiede.

Der Anteil der mineralischen Baustoffe

- Beton
- Mörtel
- Wandbaustoffe: Leichtbeton, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton
- Gips
- Mineralisches Dämmmaterial

am Materialbestand beträgt etwa 95 Masse-%. Folglich geht von diesen Baustoffen das größte Ressourceneffizienzpotenzial aus. Sie fallen in den unmittelbaren Produktverantwortungsbereich der Baustoffindustrie und sollen den Schwerpunkt der Untersuchungen bilden.

Der Anteil von Holz und Kunststoffen sowie Metallen beträgt ungefähr 5 Masse-%. Diese Materialien finden nicht ausschließlich im Bauwesen Anwendung. In anderen Branchen sind bereits Lösungen für das Recycling entwickelt worden, auf die zurückgegriffen werden kann, sofern diese Materialien aus dem Stoffstrom "Bau" abgetrennt werden können. Das gleiche gilt für Glas, das in den z.Z. rückgebauten Gebäuden nur zu einem geringen Anteil vorhanden ist.

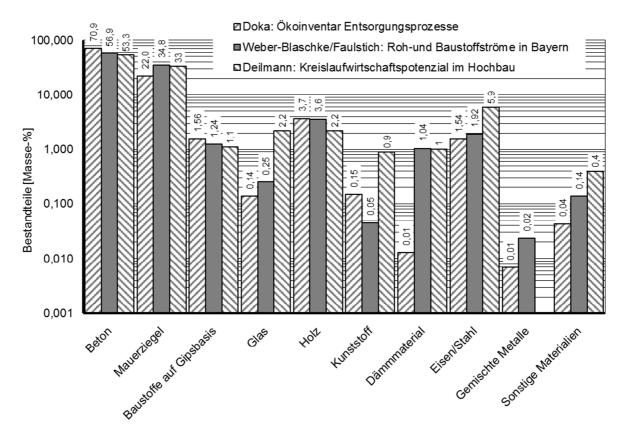


Abbildung 2: Materialarten und deren Anteile in Wohngebäuden (Quelle: Eigene Darstellung nach Doka 2000: Seite 114, Weber-Blaschke/Faulstich 2005: Seite 10) bzw. in Wohn- und Nichtwohngebäuden (Deilmann 2014: Tabelle 5)

Der unterschiedliche Stand in Bezug auf die Mengen und die Verwertungsmöglichkeiten wird bei der Bearbeitung berücksichtigt. Für die mengenmäßig dominierenden,
mineralischen Bauabfallbestandteile wird eine Verwertungsmatrix entwickelt, mit der
die Varianten ihrer Einbindung in geschlossene Stoffkreisläufe systematisiert werden
sollen. In diese Matrix werden vorhandene ebenso wie potenzielle Einsatzgebiete für
die Hauptbestandteile von Bauabfällen in Abhängigkeit von der Materialzusammensetzung, der chemischen Zusammensetzung, der Partikelgröße bzw. deren Verteilung zusammengefasst. Es ist davon auszugehen, dass die Verwertungsmatrix leere
Felder aufweisen wird. Ziel der anschließenden Recherchen und Überlegungen ist
es, Produkt- und Technologieentwicklungen zu eruieren, um diese Felder schrittweise auszufüllen.

Für jeden Baustoff werden die Partikelgröße und die Sortenreinheit als Variable in der Matrix berücksichtigt. Diese beeinflussen die Verwertung entscheidend und können - falls erforderlich - angepasst werden. In den Matrizen werden sowohl solche Verwertungswege aufgenommen, die als Stand der Technik bezeichnet werden können bzw. für die bau- und umwelttechische Produktnormen existieren, als auch solche, bei denen lediglich umwelttechnische Anforderungen bestehen. Verwertungswege, die noch im Entwicklungsstadium sind, werden einbezogen. Für die zweite Gruppe der Bestandteile - Holz, Kunststoffe, Metalle und Glas - stehen die Sortiertechniken zur Abtrennungen aus dem Bauabfallstrom im Mittelpunkt.

Bei der Schaffung von Stoffkreisläufen wird insbesondere in der Kunststoffindustrie unterschieden zwischen

- Werkstoff-Recycling, bei dem die chemische Struktur nicht verändert wird,
- Rohstoff-Recycling, bei dem die Polymerketten gespalten werden, und
- Energetischer Verwertung.

Dieses Konzept wird sinngemäß auf das Recycling von mineralischen Bauabfällen übertragen. Es wird zwischen werkstofflicher und rohstofflicher Verwertung unterschieden (Abbildung 3). Unter werkstofflicher Verwertung wird die Verwertung unter Inanspruchnahme werkstofflicher Eigenschaften wie Kornfestigkeit, Frost-Tau-Widerstand etc. verstanden. Bei der rohstofflichen Verwertung erfolgt die Verwertung in einem stoffumwandelnden Prozess. Die chemische Zusammensetzung, die vorhandenen Mineralphasen und weitere Parameter wie die Reaktivität nehmen eine Schlüsselstellung ein. Werkstoffliche Eigenschaften rücken in den Hintergrund.



Abbildung 3: Definitionen zu den Verwertungsmöglichkeiten von mineralischen Bauabfällen

Am Beispiel von Glas können beide Verwertungsvarianten anschaulich dargestellt werden. Der Einsatz von zu Körnungen aufbereitetem Altglas in Tragschichten des Straßenbaus wäre eine werkstoffliche Verwertung, die in Deutschland allerdings ohne Relevanz ist. In Ländern, in denen Sammelsysteme bestehen, die Abnahme des gesammelten Altglases aber nicht gesichert ist, gibt es dazu Forschungen und Anwendungsbeispiele. Wird das Altglas zu Behälterglas, Schaumglas oder Leichtgranulaten verarbeitet, durchläuft es einen erneuten Schmelz- bzw. Sinterprozess. In diesem Fall liegt eine rohstoffliche Verwertung vor. Der Einsatz von Altglas als Sinterhilfsmittel bei der Ziegelherstellung gehört ebenfalls zu den rohstofflichen Verwertungen.

Der Entwurf der Verwertungsmatrix ist in Abbildung 4 dargestellt. Die Matrix ist in die Abschnitte "Werkstoffliche Verwertung" und "Rohstoffliche Verwertung" unterteilt. Sie enthält die Variablen "Materialzusammensetzung" und "Partikelgröße". Die Zusammensetzung wird zwischen "sortenrein" und "Stoffgemisch" variiert. Als Gemisch wird die aus Prüfprotokollen und eigenen Untersuchungen berechnete mittlere Zusammensetzung von Recycling-Baustoffen aus Beton bzw. Mauerwerkbruch verwendet. Bei der Partikelgröße werden sowohl Körnungen als auch Korngemische betrachtet. Bei der rohstofflichen Verwertung wird die Rückführung in das ursprüngliche Produkt, aber auch die Nutzung als Rohstoff für andere Produkte geprüft. Bei der Verwertung als Rohstoff tritt zumindest die Variable "Partikelgröße" in den Hintergrund. Im Vordergrund stehen hier Angaben zur chemischen Zusammensetzung, wobei die Gehalte an Hauptoxiden und Nebenoxiden sowohl der reinen Baustoffe als auch der Gemische für die Auswahl geeigneter Verwertungsoptionen entscheidend sind. Diese

Angaben werden zum größten Teil aus eigenen Untersuchungen zusammengestellt. Ggf. werden Anfragen bei Industrieverbänden als zusätzliche Quelle genutzt.

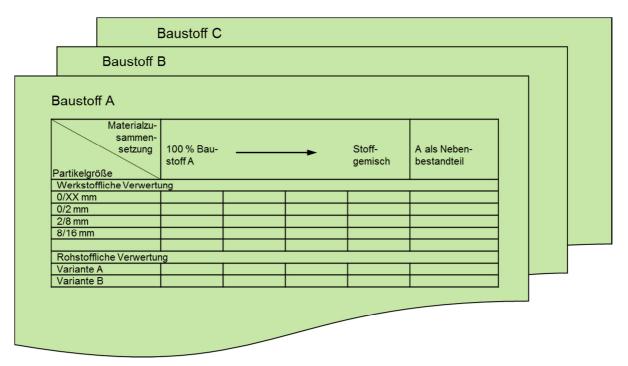


Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau der Verwertungsmatrix

Auf der Basis der Verwertungsmatrix soll ein einfaches Werkzeug für den Vergleich der Verwertungswege entwickelt werden. Dabei werden der verwertbare Anteil eines Baustoffs oder Bauelements und der erforderliche produktbezogene Energieaufwand für die Aufbereitung berücksichtigt, indem ein Bezug des Energieaufwands auf die Ausbeute an verwertbaren Produkten vorgenommen wird. Die günstigsten Voraussetzungen hat ein Betonbruch ohne Fremdbestandteile, der zu Tragschichtmaterial aufbereitet und somit vollständig verwertet wird. Der erforderliche Energieaufwand kann hier auf den Materialinput der Aufbereitungsanlage, der dem Output zur Verwertung entspricht, bezogen werden. Immer wenn dieser kleiner als der Input ist, erhöht sich der produktbezogene Energieaufwand. Ist der Beton beispielsweise mit einem Gipsputz versehen, der nach der Aufbereitung mit der Fraktion 0/4 mm ausgeschleust werden kann, ist die erzeugte Produktmenge geringer als der Input. Daraus resultiert ein höherer spezifischer Energieaufwand.

Parallel zur Identifizierung der Verwertungswege muss die Aufnahmekapazität der Verwertungswege geprüft werden. Ausgangspunkt ist eine summarische, auf ganz Deutschland bezogene Betrachtungsweise, bei welcher die beiden Seiten

- Menge an entstehendem Bauschutt möglichst differenziert nach Baustoffarten und
- Aufnahmepotenzial der für die Verwertung geeigneten Sektoren

gegenübergestellt werden (Abbildung 5).

Die entstehenden Mengen an Bauschutt aus dem Hochbau können den Monitoringberichten der Steine- Erden-Industrie entnommen werden. Die Aufteilung in Betonbruch und Mauerwerkbruch wird unter Nutzung der Angaben des Statistischen Bundesamtes vorgenommen. Eine Überprüfung erfolgt anhand der Verwertungssektoren, entnommen aus den Umfragen von Krass u.a. 1993/1995/1997/1999/2006. Ggf.

werden weitere Abschätzungen zu den Anteilen von Beton- und Mauerwerkbruch im Bauschutt, die in der Literatur nachvollziehbar dokumentiert sind, herangezogen. Mit diesem Vorgehen kann bestenfalls zwischen Beton- und Mauerwerkbruch unterschieden werden. Eine weitere Differenzierung des Mauerwerkbruchs in seine Bestandteile erfolgt anhand einer mittleren hypothetischen Zusammensetzung. Diese wird aus den Produktionsstatistiken für den Zeitraum von 1950 bis heute berechnet.

Als potenzielle Verwertungssektoren werden zunächst die Rückführung in die Produktion von Wandbaustoffen und die Herstellung von Betonen betrachtet. Das Aufnahmepotenzial folgt aus den aktuell produzierten Mengen. Für den Beton wird eine Differenzierung in Transportbeton, Betonwaren und Betonfertigteile vorgenommen. Eine Plausibilitätsprüfung erfolgt anhand des Rohstoffverbrauchs dieser Branchen. Ergeben sich durch das rohstoffliche Recycling weitere Möglichkeiten der Verwertung, wird versucht, auch dafür das Aufnahmepotenzial zu ermitteln.

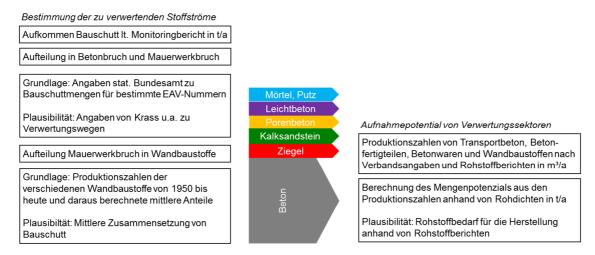


Abbildung 5: Vorgehensweise bei der Gegenüberstellung von Abfallströmen zur Verwertung und potenziellen Aufnahmekapazitäten

Die summarische Betrachtungsweise muss im nächsten Schritt auf eine regionale Betrachtungsweise heruntergebrochen werden. Für die hier angestellten Betrachtungen war das nur schematisch möglich, weil die Verwertungsmöglichkeiten für eine Reihe von Bestandteilen von Bauabfällen erst entwickelt werden müssen.

3 Stand der Technik und Entwicklungen bei der Aufbereitung von Bauabfällen

3.1 Aufbereitungsanlagen

Die Aufgabe der Aufbereitung besteht darin, aus den mineralischen Bauabfällen Recycling-Baustoffe mit definierten Eigenschaften zu erzeugen. Zum einen betrifft das die Partikelgrößenzusammensetzung, die den Anforderungen des jeweiligen Einsatzgebietes entsprechen muss. Zum anderen müssen die Materialzusammensetzung und bestimmte physikalische Merkmale eingehalten werden, insbesondere wenn die Gesteinskörnung im klassifizierten Straßenoberbau oder im Betonbau angewendet werden soll. Zur Aufbereitung werden die Grundoperationen der mechanischen Verfahrenstechnik Zerkleinern - Klassieren - Sortieren genutzt. Die verwendeten Maschinen entsprechen im Wesentlichen denen, die bei der Aufbereitung von natürlichen Gesteinen eingesetzt werden. Bei der Sortierung werden neben den in den Verfahrensablauf eingeordneten Techniken zusätzliche Schritte vorgelagert, um die Sortenreinheit des Materialinputs zu verbessern. Durch den selektiven Rückbau und/oder die Vorsortierung auf der Abbruchbaustelle wird eine Trennung zumindest nach Beton, Mauerwerk und Störstoffen vorgenommen (Abbildung 6). Als weiterer Schritt zur Verbesserung der Inputqualität dient die getrennte Annahme nach Beton, Mauerwerk und unsortiertem Material auf der Recyclinganlage.



Abbildung 6: Abbruchbaustelle mit vorsortiertem Bauschutt (Bildquelle: A. Müller)

Die Aufbereitung von Bauabfällen kann in mobilen oder stationären Anlagen erfolgen. Bei der einfachsten technologischen Variante, wie sie in mobilen Brechanlagen realisiert wird (Abbildung 7 links), wird das Aufgabematerial zunächst durch Vorabsiebung in zwei Fraktionen getrennt. Das Grobgut wird dem Brecher zugeführt und zerkleinert. Ein nach dem Brecher angeordneter Überbandmagnet entfernt die Eisenteile. Als Produkte entstehen bei dieser Aufbereitungstechnologie das sogenannte Vorsiebmaterial und der eigentliche Recycling-Baustoff. Die Zusammensetzung des Recycling-Baustoffs entspricht im Wesentlichen der des Aufgabematerials, da mit

dieser Variante nur die Korngröße beeinflussbar ist und eine direkte Einflussnahme auf den Materialbestand nicht möglich ist.

Anspruchsvollere Technologien für die Aufbereitung von Bau- und Abbruchabfällen sind in stationären Anlagen realisierbar. Als Beispiel ist in Abbildung 7 rechts eine Technologie mit den folgenden, zusätzlichen Aufbereitungsschritten dargestellt:

- Zweistufige Zerkleinerung: Prallbrecher im Anschluss an einen Backenbrecher
- Aussortieren von Störstoffen am Sortierband
- Herstellung von Korngruppen mittels Vibrationssiebung.

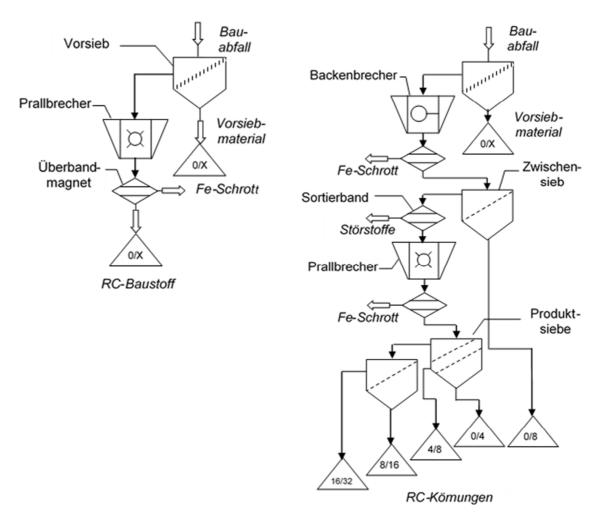


Abbildung 7: Vereinfachte Verfahrensfließbilder einer mobilen Aufbereitungsanlage für mineralische Bauabfälle (links) und einer stationären Aufbereitungsanlage (rechts) (Quellen: Müller/Lander 2000, Müller 2003)

Zusätzlich zu der händischen Sortierung können in stationären Anlagen Sortierprozesse in den Verfahrensablauf integriert werden. Durch eine Windsichtung lassen sich leichte Störstoffe abscheiden. Eine Nasssortierung ermöglicht die Trennung eines Baustoffgemisches nach der Dichte. Eine Beeinflussung des Materialbestandes ist somit in bestimmten Grenzen möglich.

Der Energiebedarf für die Aufbereitung setzt sich aus dem Energiebedarf der mobilen Geräte zur Vorzerkleinerung und Beschickung, der Zerkleinerungs- und Klassiermaschinen sowie der Aufgabeeinrichtungen und Förderbänder zusammen (Tabelle 1). Nach Angaben aus drei neueren Quellen liegt der mittlere Energiebedarf bei etwa

21 MJ/kg Aufgabematerial, wobei nur die Anlagenkonfigurationen von Spyra/Mettke und Quattrone/Angulo/John vergleichbar sind. Einen großen Anteil am Energieverbrauch haben die mobilen Geräte und die Förderbänder. Weite Transportwege und Zwischenlager sind also möglichst zu vermeiden.

Tabelle 1: Energiebedarf für die Aufbereitung nach Literaturangaben

Quelle	Spyra/Mettke 2010: Seite 32	Rübner/Herbst/Schneider/Beck 2013: Tabelle 3, Anhang	Quattrone/Angulo/ John 2014
Berücksichtigte Aggregate	Bagger zur Vorzer- kleinerung, Radla- der, Backenbrecher, Prallbrecher, För- derbänder, Siebma- schinen, Schubwa- gen, Rüttler, Über- bandmagnet, Hei- zung, Beleuchtung	Bagger Aufgabebunker, Vorsieb, Bre- cher, Sieb	Radlader Backenbrecher, Prallbrecher, "Fee- der", Überbandmag- net, Siebmaschine, Förderbänder
Energiebedarf [MJ/t Aufgabemateri- al]	19,5	20,6	22,2
Produktausbeute an rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonherstellung	> 2 mm: 80 Masse-%	Keine Angabe	> 4,8 mm: 60 Masse-%

Zerkleinerung von mineralischen Bauabfällen

Der erste Verfahrensschritt bei der Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen ist die Zerkleinerung. Sie hat die Aufgabe nach der Größe abgestufte Körnungen zu erzeugen. Weiter dient sie der Trennung von Verbundmaterialien, um anschließend eine Sortierung vornehmen zu können. In der Hauptsache werden Backen- und Prallbrecher, die auch in der Natursteinaufbereitung zum Einsatz kommen, verwendet. Die Zuführung des Aufgabematerials erfolgt über einen Rollenrost oder ein Plattenband, wobei das feinkörnige Material, das aus Bodenpartikeln und leicht zerkleinerbaren Bestandteilen des Bauschutts besteht, bereits vor dem Brecher abgetrennt wird. Der Austrag des Brechprodukts muss so gestaltet sein, dass sperriges Austragsgut keine Verstopfungen bzw. Beschädigungen des unter dem Brecherauslauf angeordneten Austragsbandes hervorruft.

Aus Prüfprotokollen, die im Rahmen der Fremdüberwachung von Recycling-Baustoffen zur Verwendung in Frostschutzschichten oder in Schottertragschichten für den Straßenoberbau erstellt und von Recycling-Unternehmen veröffentlicht wurden, können u.a. die Sieblinien der Korngemische entnommenen werden. Sie zeigen eine große Bandbreite der Verteilungen (Abbildung 8). Der Anteil an Körnungen < 4 mm bewegt sich zwischen 20 und 40 Masse-%. Aufbereiteter Mauerwerkbruch weist einen noch höheren Feinkornanteil auf (Abbildung 9). Der Anteil an Partikeln < 4 mm kann bis zu 50 Masse-% betragen. Ein geringerer Feinkornanteil kann mit Brechern erreicht werden, bei denen eine andere Beanspruchungsart realisiert wird. Bei einer Zerkleinerung von Ziegelbruch mit einem Fräsbrecher, der überwiegend für die Asphaltaufbereitung eingesetzt wird, entstand ein deutlich geringerer Anteil der Fraktion < 4 mm von 16 Masse-% im Vergleich zu den Körnungen aus mit Prall- bzw. Backenbrechern ausgerüsteten Recyclinganlagen.

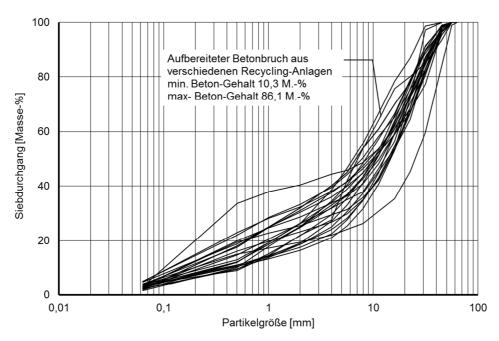


Abbildung 8: Sieblinien von zu Frostschutz- oder Schottertragschichtmaterial aufbereitetem Betonbruch (Quelle: Eigene Darstellung nach Prüfprotokollen)

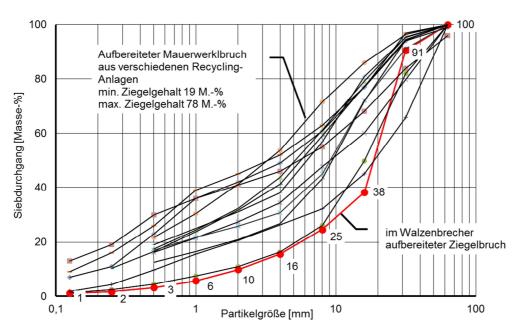


Abbildung 9: Sieblinien von in Recyclinganlagen aufbereitetem Mauerwerkbruch im Vergleich zu einer im Walzenbrecher aufbereiteten Probe aus Ziegelbruch (Quelle: Eigene Darstellung nach Karnuth 2003: Anhang D 2, Müller 2010)

Klassierung von mineralischen Bauabfällen

Der zweite Verfahrensschritt der Bauschuttaufbereitung ist die Klassierung. Siebmaschinen, die nach dem Brecher angeordnet sind, dienen

- der Begrenzung der oberen Korngröße oder der Erzeugung bestimmter Korngrößenverteilungen bzw. Fraktionen für die nachfolgende Verwendung, z.B. als Tragschichtmaterial 0/32 mm oder als rezyklierte Gesteinskörnung 16/32 mm.
- der Vorbereitung der Sortierung, wenn diese nur bei engem Kornband möglich ist.
- ggf. der Sortierung selbst, wenn bestimmte Stoffe in bestimmten Kornfraktionen angereichert sind.

In der Regel werden Wurfsiebmaschinen eingesetzt, deren Siebböden durch Exzenterantriebe oder Unwuchtmotoren in Vibrationen versetzt werden. Damit sind Siebungen bis in den Sandbereich möglich. Allerdings besteht bei feinen Körnungen ein starker Einfluss der Materialfeuchte, durch die es zum "Erblinden" des Siebbodens, zur Abnahme des Durchsatzes und zur Verschlechterung der Trenngüte kommen kann.

Sortierung von mineralischen Bauabfällen

Die Sortierung als dritter Verfahrensschritt beginnt mit dem gezielten Stoffstrommanagement beim Abbruch der Bauwerke, um so eine Trennung in Beton- bzw. Stahlbetonbruch und Mauerwerkbruch zu erreichen (Abbildung 10). Anschließend besteht in Abhängigkeit von den Gegebenheiten auf der Abbruchbaustelle die Möglichkeit, dass mit speziellen Zangen ausgerüstete Bagger die Bewehrung vom Beton trennen. Beim Mauerwerkbruch wird in der Regel keine weitere Vor-Ort-Behandlung vorgenommen. Das Aufnehmen und Verladen erfolgt häufig mit Sieblöffeln, um die bereits durch die Beanspruchungen beim Abbruch abgetrennten Mörtel und Putze auszuschleusen.





Abbildung 10: Gebäudeabbruch mit gezielter Trennung nach Materialarten (Bildquellen: A. Müller)

Die beim Abbruch von Bauwerken begonnene Trennung nach Materialarten wird bei der Verarbeitung fortgesetzt. In der Recyclingpraxis werden die beiden Kategorien Betonbruch und Mauerwerkbruch – ggf. weiter untergliedert nach Stückgrößen und Störstoffgehalten – von den Recyclingunternehmen getrennt angenommen und aufbereitet (Abbildung 11). Bei Mauerwerkbruch erfolgt zum Teil eine Aussortierung von Ziegeln vor der Aufbereitung, wenn daraus Ziegelkörnungen für vegetationstechni-

sche Anwendungen hergestellt werden sollen. Eine Sortierung in die verschiedenen Wandbaustoffarten vor oder im Anschluss an die Zerkleinerung wird bisher nicht durchgeführt. Ein Grund dafür ist, dass geeignete Sortiertechniken gegenwärtig noch nicht eingeführt sind. Die Trennung kann gegenwärtig nur mittels händischer Sortierung erfolgen.





Abbildung 11: Inputlager für Betonbruch (links) und Mauerwerkbruch (rechts) (Bildquellen: A. Müller)

Als Beispiel sind in Tabelle 2 die aktuellen Annahmegebühren eines Recyclingunternehmens dargestellt. Damit werden die Stoffströme in gewissem Umfang gesteuert. Die Arten von Bauabfällen, aus denen sich mit vergleichsweise geringem Aufwand verkaufsfähige Produkte herstellen lassen, werden mit geringen Annahmegebühren belegt. Ein Beispiel dafür ist Betonbruch in solchen Größen, die ohne Vorzerkleinerung aufgegeben werden können. Sehr großformatige Teile bedürfen einer Vorzerkleinerung. Das bedingt höhere Annahmegebühren. Für solche Bauschuttarten, bei welchen die Aufbereitung aufwendiger und der Verkauf schwierig ist, müssen höhere Annahmegebühren bezahlt werden.

Tabelle 2: Beispiel für die Annahmegebühren einer Bauschuttrecyclinganlage

Angeliefertes Material	EAV-Nummer	Annahmegebühr [€/t]
Bauschutt aus Ziegel, sauber	170102	14,20
Bauschutt mit Holz (< 5 %)	170102	25,00
Bauschutt, leicht verunreinigt	170102	25,00
Gemische aus Beton, Fliesen, Ziegel, Keramik	170103	14,20
Straßenaufbruch, bituminös	170302	3,00
Betonbruch bis 800 m Kantenlänge bew./unbew.	170101	4,00
Betonbruch 800 bis 2000 mm Kantenlänge unbewehrt	170101	10,00
Betonbruch 800 bis 2000 mm Kantenlänge bewehrt	170101	13,00
Beton > 2000 mm Kantenlänge	170101	20,00
Boden steinig siebfähig	200202	4,80
Boden steinig mit Bauschutt	200202	14,20

Im Verlauf der Aufbereitung dient die Sortierung hauptsächlich der Entfernung von Störstoffen. Bei der Windsichtung als trockenem Sortierverfahren wird das Zerkleinerungsprodukt mittels Klassierung zunächst in Fraktionen getrennt (Abbildung 12). Die groben Fraktionen werden dem Windsichter zugeführt. Leichte Störstoffe wie Folien, Pappe, Papier, Dämmstoffe, Kunststoffformteile und Holzstücke mit geringer Dichte werden mit einem gerichteten Luftstrom über eine Separationstrommel ausgeblasen. Zu den unteren Partikelgrößen der Materialströme und der Spannweite der Fraktionen, die in Recyclinganlagen, die mit Windsichtern ausgerüstet sind, gereinigt wer-

den, liegen unterschiedliche Angaben vor (Tabelle 3). Wird davon ausgegangen, dass im günstigsten Fall Körnungen ab 4 mm aufgegeben werden können und die in Abbildung 8 und Abbildung 9 dargestellten Sieblinien zugrunde gelegt, kann bei Betonbruch 60 bis 80 % des Materials gereinigt werden. Bei einer Aufgabekörnung ab 10 mm verringern sich die gesichteten Stoffströme auf 40 bis 60 %. Bei der Aufgabe von Mauerwerkbruch sind die mittels Windsichtung behandelbaren Teilströme noch geringer.

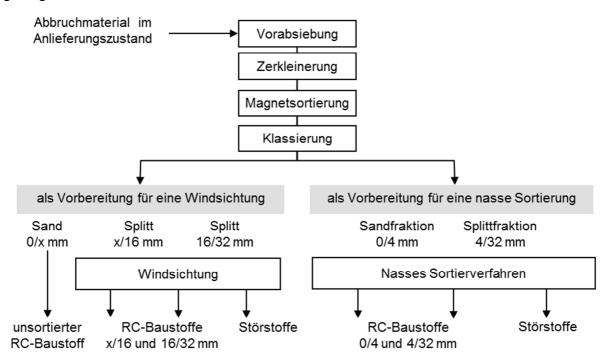


Abbildung 12: Technologische Abläufe zur Materialvorbereitung für eine Windsichtung bzw. eine nasse Sortierung

Tabelle 3: Übersicht von in verschiedenen Recyclinganlagen realisierte Aufgabekorngrößen für die Windsichtung

	Fraktionen zur Aufgabe in den Windsichter	Quelle
Recyclinganlage D (1)	4/8 mm, 8/16 mm,	Baustoff Recycling + Deponie-
	16/32 mm, 32/45 mm	technik 1994
Recyclinganlage D (2)	8/16 mm, 16/32 mm	Aufbereitungstechnik AT 1995
Recyclinganlage A	10/32 mm	Aufbereitungstechnik AT 1996
Recyclinganlage NL (1) Amsterdam	10/22 mm, 22/40 mm	Aufbereitungstechnik AT 1995
Recyclinganlage NL (2) Utrecht	4/8 mm; 8/16 mm,	Baustoff Recycling + Deponie-
	16/32 mm, 32/40 mm	technik 1995
Recyclinganlage NL (3) Rotterdam	20/40 mm, 40/80 mm	Van Bentum Recycling Centrale

Bei der Anwendung nasser Sortierverfahren kann das gesamte Kornband des Bauschutts sortiert werden. Die Sortierung der Sandfraktion bzw. der Splittfraktion erfolgt mit Hilfe von Maschinen, die nach dem gleichen Wirkprinzip arbeiten. Die Auslegung und die Einstellung der Verfahrensparameter müssen aber jeweils auf die aufgegebene Fraktion abgestimmt sein. Beispiele für nasse Sortierverfahren sind Hydrobandscheider (Aquamatoren), Setzmaschinen und Waschtrommeln. Sie sind Bestandteil von stationären Anlagen, die überwiegend in den 1980er Jahren errichtet wurden. Für die Nachrüstung von vorhandenen Anlagen oder für Neuanlagen mit integrierter Nasssortierung sind Beispiele aus Deutschland und der Schweiz bekannt.

Bei den o.g. nassen Sortierverfahren ist nicht die Baustoffart sondern die Dichte das Sortiermerkmal. Anhand der Dichteverteilung eines aufbereiteten Mauerwerkbruchs, der von einer Recyclinganlage entnommen wurde (Abbildung 13), kann das zu erwartende Trennergebnis vereinfacht dargestellt werden: Bei einer angenommenen Trenndichte von 1,7 g/cm³ und ideal scharfer Trennung bestünde das Schwergut aus einem Gemisch aus Estrich als schwerem Gipsbaustoff, Ziegeln, Leichtbetonen, Putzen, Mörteln und Betonen. Im Leichtgut wären Porenbeton, leichte Gipsbaustoffe und Leichtbetone angereichert. Wegen der Überschneidungen der Dichtebereiche sind selbst unter Annahme einer scharfen Trenngrenze keine in Bezug auf die Baustoffart einheitlichen Fraktionen herstellbar.

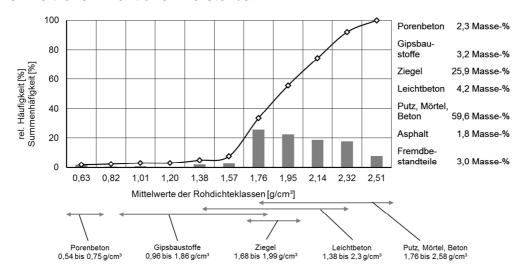


Abbildung 13: Dichteverteilung einer Körnung aus Mauerwerkbruch unter Zuordnung der Baustoffarten (Quelle: Müller/Schnell/Rübner 2013)

Angebotene Recycling-Baustoffe

Das Sortiment an Recycling-Baustoffen umfasst nach der Partikelgröße und der Baustoffart eingeteilte Recycling-Gesteinskörnungen und Korngemische, bei denen die gleichen Siebschnitte wie bei natürlichen Gesteinskörnungen gelten. Bei der Baustoffart wird zwischen Gesteinskörnungen aus Beton und solchen aus Mauerwerk unterschieden (Abbildung 14, Abbildung 15, Tabelle 4). Letztere werden zu deutlich niedrigeren Preisen angeboten. Vereinzelt werden von Recyclingunternehmen auch reine Ziegelkörnungen angeboten. Andere Wandbaustoffe werden bisher in den Preislisten von Recyclingunternehmen nicht explizit genannt.

Tabelle 4: Beispiel für die Produktpreise einer Bauschuttrecyclinganlage

Produkte		Produktpreise [€/t]
Recyclingprodukte aus Beton	RC-Brechsand 0/8 mm	5,50
	RC-Körnungen 8/16, 16/32, 32/45 mm, gewaschen	7,50
	RC-Korngemisch 0/45 mm, gewaschen, güteüberwacht	7,50
	RC-Korngemisch 0/45 mm	4,50
	RC-Überkorn > 45 mm	6,00
Recyclingprodukte aus Mau-	Pflastersand 0/8 mm	auf Anfrage
erwerk	RC-Körnungen 8/16, 16/32, 32/45 mm, gewaschen	auf Anfrage
	RC-Mineral 0/45 mm, gewaschen	4,00
	RC-Überkorn > 45 mm	4,00





Abbildung 14: Recycling-Baustoffe aus Betonbruch

Links: Korngemisch 0/45 mm zum Einsatz in Frostschutzschichten oder Schottertragschichten

Rechts: Rezyklierte Gesteinskörnung 16/32 mm (Bildquellen: A. Müller)





Abbildung 15: Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch

Links: Recycling-Baustoff aus Mauerwerkbruch ohne Sortierung

Rechts: Windgesichteter Recycling-Baustoff aus Mauerwerkbruch (Bildquellen: A. Müller)

Aussagen zur Entwicklung der Annahmegebühren sind aus der Gegenüberstellung von Preislisten von stationären Anlagen, die vor 2014/2015 gültig waren, mit den gegenwärtig gültigen Preisen zu entnehmen (Anlage 1). Insgesamt standen 10 Datensätze zur Verfügung, aus denen folgende Tendenzen abgelesen werden können:

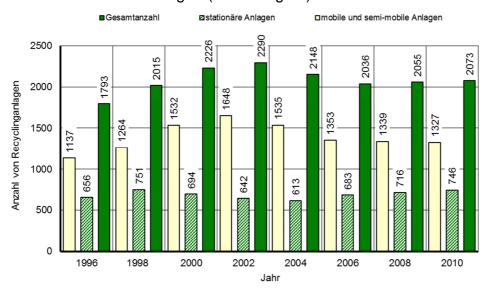
- Die Preissteigerungen von 2014/2015 gegenüber 2012 liegen im Durchschnitt bei 20 %.
- Überdurchschnittliche Preissteigerung um 40 % treten bei Mauerwerkbruch bezeichnet als "Bauschutt, Ziegel, Klinker etc. ohne Sortierreste" und bei Leichtbaustoffen auf.

Sehr hohe Annahmegebühren, die sich in dem betrachteten Zeitraum nicht verändert haben, deuten darauf hin, dass damit erreicht werden soll, die Materialannahme zu unterbinden. Gleiches gilt für Materialarten, die aus den Listen "verschwunden" sind.

Mobile und stationäre Recyclinganlagen

Die Aufbereitung von Bauschutt wird in mobilen oder stationären Anlagen realisiert. In der Vergangenheit waren mobile Anlagen bei den technischen Möglichkeiten stärker eingeschränkt als stationäre Anlagen. Inzwischen gibt es für die Klassierung ebenso wie für die Windsichtung auch mobile Anlagentechnik, so dass bei mobiler Aufbereitung ebenfalls in Fraktionen klassierte, von leichten Störstoffen befreite Recycling-Baustoffe hergestellt werden können. In stationären Anlagen können zusätzlich nasse Sortieraggregate eingesetzt werden. Diese ermöglichen über die Abtrennung der leichten Störstoffe hinaus auch eine Trennung der mineralischen Bestandteile nach der Dichte, nicht aber nach der Baustoffart.

Mobile Anlagen werden in der Regel am Standort der Abbruchmaßnahme betrieben. Möglich ist aber auch, dass Lagerplätze für Bauabfälle angelegt werden, auf denen mobile Anlagen zum Einsatz kommen, wenn ausreichend Material vorhanden ist. Sie sind bisher nicht genehmigungsbedürftig. Stationäre Anlagen müssen nach dem Bundes-Immissionsschutzgesetz genehmigt werden und kommen dort zum Einsatz, wo das Aufkommen an Bauabfällen hoch ist, z.B. in Großstädten oder Ballungsgebieten. Zum Teil werden stationäre Anlagen auch parallel zur Gewinnung und Aufbereitung von natürlichen Gesteinskörnungen in Steinbrüchen betrieben. Nach Angaben des Statistischen Bundesamtes werden in Deutschland etwa 2000 Anlagen betrieben, die zusammen 60 bis 70 Mio. Tonnen Bauabfälle pro Jahr verarbeiten. Daraus ergeben sich rein rechnerisch Durchsätze von 43.000 t/a für stationäre bzw. 25.000 t/a für mobile Anlagen (Abbildung 16).



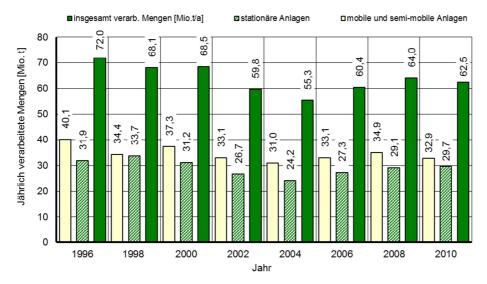


Abbildung 16: Anzahl von Anlagen und jährlich verarbeitete Bauschuttmengen (Quelle: Eigene Darstellung nach Statistischem Bundesamt/Fachserie 19/1996-2014)

Mit den stationären Anlagen kann durch das Zusammenwirken eines gezielten Managements der Inputstoffströme und einer mehrstufigen Aufbereitung eine breitere Produktpalette einschließlich güteüberwachter Recycling-Baustoffe erzeugt werden. Auch aus störstoffhaltigem Bauschutt kann durch eine Vorsortierung ein brauchbarer Recycling-Baustoff erzeugt werden. Bei mobilen Anlagen besteht eine enge Kopplung der Produktqualität an die Qualität des Ausgangsmaterials. Aus einem Fahrbahnbeton einer Autobahn kann beispielsweise ein hochwertiges Tragschichtmaterial hergestellt werden. Bei sehr heterogenem Ausgangsmaterial sind die Einflussmöglichkeiten auf die Produktqualität bei der mobilen Aufbereitung gering.

Als Fazit kann festgestellt werden, dass die gegenwärtig vorhandene Technik dafür geeignet ist, Betonbruch zu Recycling-Baustoffen für den Einsatz im Straßenoberbau oder für die Herstellung von Beton aufzubereiten. Voraussetzung ist, dass der Betonbruch keine mineralischen Störstoffe enthält. Organische Störstoffe können wegen ihrer in der Regel geringen Dichte per Windsichtung abgetrennt werden. Aus Mauerwerkbruch können bei getrennter Annahme und/oder Vorsortierung sortenreine Ziegelkörnungen hergestellt werden. Mauerwerkbruch als Gemisch der verschiedenen Wandbaustoffe, Mörtel und Putz liegt auch nach der Aufbereitung in dieser Zusammensetzung vor, weil zum einen geeignete Sortiertechniken fehlen und zum anderen bisher keine Nachfrage nach sortenreinen Körnungen der unterschiedlichen Wandbaustoffe besteht.

3.2 Einführung neuer Aufbereitungstechniken

Spezielle Entwicklungen für die Aufbereitung von Bauabfällen gibt es bisher kaum. Ausnahmen bilden die Asphaltaufbereitung und die Aufbereitung von Gipskartonplatten. Neben wirtschaftlichen Gesichtspunkten kommen die stofflichen Merkmale dieser beiden Baustoffe dem Recycling entgegen (Abbildung 17):

 Asphalt kann vereinfacht als Komposit aus Gesteinskörnungen und dem thermoplastischen Bindemittel Bitumen betrachtet werden. Sortenreiner Ausbauasphalt kann somit durch Erwärmung in einen plastischen Zustand überführt und dann erneut eingebaut und verdichtet werden. Gipsbaustoffe sind von ihren chemischen Eigenschaften her kreislauffähig.
 Die erhärteten Produkte Gipsputz oder Gipskartonplatte entsprechen in ihrem Chemismus den Ausgangsrohstoffen.

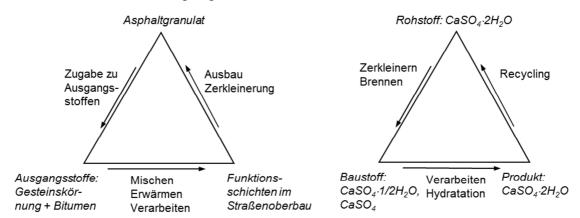


Abbildung 17: Vereinfachte Materialkreisläufe für Asphalt und Gipsprodukte (Quellen: Eigene Darstellungen und Müller 2012)

Um die dargestellten Stoffkreisläufe zu realisieren, müssen die Ausgangsstoffe möglichst sortenrein vorliegen, was beim Asphaltaufbruch in der Regel gegeben ist. Bei Gipsprodukten wurde 2014 mit der Rücknahme und der Verarbeitung von Gipskartonplatten aus dem Rückbau begonnen. Für beide Bauabfallarten wird eine Aufbereitung mit angepasster Technik realisiert.

Ausbauasphalt

Die Zerkleinerung von Asphaltschollen erfolgt in sogenannten Granulatoren, die mit rotierenden Fräswalzen bestückt sind. Das Aufgabematerial durchläuft zwei Zerkleinerungsstufen. In der ersten Stufe werden die Asphaltschollen, die Kantenlängen bis zu 1,8 m aufweisen können, mit zwei hydraulisch angetriebenen Stampfern gegen eine rotierende Fräswalze gedrückt. Die Zerkleinerung findet zwischen den Fräszähnen der Walze und einem verstellbaren Brechkamm statt. Das Überkorn wird einem Doppelwalzenbrecher zugeführt und nachzerkleinert. Durch das Zerkleinerungsprinzip – einem Fräsvorgang mit gegenüber Brechvorgängen reduzierter Kornzertrümmerung – wird ein grobes Endprodukt erzeugt. Die Feinkornentstehung wird dadurch reduziert.

Die Anforderungen, die Ausbauasphalt erfüllen muss, beziehen sich auf das Bindemittel und die Gesteinskörnung. Es sind Grenzwerte <u>und</u> Spannweiten definiert. Bei Einhaltung der Grenzwerte hängt die mögliche Zugabemenge für die erneute Asphaltherstellung von der Spannweite der Eigenschaften ab. Je größer die Spannweite ist, desto geringer ist die erlaubte Zugabemenge. Außerdem hängt die Zugabemenge davon ab, in welcher Schicht der Ausbauasphalt eingebaut werden soll. Diese Vorgehensweise ist die konsequente Umsetzung der "Philosophie", dass Produkte, die unter Verwendung von Rezyklaten hergestellt werden, keine Veränderungen gegenüber solchen Produkten, die ausschließlich aus Primärmaterial hergestellt sind, aufweisen dürfen. Bei sehr guten Qualitäten des Rezyklats können hohe Anteile, bei mäßigen Qualitäten geringe Anteile des Primärmaterials ersetzt werden.

Für die Verwertung pechhaltiger Asphalte, die in Deutschland nur noch sehr eingeschränkt möglich ist, wird in Rotterdam eine thermische Anlage betrieben (Abbildung 18). In einem zweistufigen Prozess wird das Bindemittel verbrannt und die entstehende Wärme zur Elektrizitätserzeugung genutzt. Die im Asphalt enthaltenen Gesteinskörnungen werden zurückgewonnen und zur Betonherstellung eingesetzt. Eine mehrstufige Rauchgasreinigung ist erforderlich, die u.a. eine Kalkwäsche einschließt. Damit wird im Rauchgas enthaltenes, aus dem Pech stammendes SO₂ zu Rauchgasentschwefelungsgips umgewandelt – neben der Energie und den Gesteinskörnungen das dritte verkaufsfähige Produkt.

In Deutschland können pechhaltige Asphalte gegenwärtig noch in kaltgebundenen Schichten und außerhalb von Wasserschutz- und Überschwemmungsgebieten eingesetzt werden. Überregional agierende Recyclingunternehmen bieten aber inzwischen an, pechhaltige Asphalte anzunehmen, zu störstofffreien Granulaten aufzubereiten und anschließend zur thermischen Verwertung nach Rotterdam zu verbringen (https://www.remex-solutions.de/). In der Freien und Hansestadt Hamburg ist diese Verwertungsvariante seit 2012 vorgeschrieben. In einem Rundschreiben des Bundesministeriums für Verkehr und digitale Infrastruktur heißt es, dass der Einbau von Baustoffgemischen mit teer-/pechhaltigen Bestandteilen in Bundesstraßen möglichst ab sofort, jedoch spätestens ab dem 01.01.2018 nicht mehr zu zulassen sei (Regelung BMVIS ARS Nr. 16/2015).

OUD ASFALT | Comparison of the property of th

Abbildung 18: Schema der Anlage zur thermischen Behandlung von pechhaltigem Asphalt (Quelle: http://www.rekobv.eu/)

Gipskartonplatten

Die Aufbereitung von Gipskartonplatten wird ebenfalls in speziell dafür konzipierten Anlagen vorgenommen. Nach Herstellerangaben werden die Platten zunächst in einer Schraubenmühle mit drei langsam laufenden Zerkleinerungswalzen vorzerkleinert (Abbildung 19). In einem nachgeschalteten Walzenbrecher erfolgt die weitere Zerkleinerung einschließlich der Abtrennung des Papiers vom eigentlichen Gips. Diverse Siebschritte sind in den Verfahrensablauf integriert. Die Anlagenkapazität liegt bei 75.000 Tonnen pro Jahr.



Abbildung 19: Ansicht einer Aufbereitungsanlage für Gipskartonplatten (Quelle: http://www.neuenhauser-umwelttechnik.de/)

Die erzeugten sekundären Gipse müssen Anforderungen an die Feuchte (≤ 10 Masse- %), den Gehalt an Calciumsulfatdihydrat (≥ 80 Masse-%) und diverse chemische Parameter erfüllen. Die Abnahme des Sekundärgipses erfolgt durch die Gipsindustrie, welche die Rezyklate als Rohstoff für die Produktion neuer Gipskartonplatten einsetzt. Der in Abbildung 17 dargestellte Gipskreislauf ist damit zumindest für ein Gipsbauprodukt geschlossen.

Sensorgestützte Sortierung

Einhergehend mit der rasanten Entwicklung der Computertechnik und den Fortschritten im Bereich der Sensorik ist seit Mitte der 1980er Jahre die Entwicklung von sensorgestützten Sortierverfahren zu beobachten. In der Abfallaufbereitung begann die Einführung der sensorgestützten Verfahren mit der Sortierung von Altglas mit sogenannten Rinnenmaschinen. Seitdem ist die Anwendung kontinuierlich ausgebaut worden. In jüngerer Zeit werden in der Recyclingwirtschaft Bandmaschinen angewandt, die mit Sensoren unterschiedlichster Art ausgerüstet sind, um den Sortierprozess exakter, schneller und preisgünstiger zu gestalten. Beispiele für die Anwendung von sensorgestützten Sortierverfahren in der Abfallwirtschaft sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Bei aller Unterschiedlichkeit der technischen Ausführungen bestehen die sensorgestützten Sortiermaschinen des Bandtyps immer aus folgenden Hauptbaugruppen

- Beschleunigungsband, auf welchem das zu trennende Material vereinzelt an dem Sensor vorbeigeführt wird
- Sensor mit Signalgeber und Detektor
- Computer zur schnellen Verarbeitung der vom Sensor empfangenen Informationen
- Drucklufteinheit zum Ausschleusen der identifizierten Partikel.

Die optoelektronischen Verfahren markieren den Beginn der sensorgestützten Sortierung. Kernstück dieser Verfahren ist eine optische Farbzeilenkamera, mit welcher

Farbe, Helligkeit, Transparenz, Reflexion und Form der Partikel auf dem Transportband gemessen werden können. Die erhaltenen Daten werden in dem Industrierechner bewertet. Die Ergebnisse werden an schnelle und robuste Druckluftventile weitergeleitet, die jeweils eine Druckluftdüse bedienen. Fremdstoffe werden entsprechend ihrer Lage, Form und Größe mit einem gezielten Druckluftimpuls ausgeschleust.

Nahinfrarotsensoren werden derzeit hauptsächlich in der Sortierung zur Trennung von Kunststoffflakes aus PET, PE, PP und PS eingesetzt. Aber auch die Unterscheidung zwischen verschiedenen Papiersorten und die Messung der Materialfeuchtigkeit ist möglich. Bei der Kunststoffsortierung werden die Flakes mit Nahinfrarotlicht bestrahlt und die gemessenen Spektren mit Sollwertkurven verglichen. Bei Übereinstimmung erfolgt die Zuordnung zu der entsprechenden Kunststoffart.

Die Sortierung auf der Basis von Röntgentransmissionsmessungen erlaubt die Unterscheidung von Materialien anhand ihrer atomaren Dichte. Durch die Verwendung von zwei Detektoren und durch die Auswertung mittels spezieller Algorithmen kann der Einfluss der Dicke der vermessenen Partikel auf das Ergebnis weitestgehend eliminiert werden.

Für das Erkennen von Metallen werden Detektoren verwendet, die im langwelligen Bereich von Radiofrequenzen arbeiten. Das von einer Erregerspule erzeugte magnetische Wechselfeld wird durch elektrisch leitende Partikel beeinflusst. Mit einer Empfängerspule werden diese Einflüsse detektiert und so Metalle von nicht leitfähigen Stoffen unterschieden.

Tabelle 5: Anwendungsgebiete für die sensorgestützte Sortierung in der Abfallwirtschaft nach Pretz/Julius 2008

Sensorik	Trennkriterium	Anwendungsgebiete
Farbkameras	Farbe, Helligkeit	Farbsortierung von Altglas, von Kunststoffen, Sortierung von Messing und Kupfer aus NE- Metallgemischen, Sortierung von Platinen aus Elektronikschrott
	Transparenz	Opake Bestandteile (Keramik, Porzellan, Steine) aus Altglas
	Farbe, Glanz	Trennung von Illustrierten aus Altpapier
NIR-Spektrometer	molekulare Zusammen- setzung an der Oberflä- che	Sortierung von Kunststoffen, Getränkekartons, Papier, Pappe, Kartonagen, Holz, Textilien aus Leichtverpackungen, Abfallgemischen oder Sperrmüll, Trennung von Kunststoffgemischen in PE, PP, PS, PA, PET, PVC
Induktive Detektoren	elektrische Leitfähigkeit	Sortierung von Metallen aus diversen Abfallgemischen insbesondere aus Shredderrückständen, Sortierung von Edelstählen aus Metallgemischen
Röntgendetektoren	Dichte	Abtrennung von Aluminium aus NE- Metallgemischen, Sortierung von Elektronikkleingeräten aus Leichtverpackungen, Sortierung von Inertstoffen aus Abfallgemischen und Altholz, von PVC und Gummi aus Shredderrückständen, Entfernung von organischen Verunreinigungen aus Bauabfällen

Im Bereich der Bauschuttsortierung gibt es Forschungsprojekte, die sich mit der sensorgestützen Sortierung von Bauschutt beschäftigen. Mehrfach untersucht wurde der Einsatz von Nahinfrarotsensoren (Groot et al. 2002, Vegas et al. 2015, Landmann

2015 http://www.iab-weimar.de/). Aber auch mittels Farbsortierung wurden Qualitätsverbesserungen erzielt. In Tests konnten Gipspartikel und Ziegelpartikel aus Bauschuttgemischen abgetrennt werden (Müller 2012, Angulo 2013).

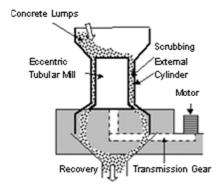
Anlagen zur sensorgestützten Sortierung von Bauschutt sind bisher kaum gebräuchlich. In einer Recyclinganlage in Spanien wird die Aussortierung von Gips aus Bauschutt mittels Nahinfrarottechnik realisiert. In einer Recyclinganlage in der Schweiz wird die Trennung von Beton- und Ziegelpartikeln mit Hilfe einer Farbsortierung vorgenommen. Aussagen und Erfahrungen sowohl im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Sortiertechnik unter Betriebsbedingungen als auch im Hinblick auf die Kosten konnten bislang noch nicht ermittelt werden.

3.3 Forschungen zu alternativen Aufbereitungsverfahren

Der Schwerpunkt der internationalen Forschung liegt auf der Abtrennung des Zementsteins, der Bestandteil der Rezyklate aus Beton ist. Die Eigenschaften von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen bilden einen weiteren Schwerpunkt.

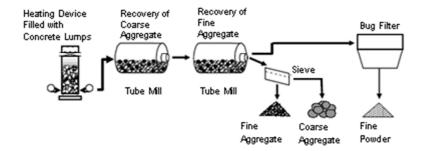
Für die Zerlegung von Beton in Zementstein und ursprüngliche Gesteinskörnungen wurden in Japan verschiedene mechanische Verfahren entwickelt. Bei diesen Inplant-Technologien erfolgt nach einer traditionellen Zerkleinerung eine Beanspruchung der Brechprodukte durch Scherung bzw. Abrasion, z. T. gekoppelt mit einer thermischen Vorbehandlung. Dadurch wird der Zementstein, welcher auf den Oberflächen der Zuschläge anhaftet, entfernt. Diese Technologien ermöglichen die Herstellung hochwertiger rezyklierter Gesteinskörnungen, die sich in ihren physikalischen Parametern kaum von natürlichen Zuschlägen unterscheiden. In Abbildung 20 sind zwei Verfahren dargestellt und die Wirkungsweise beschrieben.

In jüngster Zeit wird versucht, durch eine Mikrowellenbehandlung eine Schwächung der Struktur des Betons zu erreichen, um anschließend selektiv zerkleinern zu können und den Zementstein von den Gesteinskörnungen abzutrennen. Neben Grundlagenuntersuchungen fanden bereits Versuche in einer eigens für die Betonbehandlung entworfenen Anlage statt. Die Einsatzmengen lagen bei 2 kg.



Trockene mechanische Abrasionsbehandlung

Der gebrochene Beton wird in einem kegelbrecherähnlichen Aggregat behandelt. Im Spalt zwischen dem äußeren Mantel und dem exzentrisch gelagerten Rotor, der zusätzlich vibriert, wird das Material durch Scherung beansprucht. Dadurch wird an der Oberfläche haftender Zementstein entfernt.



Abrasionsbehandlung nach thermischer Behandlung

Gebrochener Beton wird in einem Vertikalofen mit auf 300 °C vorgewärmter Luft durchströmt. Der Zementstein wird dadurch spröde, seine Festigkeit nimmt ab. Er wird anschließend in Rohrmühlen durch Abrasion entfernt.

Abbildung 20: Aggregate zur Qualitätsverbesserung von Betonrezyklaten nach Noguchi 2009

Bei einer weiteren Gruppe von Aufschlussverfahren für Beton wirken die Beanspruchungen direkt an der Phasengrenze zwischen Zementstein und Gesteinskörnung. Dazu zählen das elektrodynamische und das elektrohydraulische Verfahren (Linß/Müller 2004, Menard et al.2013, Thome 2013). Bei beiden Verfahren wird die Beanspruchung des Betons, der sich in einem Wasserbad befindet, durch eine Unterwasserfunkenentladung ausgelöst. Bei der elektrodynamischen Methode werden die elektrischen Stellgrößen so gewählt, dass der Durchschlag des Funkens direkt durch den Beton erfolgt (Abbildung 21 a). Bei der elektrohydraulischen Methode erfolgt der Durchschlag durch das Wasser. Die dabei entstehenden Druckwellen wirken auf den Beton (Abbildung 21 c). Beide Methoden sind in der Lage, einen großen Prozentsatz zementsteinfreier Partikel zu erzeugen. Elektrodynamische Laboranlagen, in denen Aufgabemengen im Kilogramm-Bereich zerkleinert werden können, werden angeboten.

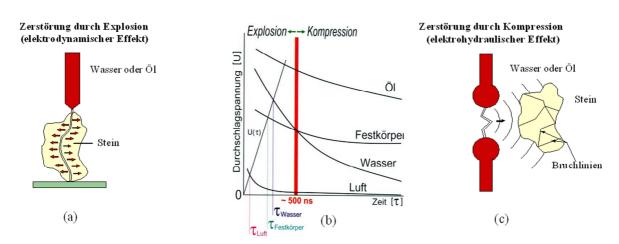


Abbildung 21: Vergleich von elektrodynamischen (a) und -hydraulischen (c) Zerkleinerungsverfahren sowie Durchschlagspannungen für verschiedene Materialien als Funktion der Impulsanstiegszeit (b), Linß 2008

Der Aufschluss bzw. die Verwertung von Mauerwerkbruch spielen in der Forschung eine untergeordnete Rolle. Sortierverfahren für die Abtrennung von Gips und die Erzeugung sortenreiner Fraktionen der einzelnen Wandbaustoffarten werden in der Forschung nur am Rande behandelt. Dabei wurde mehrfach nachgewiesen, dass eine Trennung von Mauerwerkbruch nach Baustoffarten mit sensorgestützten Einzelkornsortierverfahren möglich ist (Angulo et al. 2013, Linß et al. 2014, Landmann et al.

2014). Der Einsatz unter praxisnahen Bedingungen wurde untersucht (Vegas et al. 2015). Die eingesetzten Baustoffgemische hatten eine untere Korngröße von 6 mm. Mittels Nahinfrarotsensoren konnten Porenbeton, Gips und organische Bestandteile aussortiert werden. Mit Hilfe von Farbsensoren wurden "graue" von "roten" Komponenten getrennt. Die möglichen Durchsätze hängen von der Korngröße der aufgegebenen Gemische, der Breite des Beschleunigungsbandes und der gewünschten Sortenreinheit ab und liegen bei etwa 11 t/h pro 1 m Bandbreite.

4 Merkmale von Primärbaustoffen

4.1 Herstellungsprinzipien und Klassifizierungsmerkmale

Für die Herstellung der mineralischen Baustoffe Beton, Mörtel, Leichtbeton, Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Gips und Dämmmaterial wird mit Ausnahme der Bindemittel Zement und Gips auf Steine-Erden-Rohstoffe mit hohem SiO₂-Gehalt zurückgegriffen. Natürliche karbonatische Rohstoffe finden teilweise ebenfalls als Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung Anwendung. Für die Zementherstellung werden neben Kalkstein weitere Rohstoffe wie Ton oder Mergel benötigt. Gips und Kalk werden aus den Ausgangsstoffen Gipsgestein bzw. Kalkstein hergestellt, an die hohe Reinheitsanforderungen gestellt werden. Stark vereinfachte Schemata zu den erforderlichen Ausgangsmaterialien, den Bildungsbedingungen und den eigenschaftsbestimmenden Bestandteilen der Produkte sind in Abbildung 22 für die Bindemittel und in Abbildung 23 für die Wandbaustoffe dargestellt.

Zement wird in einem Hochtemperaturprozess aus Kalkstein sowie SiO₂-, Al₂O₃- und Fe₂O₃-haltigen Komponenten hergestellt. Eine Mahlung des Brennproduktes unter Zugabe des Abbindereglers Gips schließt sich an. Die Zugabe von Zusatzstoffen dient der Generierung spezieller Eigenschaften sowie der Verbesserung der CO₂-Bilanz. Sie hat im letzten Jahrzehnt stark zugenommen. Die grundsätzliche Bewertung der Eignung von Roh- und Zusatzstoffen für die Zementherstellung erfolgt anhand der chemischen Zusammensetzung unter Zuhilfenahme des Dreistoffdiagramms CaO, SiO₂, Al₂O₃+Fe₂O₃. Eine erste Einschätzung der Eignung von Bauschuttbestandteilen für eine rohstoffliche Verwertung wird ebenfalls mit Hilfe dieses Diagramms vorgenommen.

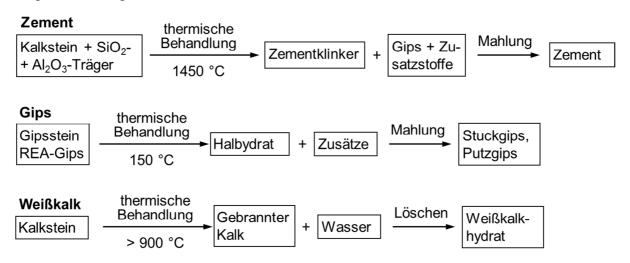


Abbildung 22: Vereinfachte Bildungsschemata von Zement, Kalk und Gips (Quelle: Eigene Darstellung)

Bei den Wandbaustoffen kann zwischen den Mauerziegeln einerseits und den mineralisch gebundenen Steinen Kalksandstein, Porenbeton und Betonstein andererseits unterschieden werden. Alle genannten Wandbaustoffe werden als Stückgüter in hoch automatisierten Produktionsprozessen mit kontinuierlicher Güteüberwachung hergestellt. Unterschiede bestehen hinsichtlich der verwendeten Rohstoffe, der Herstellungstechnologie und den Mechanismen der Festigkeitsbildung.

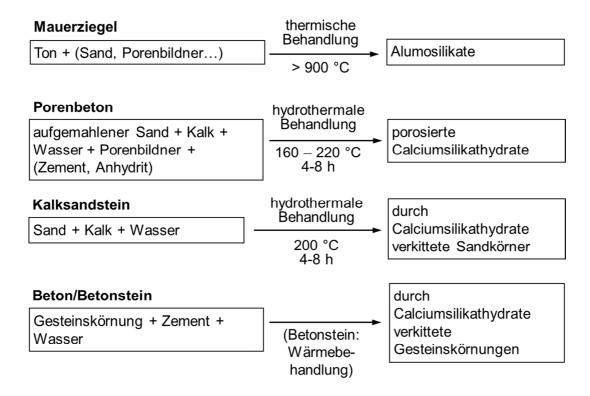


Abbildung 23: Vereinfachte Bildungsschemata unterschiedlicher Wandbausteine (Quelle: Eigene Darstellung)

Mauerziegel werden aus Ton, Magerungsmittel und ggf. Zusätzen zur Porosierung des Ziegelscherbens hergestellt. Durch die Hochtemperaturbehandlung wird der zunächst plastische Ton in den tragfähigen Zustand des Ziegels überführt. Das Kristallwasser wird ausgetrieben. Sinterprozesse führen zu Phasenumwandlungen im Produkt. Bei Hintermauerziegeln, die nicht frostbeständig sein müssen, beträgt die Brenntemperatur etwa 900 ℃. Bei Vormauer- und Klin kermauerziegeln liegen die Brenntemperaturen über 1000 ℃.

Bei mineralisch gebundenen Steinen beruht die Festigkeitsentwicklung auf der Bildung von Calciumsilikathydraten. Diese weisen eine Schichtstruktur auf und sind nahezu wasserunlöslich. Unterschiede bestehen in der Zusammensetzung, der Kristallinität und dem Anteil, in welchem die Calciumsilikathydrate in dem jeweiligen Baustoff vorliegen:

- In Kalksandsteinen stellen kristalline Calciumsilikathydrate die Bindemittelphase dar. Sie wachsen auf den Sandkörnern auf und verbinden sie miteinander.
- Porenbeton besteht ebenfalls aus kristallinen Calciumsilikathydraten. Sie sind der Hauptbestandteil der Steinmasse. Daneben liegen geringe Mengen an Quarz vor. Der volumetrischen Zusammensetzung nach besteht Porenbeton zu 60 bis 85 % aus Poren mit Porengrößen um 1 mm.
- Im Beton sind amorphe Calciumsilikathydrate für den tragfähigen Verbund der feinen und groben Gesteinskörnungen verantwortlich. Ihr Anteil liegt im Bereich von 20 bis 30 Volumen-%.

Die klassifizierenden Produktmerkmale von Mauerwerkbaustoffen sind die Steinrohdichte und die Druckfestigkeit. Zwischen beiden Merkmalen besteht ein loser Zusammenhang (Abbildung 24).

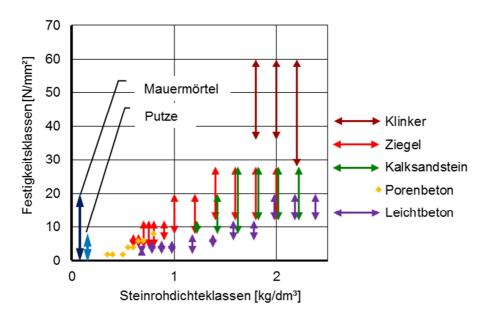


Abbildung 24: Bereiche für die Steinrohdichte- und Festigkeitsklassen von Wandbaustoffen sowie Mörteln und Putzen (Quelle: Eigene Darstellung)

Bei Betonen wird in Bezug auf die Rohdichte zwischen Leichtbetonen und Normalbetonen unterschieden. Innerhalb dieser Gruppen erfolgt die Klassifizierung anhand der Festigkeit. Bei den Normalbetonen beginnen die aktuellen Festigkeitsklassen, die 2000 eingeführt wurden, bei C 8/10 und reichen bis C 100/115 (N/mm²). Die gegenüber früheren Jahren auftretende deutliche Erweiterung in Richtung höherer Festigkeiten wird bisher nur in einigen wenigen Betonprodukten praktisch umgesetzt. Bei den gegenwärtig hergestellten Transportbetonen beträgt der Marktanteil der Betondruckfestigkeitsklassen C20/25, C25/30 und C30/37 beispielsweise rund 80 %.

Vereinfachend kann davon ausgegangen werden, dass die Festigkeiten Aussagen über den Zerkleinerungswiderstand machen. Hohe Festigkeiten bedeuten einen hohen Zerkleinerungswiderstand, niedrige einen geringen Widerstand. Für den theoretischen Fall von übereinstimmenden Beanspruchungsintensitäten durch die Verwendung desselben Brechers und bei gleichen Aufgabekorngrößen sowie Durchsätzen folgt daraus, dass bei der Zerkleinerung von festeren Baustoffen ein geringerer Anteil an Feinkorn entsteht als bei der Zerkleinerung von Baustoffen mit niedrigen Festigkeiten. Aus den Tendenzen der Baustoffentwicklungen - immer leichtere, geringer feste Wandbaustoffe für den Wärmeschutz einerseits und höher feste Betone für filigranere Bauteile andererseits - folgt, dass die Zerkleinerungsprodukte aus Mauerwerkbaustoffen tendenziell feiner, die aus Beton gröber werden. Die technologische Konsequenz wäre eine besser an das Ausgangsmaterial angepasste Zerkleinerungstechnik. In der Recyclingpraxis wird mit der Zerkleinerung in der Regel ein Korngemisch mit einem bestimmten Größtkorn - beispielsweise 45 mm - erzeugt, was über den Durchsatz gesteuert wird. Bei festerem Ausgangsmaterial werden geringere Durchsätze als bei Ausgangsmaterial mit geringem Zerkleinerungswiderstand realisiert.

Im grobkörnigen Zustand, in welchem die Baustoffe nach dem Brechen vorliegen, ist die Materialrohdichte das kennzeichnende Merkmal. Sie macht Aussagen zur Baustoffporosität und ist damit die Leitgröße wichtiger physikalischer Eigenschaften wie Kornfestigkeit und Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel. Tabelle 6 ist zu entnehmen, dass die Rohdichten im trockenen Zustand bzw. die daraus berechneten Gesamtporositäten bei Ziegeln und Kalksandsteinen ähnlich sind. Leichtbetone und Po-

renbetone weisen geringere Rohdichten bzw. größere Porositäten auf. Normalbetone haben höhere Rohdichten als die Wandbaustoffe und demzufolge geringere Porositäten.

Tabelle 6: Daten zu Rein- und Rohdichten sowie Gesamtporositäten von sortenreinen Wandbaustoffen und Betonen, gemessen an Körnungen > 4 mm

	Ziegel ein- schließlich Klinker	Kalksand- stein	Porenbeton	Leichtbeton	Beton	
		R	Reindichte [kg/m	3]		
Probenanzahl	28	14	12	10	34	
Mittelwert	2735	2659	2604	2621	2678	
Standardabweichung	65	79	109	162	100	
Min	2630	2490	2520	2310	2594	
Max	2950	2740	2910	2850	2983	
	Rohdichte (ofentrocken) [kg/m³]					
Probenanzahl	65	35	31	18	45	
Mittelwert	1865	1903	710	1148	2316	
Standardabweichung	210	183	117	380	140	
Min	1490	1570	497	628	2140	
Max	2423	2523	940	1865	2672	
		Gesamtpo	rosität (berechn	et) [Vol%]		
Probenanzahl	43	27	29	18	34	
Mittelwert	32,6	30,6	73,6	57,0	14,2	
Standardabweichung	8,5	4,6	4,3	13,3	2,94	
Min	9,9	24,2	65,9	30,7	8,6	
Max	46,8	43,4	81,1	76,8	18,2	

Innerhalb einer Baustoffart sind die Spannweiten der Rohdichte beträchtlich. Sie gehen auf die unterschiedliche Herkunft und die Breite der angebotenen Sortimente zurück. So werden Ziegel beispielsweise mit porosiertem Scherben hergestellt, wenn eine gute Wärmedämmung erzielt werden soll. Steht dagegen die Frostbeständigkeit im Vordergrund, ist die Herstellung sehr dichter Ziegel erforderlich. Die Reindichten unterscheiden sich kaum, da in allen Wandbaustoffen und im Beton silikatische Bestandteile dominieren.

Die betrachteten Baustoffarten unterscheiden sich in Bezug auf ihre Rohstoffe und die Genese. Das kommt in ihrer chemischen Zusammensetzung zum Ausdruck (Tabelle 7). Der Baustoff mit dem höchsten SiO₂-Gehalt ist der Kalksandstein, gefolgt vom Beton mit silikatischen Zuschlägen. In Bezug auf das CaO weist der Beton mit calcitischen Zuschlägen den höchsten Gehalt auf, gefolgt vom Porenbeton. Der Ziegel hat einen deutlich höheren Al₂O₃-Gehalt als die anderen Baustoffe. Seine chemische Zusammensetzung entspricht nahezu der mittleren Zusammensetzung der Erdkruste.

Tabelle 7: Oxidzusammensetzung und Glühverlust (GV) der sortenreinen Hauptbestandteile von Bauabfällen

	[Masse-%]	GV	SiO ₂	Al_2O_3	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Ziogol	Mittelwert	1,02	66,50	14,52	5,89	4,42	2,20	2,92	0,74	0,38
Ziegel Probenanzahl: 40	Standardab- weichung	1,00	6,96	2,78	1,92	3,99	1,45	0,72	0,38	0,60
Kalkaandatain	Mittelwert	4,40	80,70	3,54	1,20	7,85	0,29	1,09	0,27	0,14
iPropenanzani. 4 i	Standardab- weichung	0,75	4,34	1,20	0,70	0,67	0,30	0,57	0,22	0,10
Doronhoton	Mittelwert	14,36	50,26	2,60	1,05	25,94	0,77	0,92	0,30	2,53
Porenbeton Probenanzahl: 14	Standardab- weichung	5,20	3,96	0,80	0,26	3,82	0,38	0,44	0,08	1,07
Beton mit silikati- schen Gesteins- körnungen Probenanzahl: 30	Mittelwert	5,56	74,03	3,78	1,86	11,61	0,89	0,94	0,40	0,52
	Standardab- weichung	1,62	9,45	2,66	1,88	3,37	1,36	1,04	0,58	0,27
ikornungen i	Mittelwert	28,57	23,34	2,99	1,86	34,92	6,05	0,77	0,30	0,66
	Standardab- weichung	8,34	9,48	2,58	1,52	5,86	2,4	1,12	0,52	0,41

Für eine erste Übersicht, welche Möglichkeiten für eine rohstoffliche Verwertung bestehen, können die für die Baustoffherstellung maßgeblichen Dreistoffdiagramme SiO₂-CaO-(Al₂O₃+Fe₂O₃) und SiO₂-Flussmittel-Al₂O₃ herangezogen werden. Die Oxidzusammensetzungen der reinen Baustoffe werden in diese Dreistoffdiagramme eingetragen. Das sogenannte Rankin-Diagramm SiO₂-CaO-(Al₂O₃+Fe₂O₃) kann zur Beurteilung der für die Herstellung von Zementklinker geeigneten Materialien dienen (Abbildung 25), aber auch zur Bewertung von Zumahl- und Zusatzstoffen. Bei letzteren ist neben der chemischen Zusammensetzung zusätzlich die Reaktivität entscheidend. Das Dreistoffdiagramm SiO₂-(Fe₂O₃+CaO+MgO+K₂O+Na₂O)-Al₂O₃ kann zur Beurteilung grobkeramischer Ausgangsstoffe einschließlich solcher für die Herstellung von Blähtonen, aber auch von Glas- und Steinwollen herangezogen werden (Abbildung 26). Es ergeben sich folgende Aussagen:

- Die mineralisch gebundenen, sortenreinen Baustoffe liegen in beiden Dreistoffdiagrammen quasi auf einer Linie. Ihr Al₂O₃-Gehalt beträgt nahezu konstant ca. 4 Masse-%. Bis auf Beton mit Kalksteinzuschlägen weisen sie SiO₂-Gehalte > 60 Masse-% auf. Ihre Zusammensetzung unterscheidet sich deutlich von den Bereichen der Roh- bzw. Zusatzstoffe für die Zementherstellung bzw. für die Herstellung grobkeramischer Produkte. Nur der Beton mit Kalksteinzuschlägen könnte sich als Rohstoffkomponente für die Zementklinkerherstellung eignen. Die anderen Baustoffe kommen bei der Klinkerherstellung als SiO₂-Lieferanten in Betracht.
- Die Ziegel sind in beiden Dreistoffdiagrammen in einem Bereich konzentriert. Ein Wiedereinsatz für die Ziegelherstellung ist möglich. Der Anteil ist aber durch die Plastizität der Rohmischung, die für die Formgebung erforderlich ist, begrenzt. Mit einer Ausnahme liegt die Zusammensetzung aller untersuchten Ziegel, in dem für Blähtonen typischen Bereich, so dass darin eine aussichtsreiche Alternative für die rohstoffliche Verwertung besteht. Des Weiteren könnten Ziegel als Al₂O₃-haltige Rohstoffkomponente bei der Zementherstellung verwendet werden. Die Verwertung als Puzzolan scheint vom Chemismus her ebenfalls möglich. In der Regel reicht die Reaktivität selbst bei sortenreinem Ziegelbruch dafür aber nicht aus.

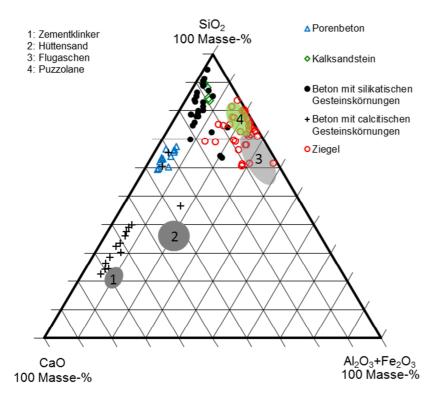


Abbildung 25: Reine Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO₂-CaO-(Al₂O₃+Fe₂O₃) zur Bewertung von Rohstoffen für die Herstellung von Zement (Quelle: Eigene Darstellung)

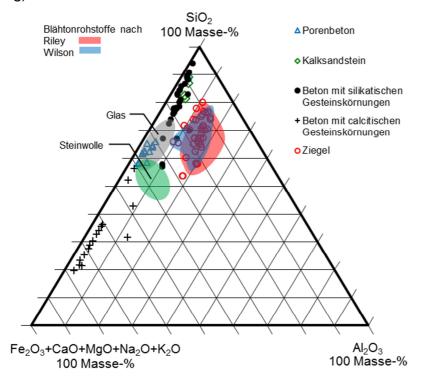


Abbildung 26: Reine Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO $_2$ -(Fe $_2$ O $_3$ +CaO+MgO+K $_2$ O+Na $_2$ O)-Al $_2$ O $_3$ zur Bewertung von Rohstoffen für die Herstellung keramischer Produkte (Quelle: Eigene Darstellung)

Mit Hilfe der Dreistoffdiagramme können die Möglichkeiten der rohstofflichen Verwertung nur grob abgeschätzt werden, weil bestimmte chemische Nebenbestandteile unberücksichtigt bleiben und Reaktivitäten nicht erfasst werden. Beispielsweise liegt

der Porenbeton in dem Feld der Glasrohstoffe. Dieser theoretischen Option steht allerdings sein hoher Sulfatgehalt entgegen. Für jedes Einsatzgebiet sind neben den Aussagen, die anhand der Dreistoffdiagramme getroffenen werden können, weitere Ausschlusskriterien zu prüfen.

4.2 Baustoffmengen und Mengen von Bau- und Abbruchabfällen

Die Mengen an Beton, die in Deutschland jährlich hergestellt werden, können aus dem Zementverbrauch (Quelle: https://www.vdz-online.de/) unter Annahme einer mittleren Betonzusammensetzung berechnet werden. Eine Differenzierung nach der Verwendungsart des Betons erfolgt anhand der Angaben der Steine-Erden-Industrie (Konjunkturperspektiven 2006 – 2014). Aus dieser Quelle werden auch die aktuellen Zahlen zur Produktion von Wandbaustoffen entnommen. Angaben zur Herstellung von Wandbaustoffen von 1950 bis 1993 sind aus einer Zusammenstellung des Bundesverbandes der Kalksandsteinindustrie 1994 entnommen. Mehrere Umrechnungen sind erforderlich, für welche die in Tabelle 8 zusammengestellten Beziehungen verwendet wurden.

Tabelle 8: Beziehungen für erforderliche Umrechnungen bei der Bestimmung der produzierten Baustoffmengen

Gesamtbetonmenge aus Zementverbrauch

Gesamtbetonmenge [Mio.t] =

* (hergestellte Zementmenge [Mio.t] – Zement für Mörtel und Putz [Mio.t])

Massen von in m³ angegebenen Betonprodukten Betonmenge [Mio t] = $\frac{2,3 \text{ t Beton}}{m^3}$ * hergestelltes Betonvolumen [Mio. m³]

Massen von in Stück angegebenen Produkten

Masse Betondachsteine [Mio.t] = $\frac{0,005 t}{Stück}$ * hergestellte Stück [Mio. Stück]

Massen von in m³ angegebenen Wandbaustoffen

Ziegelmenge [Mio t] = $\frac{1.3 \text{ t Ziegel}}{m^3}$ * hergestelltes Ziegelvolumen [Mio. m³]

Kalksandsteinmenge [Mio t] = $\frac{1.6 \text{ t KS}}{m^3}$ * hergestelltes KS-Volumen [Mio. m³]

Porenbetonmenge [Mio t] = $\frac{0.5 \text{ tPB}^{"}}{m^3}$ * hergestelltes PB-Volumen [Mio. m³]

Masse Mörtel und Putz

Mörtel und Putz [Mio.t] = $\frac{0.25 \text{ t Mörtel} + Putz}{1 \text{ t Wandbaustoff}}$ * Menge Wandbaustoffe [Mio t] Zement für Mörtel und Putz [Mio.t] = $\frac{\text{t Zement}}{7 \text{ t Mörtel} + Putz}$ * Mörtel und Putz [Mio.t]

Massen von in Stück angegebenen Produkten

Masse Dachziegel [Mio.t] = $\frac{0,004 \text{ t}}{\text{Stück}}$ * hergestellte Stück [Mio. Stück]

Die insgesamt produzierte Betonmenge liegt im Mittel bei 190 Mio.t pro Jahr (Abbildung 27). Den höchsten Anteil an der Betonproduktion hat der Transportbeton, gefolgt von den Betonwaren, worunter Betonsteine einschließlich Pflaster, Rohre, Eisenbahnschwellen und Betondachsteine zusammengefasst sind. Konstruktive Fertigteile werden in relativ geringer Menge hergestellt. Die Summe der Betonmengen je Verwendungsart ist geringer als die Betonmenge, die aus dem Zementverbrauch berechnet wurde. Die Differenz, die in dem betrachteten Zeitraum von 2006 bis 2013 im Mittel 40 Mio. t beträgt, ergibt sich zum einen daraus, dass in der Produktionsstatistik nur Betriebe mit mehr als 20 Angestellten erfasst sind. Zum anderen ist die Annahme eines mittleren Umrechnungsfaktors für alle Betonsortimente eine starke Vereinfachung.

Die Menge an Wandbaustoffen liegt im Mittel bei 44 Mio.t pro Jahr (Abbildung 28). Sie teilt sich auf die Baustoffarten Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton und Leichtbeton auf. Ein Anteil an Mörtel und Putz wird als Bestandteil von Mauerwerk einbezogen.

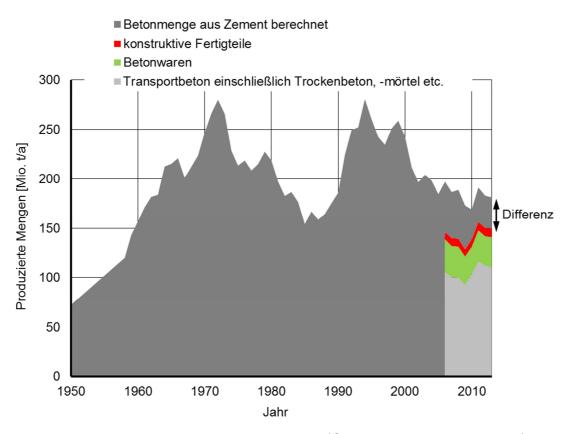


Abbildung 27: Zeitreihe zur Betonproduktion (Quelle: Eigene Darstellung)

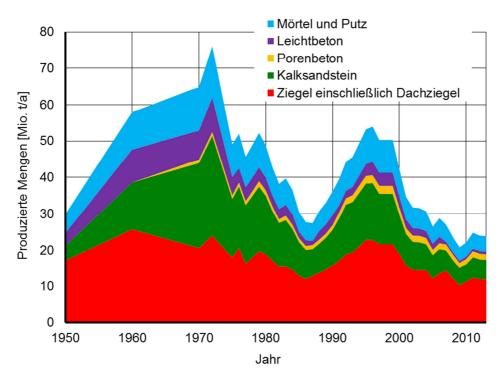


Abbildung 28: Zeitreihe zur Produktion an Wandbaustoffen (Quelle: Eigene Darstellung)

Ein Vergleich von drei markanten Zeitpunkten der Baustoffproduktion ergibt folgende Abstufung:

- Am Ausgangspunkt der Statistiken 1950 stehen sich eine Betonproduktion von 73 Mio.t/a und eine Wandbaustoffproduktion von 30 Mio.t/a gegenüber. Es wurde also 2,4-mal so viel Beton wie Wandbaustoffe hergestellt.
- Im ersten Maximum der Baustoffproduktion 1972 betrug die produzierte Betonmenge 280 Mio.t/a. Die Wandbaustoffproduktion lag bei 76 Mio.t/a, woraus sich ein Faktor Beton zu Wandbaustoffen von 3,6 ergibt.
- Das zweite Maximum 1994/1996 ist durch eine Betonproduktion von 280 Mio.t/a und eine Wandbaustoffproduktion von 54 Mio.t/a gekennzeichnet. Der Faktor beträgt 5,2.

Geschlossene Stoffkreisläufe für Bau- und Abbruchabfälle aus dem Hochbau bedeuten eine Rückführung in die Baustoffproduktion. Bereits aus den Produktionsstatistiken kann abgeleitet werden, dass der Transportbeton rein statistisch das größte Aufnahmepotenzial aufweist, gefolgt von den Betonwaren. Das Aufnahmepotenzial der anderen Baustoffe liegt deutlich darunter.

Die in Deutschland jährlich anfallenden Mengen an Bauabfällen werden vom Statistischen Bundesamt erfasst. Darauf aufbauend werden seit 1996 von der Steine-Erden-Industrie Monitoringberichte veröffentlicht, in welchen die jährlich anfallenden Mengen zusammengefasst sind (Monitoring Bauabfälle 1996-2012). Es erfolgt eine Differenzierung in Bodenaushub, Straßenaufbruch, Bauschutt, gemischte Bau- und Abbruchabfälle sowie Gips. Straßenaufbruch umfasst hauptsächlich Asphaltstraßenaufbruch. In der Kategorie Bauschutt sind Hochbauabfälle enthalten. Werden die Mengen der verschiedenen Bauabfallarten als Zeitreihen dargestellt, zeigt sich, dass in den Jahren von 1996 bis 2012 praktisch keine nennenswerten Veränderungen auftraten (Abbildung 29). Der in den 1990er Jahren prognostizierte deutliche Anstieg der Bauabfallmengen ist bisher nicht erkennbar. Die meist zitierte Prognose nach Rahl-

wes 1993 ist in Abbildung 30 dargestellt. Danach wäre spätestens ab Mitte der 1990er Jahre eine deutliche, kontinuierliche Zunahme der Menge an Bauabfällen zu erwarten, die aber bisher nicht eingetreten ist.

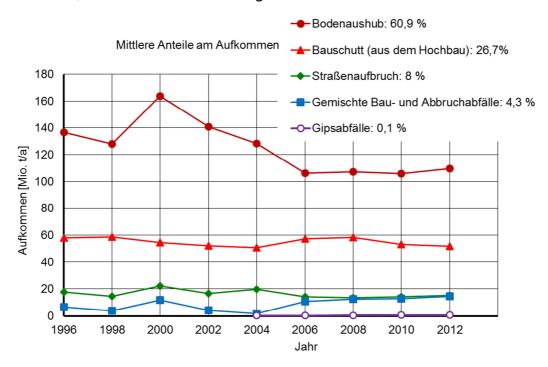


Abbildung 29: Zeitreihe zu den Mengen an Bauabfällen (Quelle: Eigene Darstellung)

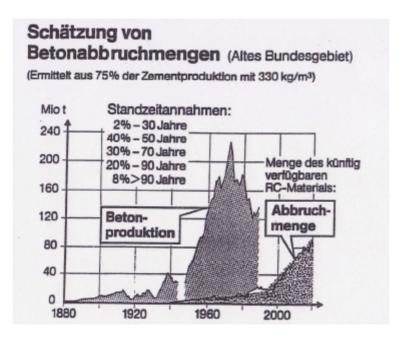


Abbildung 30: Prognose zu Betonbruchmengen nach Rahlwes 1993

Für die rein formale Abschätzung des Aufnahmepotenzials der unterschiedlichen Bauprodukte ist eine Differenzierung des Bauschutts in die darin enthaltenen Baustoffarten erforderlich, die wie folgt ermittelt wurde:

 Die Unterteilung in Beton- und Mauerwerkbruch erfolgt anhand der Angaben des Statischen Bundesamtes (Statistisches Bundesamt/Fachserie 19) für die Jahre 2002/2004/2006/2008/2010/2012. Beton ist mit der Abfallschlüssel-

- nummer 170101 eindeutig klassifiziert. Mauerwerkbruch wird als Summe von sortenreinen Wandbaustoffen wie Ziegeln (170102), Fliesen, Keramik (170102) sowie mineralischen Gemischen (170107) definiert.
- Die Plausibilität der Aufteilung wird anhand der Verwertungssektoren von Bauschutt geprüft. Die Verwertungssektoren stellen einen indirekten Indikator für die Bauschuttart dar und können aus den Umfragen von Krass 1993-2002 entnommen werden.
- Bei der weiteren Aufteilung des Mauerwerkbruchs wird die aus den Aufkommenszahlen berechnete mittlere Zusammensetzung zugrunde gelegt.

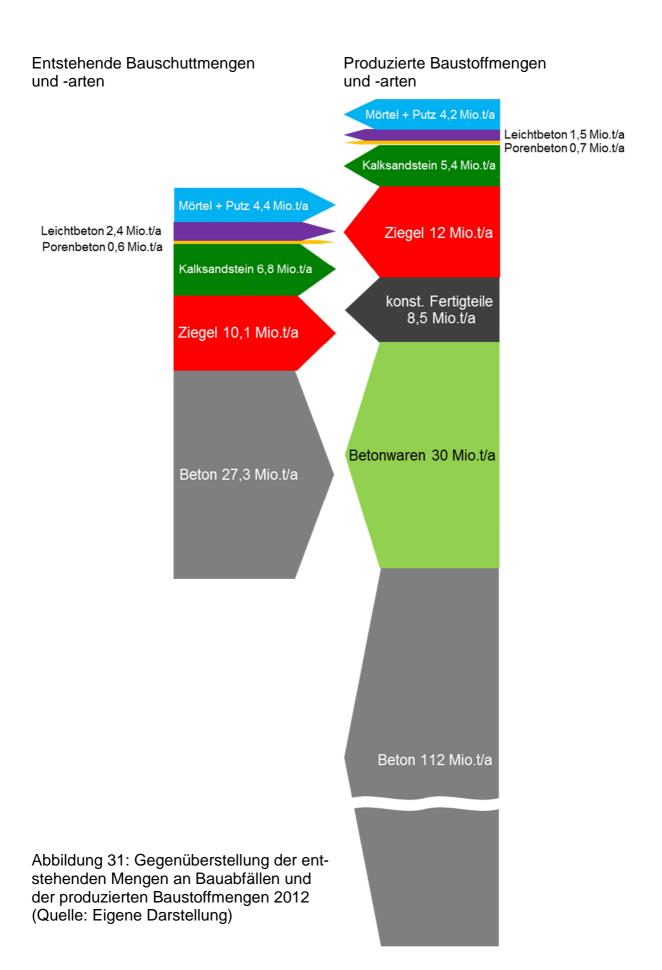
Die Ergebnisse der Aufteilung des Bauschuttstromes sind in Tabelle 9 zusammengefasst. Nach den Daten des Statistischen Bundesamtes besteht Bauschutt zu 53 Masse-% aus Beton und 47 Masse-% aus Mauerwerkbruch. Eine ähnliche Aufteilung ergibt sich bei Zugrundelegung der Verwertungssektoren. Der Betonanteil beträgt dann 61 Masse-%. Der Anteil an Mauerwerkbruch liegt bei 39 Masse-%. Der Mauerwerkbruch besteht wiederum zu 42 Masse-% aus Ziegeln und Dachziegeln, 28 Masse-% Kalksandstein, 2 Masse-% Porenbeton, 10 Masse-% Leichtbeton und 18 Masse-% Mörtel und Putz. Im Gesamtbauschuttstrom teilen sich diese Anteile auf die 47 Masse-% des Mauerwerkbruchs auf.

Tabelle 9: Aufteilung von Bauschutt in Baustoffarten

	Mauerwerkbruch:							
	47 Masse-%							
Betonbruch:	Anteile [Masse-%]							
53 Masse-%	Ziegel + Dachziegel	Kalksandstein	Porenbeton	Leichtbeton	Mörtel + Putz			
	19,6	13,2	1,1	4,6	8,5			

Zur Abschätzung des Aufnahmepotenzials werden die pro Jahr entstehenden Bauschuttmengen und -arten den jährlich produzierten Baustoffmengen und -arten gegenübergestellt (Abbildung 31). Bei den Mauerwerkbaustoffen ist die Abfallmenge nur wenig geringer als die gegenwärtig produzierten Mengen. Selbst wenn die Substitution eines Teils der Primärrohstoffe durch Rezyklate im Sinne eines rohstofflichen Recyclings möglich wäre, kann auf diese Art nur ein – eher geringer – Teil des Mauerwerkbruchs verwertet werden. Es ist zu erwarten, dass der Aufwand für die Herstellung von Rezyklaten, welche die noch zu ermittelnden Anforderungen für das rohstoffliche Recycling erfüllen, hoch ist. Ob dieser Aufwand betrieben werden sollte, hängt von der Wirtschaftlichkeit als Resultierende von Primärrohstoffkosten, Aufbereitungskosten und Kosten für die Deponierung und den Transport ab.

Beim Betonbruch steht eine jährlich entstehende Menge von 27,3 Mio.t einer produzierten Menge von 150 Mio.t gegenüber. Rein rechnerisch ergibt sich daraus eine Substitutionsquote von 20 %. Wenn berücksichtigt wird, dass nur die Betonkörnungen > 2 mm zur erneuten Betonherstellung eingesetzt werden dürfen, ist der Rezyklatanteil geringer.



Als Fazit kann festgestellt werden, dass bei den Wandbaustoffen die gegenwärtig hergestellte Menge in etwa der entstehenden Menge an Mauerwerkbruch entspricht. Durch einen Rückgriff auf das Abbruchmaterial könnte die Ressourceneffektivität der Wandbaustoffproduktion gesteigert werden. Dazu muss aber zunächst das notwendige Wissen über die Anforderungen erarbeitet und technologische Lösungen entwickelt werden. Alternative Verwertungswege sind erforderlich, wenn die insgesamt anfallende Menge werkstofflich oder rohstofflich verwertet werden soll. Von der chemischen Zusammensetzung her ist es vorstellbar, dass bestimmte Wandbaustoffe als Rohstoffe für andere Produkte dienen. Dieser Ansatz wäre zu vertiefen.

Bei Beton übersteigt die hergestellte Menge die entstehende Menge an Betonbruch deutlich, so dass die Rückführung und die damit verbundene Erhöhung der Ressourceneffektivität machbar sind. Betonbruch kann auch natürliche Gesteinskörnungen im Straßenbau ersetzen. Somit sind zwei Sektoren vorhanden, deren Aufnahmekapazitäten mindestens für die nächsten 10 Jahre ausreichend sein sollten. Im Mittelpunkt muss jetzt die verstärkte Umsetzung in die Baupraxis auf der Basis der vorhandenen Vorschriften stehen. Weiterentwicklungen sind auf dem technologischen Sektor und bei den Systemen der Vor-Ort-Überwachung von Qualität und Gleichmäßigkeit der Rezyklate anzustreben. Bei einer Weiterentwicklung der Vorschriften zur Betonherstellung wäre eine Kopplung der erlaubten Zugabemengen an die Qualität und Gleichmäßigkeit der Rezyklate analog zu der Verwertung von Asphalt zu prüfen.

Die Betonherstellung kann ggf. auch eine Alternative für die Verwertung von Mauerwerkbaustoffen sein. Um Gemische mit definierter Materialzusammensetzung beispielsweise 25 Masse-% Ziegel, 5 Masse-% Kalksandstein und 70 Masse-% Beton herzustellen, ist ein erhöhter Aufwand bei der Aufbereitung erforderlich. Auch hier besteht Entwicklungsbedarf.

Die Sandfraktionen müssen einer gesonderten Betrachtung unterzogen werden. Für ihre Sortierung nach Baustoffarten gibt es bisher kaum technische Lösungen. Für die Betonherstellung dürfen sie nicht eingesetzt werden. Hier liegt es näher ihr Rohstoffpotenzial zu nutzen, wie das beispielsweise bei der Herstellung von Aufbaukörnungen (Müller 2014) stattfindet. Die Entwicklung weiterer Produkte und Verfahren für die rohstoffliche Verwertung sollte vorangetrieben werden.

5 Eigenschaftsprofile von Recycling-Baustoffen nach dem Stand der Technik

5.1 Recycling-Baustoffe zur Anwendung im Straßenbau, zur Betonherstellung, im Erdbau oder für Verfüllungen

Die Klassifizierung von Primärbaustoffen erfolgt anhand der verwendeten Rohstoffe, der Herstellungstechnologie und der Eigenschaften wie Festigkeit und Rohdichte. Sie lässt sich nur teilweise auf Recycling-Baustoffe übertragen. Als Rohstoffe wären die Bauabfälle einzustufen, wobei zwischen Betonbruch und Mauerwerkbruch unterschieden werden kann. Die Herstellungstechnologien sind Aufbereitungsprozesse, mit welchen Körnungen oder Korngemische erzeugt werden. Die Eigenschaften, die nachzuweisen sind, beziehen sich auf das jeweilige Einsatzgebiet. Recycling-Baustoffe für Tragschichten oder für die Betonherstellung müssen bestimmte technische Eigenschaften aufweisen (Tabelle 10). Zu bestimmen sind beispielsweise die Materialzusammensetzung, die Korngrößenverteilung oder die Widerstandswerte gegen Abrasion bzw. gegen Frost-Tau-Wechsel. Werden die Recycling-Baustoffe im Erdbau, für Verfüllungen etc. eingesetzt, sind die wasserwirtschaftlichen Merkmale ausschlaggebend. Die Gehalte bestimmter chemischer Bestandteile, die aus den Recycling-Baustoffen ausgewaschen und in den Boden bzw. das Grundwasser gelangen können, wie lösliche Salze, ausgewählte Schwermetalle und organische Verbindungen, dürfen bestimmte Grenzwerte nicht überschreiten.

Die Höhe der Güteanforderungen ist gegenläufig. Bestehen hohe technische Anforderungen sind die wasserwirtschaftlichen Anforderungen geringer, weil die Interaktion Recycling-Baustoff – Wasser nicht oder nur in geringem Umfang stattfinden kann. Sind dagegen die technischen Anforderungen gering, wenn beispielsweise nur das Volumen der Recycling-Baustoffe für Verfüllungen genutzt wird, sind die wasserwirtschaftlichen Anforderungen streng. Zu beiden Bereichen liegen Daten aus Güte-überwachsprotokollen vor, die von Recyclingunternehmen im Internet veröffentlicht werden. Daraus ergibt sich ein vorläufiges Bild zu der werkstofflichen Leistungsfähigkeit und der wasserwirtschaftlichen Güte der Recycling-Baustoffe nach dem Stand der Technik. Eine systematische Auswertung dieser Daten steht noch aus. Sie ist notwendig, um mögliche Zusammenhänge zwischen der Anlagenkonfiguration und der Materialzusammensetzung auf der einen Seite und der Güte der Recycling-Baustoffe auf der anderen Seite zu ermitteln.

Tabelle 10: Bei der Güteüberwachung von Recycling-Baustoffen zu bestimmende technische Parameter

Zusammensetzung	Granulometrische Parameter	Physikalische Parameter			
Verwertung als Material für Frostschutzschichten oder Tragschichten					
Materialzusammensetzung Fein verteilte organische Sub- stanzen	Korngrößenverteilung Gehalt < 0,063 mm Gehalt an Überkorn Kornform Bruchflächigkeit	Wassergehalt Rohdichte Proctordichte Schlagzertrümmerungswert oder LA-Wert Widerstand gegen Frost-Tau- Wechsel			
Verwertung als rezyklierten Gestei	nskörnung für Beton				
Materialzusammensetzung Leichte organische Bestandteile Gehalte an - wasserlöslichem Chlorid - säurelöslichem Chlorid - wasserlöslichem Sulfat - säurelöslichem Sulfat - Gesamtschwefelgehalt	Korngrößenverteilung Gehalt < 0,063 mm Kornform	Wasseraufnahme Rohdichte Schlagzertrümmerungswert oder LA-Wert Widerstand gegen Frost-Tau- Wechsel			

Materialzusammensetzung von Recycling-Baustoffen

Die Hauptbestandteile der Rezyklate für den Straßenbau sind Beton und natürliche Gesteinskörnungen. Die Anteile sowohl an Beton als auch an natürlichen Gesteinskörnungen sollten möglichst hoch sein. Ein Grenzwert existiert nicht. Das Verhältnis der Anteile an Beton und an natürlichen Gesteinskörnungen schwankt beträchtlich (Abbildung 32). Ein Recycling-Baustoff mit über 85 Masse-% Betonbruch wird sich, zumindest wenn er für die Betonherstellung eingesetzt wird, anders verhalten als ein Recycling-Material mit nur 10 Masse-% Beton. Die mittleren Gehalte und die Schwankungsbreiten der Bestandteile, die in Recycling-Baustoffen für den Straßenbau begrenzt sind, zeigt Tabelle 11. Die Grenzwerte werden von den Mittelwerten, aber auch von den Maximalwerten eingehalten.

Zu den Rezyklaten, die für die Betonherstellung eingesetzt werden, liegen zum gegenwärtigen Zeitpunkt deutlich weniger Daten vor. Es wird keine Unterscheidung zwischen Beton und natürlichen Gesteinskörnungen vorgenommen. Die Summe der Gehalte dieser Bestandteile liegt bei 94,5 bis 99,4 Masse-%. Für die Auswertung standen allerdings nur 6 Datensätze zur Verfügung.

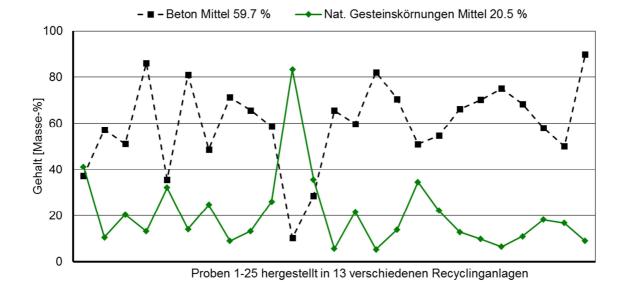


Abbildung 32: Gehalte an Beton und natürlichen Gesteinskörnungen von Recycling-Baustoffen für Anwendungen im Straßenbau (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen)

Tabelle 11: Gehalte an weiteren Bestandteilen von Recycling-Baustoffen für Anwendungen im Straßenbau, entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen, und Anforderungen nach den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau (TL Gestein StB 2004/Ausgabe 2007)

Bestandteil	Mittlere Gehalte ±	Min	Max	Anforderungen It. TL Gestein-StB 04
	Standardabweichung			
	[Ma	sse-%]		[Masse-%]
Asphalt	9.8 ± 8.3	0	26,2	≤ 30
Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug	8,1 ± 7,8	0	24,3	≤ 30
Kalksandstein, weichgebrannte Zie- gel, Putze	1,8 ± 1,8	0	4,8	≤ 5
Min. Leicht- und Dämmbaustoffe	0,2 ± 0,3	0	1,0	≤ 1
Fremdstoffe	0.1 ± 0.1	0	0,2	≤ 0,2

Recycling-Baustoffe, die im Erdbau eingesetzt werden und unter Bezeichnungen wie Erdbaustoff, Füllgut, Schüttmaterial etc. angeboten werden, werden aus Beton- oder Mauerwerkbruch hergestellt. Die Güteüberwachung konzentriert sich auf die wasserwirtschaftlichen Merkmale. Zusätzlich werden die Korngrößenverteilung und die Materialzusammensetzung ermittelt. Bei den aus Betonbruch hergestellten Erdbaustoffen dominiert anteilmäßig der Beton. Bei Erdbaustoffen, die auf Mauerwerk zurückgehen, liegen der Beton- und Ziegelgehalt in der gleichen Größenordnung (Abbildung 33). Mauerwerkbruch besteht also keinesfalls überwiegend aus Ziegel, sondern enthält einen etwa gleich großen Anteil an mineralisch gebundenen Baustoffen.

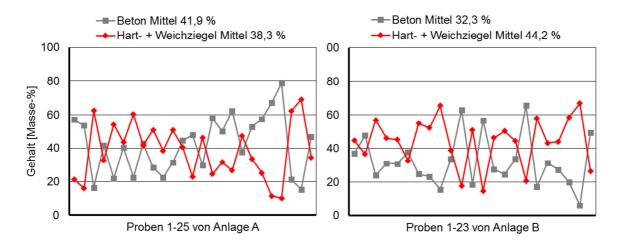


Abbildung 33: Gehalte an Beton und Ziegel von Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch für Verfüllungen (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen)

Gips in Recycling-Baustoffen

Von den Nebenbestandteilen, die in Rezyklaten auftreten können, muss den Baustoffen auf Gipsbasis besondere Aufmerksamkeit geschenkt werden, weil von ihnen negative baustoffliche und umweltrelevante Auswirkungen ausgehen können. Überdies steigt die Menge der verwendeten Gipsbaustoffe kontinuierlich an (Arendt 2000, Weimann/Matyschik/Schulz/Linß/Müller 2013), ohne dass effektive Verfahren für die Abtrennung beim Rückbau oder bei der Aufbereitung zur Verfügung stehen. Ausnahmen bilden die demontierbaren Produkte wie Gipskartonplatten oder Gipsblöcke. Der in Recycling-Baustoffen enthaltene Gips wird bei der Bestimmung der Materialzusammensetzung nicht explizit ausgewiesen. Vielmehr muss die Sulfatkonzentration in einem Eluat, das mit einem definierten Wasser-Feststoff-Verhältnis hergestellt wird, bestimmt werden. Bei Rezyklaten, die für die Betonherstellung verwendet werden sollen, ist zusätzlich eine analytische Bestimmung der Gehalte an säurelöslichem Sulfat vorzunehmen. Beispielhaft ergibt sich für ein Betonelement, das entweder unverputzt oder mit einem Gipsputz versehen ist, die folgende Situation (Abbildung 34):

- Der unverputzte Beton hat einen Gehalt von 0,5 Masse-% Sulfat, das wasserunlöslich in die Struktur des Zementsteins eingebaut ist. Dieses Sulfat ist nicht eluierbar. Auswirkungen auf die bautechnischen Eigenschaften sind nach heutigem Kenntnisstand nicht zu erwarten.
- Der mit einem Gipsputz versehene Beton hat einen Gesamtgehalt von 2,1 Masse-% SO₃, der sich aus dem wasserlöslichen und dem unlöslichen Anteil zusammensetzt. Aus dem wasserlöslichen Anteil von 1,6 Masse-% SO₃ ergibt sich eine fiktive Konzentration im 1:10-Eluat von 1900 mg SO₄²⁻/l, welche die Löslichkeitsgrenze von Gips übersteigt. Gemessen wird eine Eluatkonzentration von 1400 mg SO₄²⁻/l, die der maximalen Löslichkeit von Gips entspricht.

Bereits die vergleichsweise geringe Menge an Gips würde zu einer drastischen Überschreitung der zulässigen Eluatwerte führen. Ein Einsatz der Körnungen aus dem aufbereiteten Betonelement ohne vorherige Entfernung des Gipsputzes wäre nicht möglich.

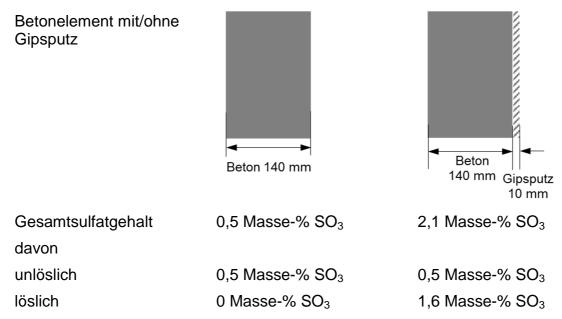


Abbildung 34: Gegenüberstellung der Sulfatgehalte in Betonelementen (Quelle: Eigene Darstellung)

Anhand der ausgewerteten Prüfprotokolle ergibt sich, dass in den Recycling-Baustoffen für Anwendungen im Straßenbau mit einer Ausnahme nur geringe Mengen an eluierbarem Sulfat enthalten sind (Abbildung 35). Die o.g. Situation stellt also einen Grenzfall dar. Sie bildet die Recyclingpraxis in Bezug auf betonstämmige Recycling-Baustoffe nicht ab. Korrelationen zwischen dem Sulfatgehalt und einzelnen per Sortieranalyse bestimmten Bestandteilen konnten nicht nachgewiesen werden. Ob die Technologie der Aufbereitung insbesondere das Vorhandensein einer Nasssortierung den Sulfatgehalt beeinflusst, wäre eine interessante Fragestellung. Da nur in einigen Prüfprotokollen Angaben zur Aufbereitungstechnologie gemacht werden, kann sie hier nicht beantwortet werden.

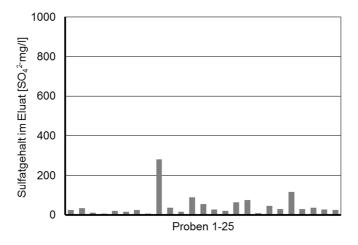


Abbildung 35: Sulfatgehalte im Eluat von Recycling-Baustoffen für Anwendungen im Straßenbau (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen)

Aus Mauerwerksbruch hergestellte Recycling-Baustoffe für Anwendungen im Erdbau sowie für Verfüllungen zeigen deutlich höhere Sulfatgehalte im Eluat (Abbildung 36). Ein höherer Gipsgehalt im Inputmaterial, das im Unterschied zu Betonbruch nahezu ausschließlich aus dem Hochbau stammen dürfte und ggf. ein geringerer Aufwand

bei der Aufbereitung könnten die Ursache sein. Korrelationen zu den Bestandteilen des Recycling-Baustoffs wurden ebenfalls nicht gefunden.

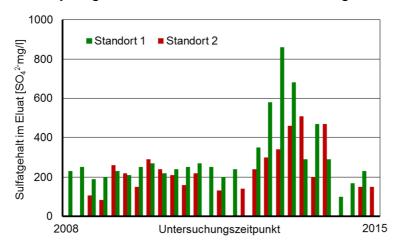


Abbildung 36: Sulfatgehalte im Eluat von Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch für Verfüllungen (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen)

Gemessen an der wasserwirtschaftliche Güte liegt die Qualität der gezielt für den Straßenbau hergestellten Recycling-Baustoffe aus Betonbruch deutlich über der von Rezyklaten aus Mauerwerkbruch.

Rohdichten und ausgewählte physikalische Parameter

Die bautechnische Leistungsfähigkeit von Recycling-Baustoffen wird im Wesentlichen von der Rohdichte und den Widerständen gegen die bei der Nutzung auftretenden Beanspruchungen bestimmt. Die Dichten von Recycling-Baustoffen aus Betonbruch liegen nahe bei den Dichten von sortenreinen Betonen (Tabelle 12). Bei den Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch liegt die mittlere Rohdichte im Bereich der Rohdichten von Ziegel und Kalksandstein. Die Spannweite bleibt unter dem Bereich, in welchem sich die sortenreinen Wandbaustoffe insgesamt bewegen, weil Wandbaustoffe mit geringer Rohdichte in der Regel nur in geringen Anteilen enthalten sind (siehe Abbildung 13) und somit wenig Einfluss auf die Rohdichte der Gesamtprobe nehmen.

Die Rohdichte ist die Leitgröße für alle Werkstoffeigenschaften, die von der Porosität beeinflusst werden. Das sind vor allem die Kornfestigkeit und der Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel. Für die Bestimmung der Kornfestigkeit mit dem Los-Angeles-Verfahren wird die Messprobe in einer rotierenden Trommel mit Stahlkugeln durch Abrasion und Schlag beansprucht. Nach Abschluss des Vorganges wird der Massenanteil der Probe ermittelt, der durch ein Analysensieb mit einer bestimmten Siebmaschenweite hindurch geht. Für Recycling-Baustoffe bewegt sich der bei der Los-Angeles-Prüfung entstehende Abrieb im Bereich von 20 bis 40 Masse-% (Abbildung 37). Er ist damit etwas höher als die Referenzwerte für natürliche Gesteinskörnungen. Für beide Gesteinskörnungsarten sind die Zunahme des entstehenden Abriebs mit abnehmender Rohdichte und die Streubreite nahezu übereinstimmend.

Tabelle 12: Daten zur Rein- und Rohdichten sowie Gesamtporositäten von Recycling-Baustoffen aus Beton- und Mauerwerkbruch, geprüft an Körnungen > 4 mm

	F	Recycling-Baustoffe aus Betonbruch				
Probenanzahl	13	28	13			
	Reindichte [kg/m³]	Rohdichte (ofentrocken) [kg/m³]	Gesamtporosität [Vol%]			
Mittelwert	2596	2277	14,5			
Standardabweichung	130	97	3,9			
Min	2570	2081	7,3			
Max	2616	2452	19,2			
	RC-Baustoff aus Mauerwerkbruch					
Probenanzahl	55	81	55			
	Reindichte [kg/m³]	Rohdichte (ofentrocken) [kg/m³]	Gesamtporosität [Vol%]			
Mittelwert	2693	1908	30,7			
Standardabweichung	40	197	5,4			
Min	2632	1390	18,9			
Max	2796	2510	42,9			

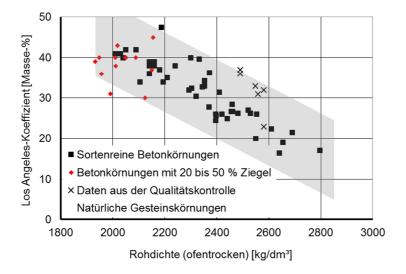


Abbildung 37: Los Angeles-Koeffizienten in Abhängigkeit von der Rohdichte im ofentrockenen Zustand (Quelle: Eigene Darstellung, Daten von Marta Sánchez de Juan/Pilar Alaejos Gutiérrez 2009, Springenschmid/Schmiedmayer/Friedl 1997, Schießl/Schmiedmayer/Friedl 1998, Barbudo/Agrela/Jiménez/Poon 2012)

Der Widerstand von Recycling-Baustoffen gegen Frost-Tau-Wechsel wird ermittelt, indem die Gesteinskörnungen nach einer 24-stündigen Wasserlagerung einer 10-maligen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung unterzogen werden. Im Anschluss wird der Masseverlust der Körnungen durch frostinduzierte Absplitterungen bestimmt. Infolge ihrer erhöhten Wasseraufnahme ist der Frostwiderstand von Betonrezyklaten ungünstiger als der von natürlichen Gesteinskörnungen (Abbildung 38). Es besteht eine diffuse Abhängigkeit von der Kornrohdichte, weil weitere Einflüsse überlagert sind. Dazu gehören die Zementart, der Zementgehalt, der Wasser-Zement-Wert und der Frostwiderstand der Gesteinskörnung, mit welcher der "Mutterbeton" hergestellt wurde. Luftporenbildner im Mutterbeton verbessern die Frostbeständigkeit der daraus erzeugten Körnungen deutlich. Die Wandbaustoffe haben wegen ihrer geringeren Rohdichten bzw. höheren Porositäten i.d.R. ungünstigere Frostwiderstände. Zudem

sind die Prüfbedingungen für Wandbaustoffe eher ungeeignet, weil diese Baustoffe für andere Einsatzbedingungen entwickelt wurden.

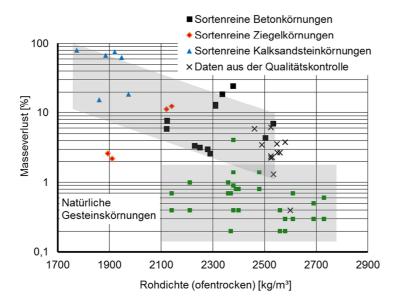


Abbildung 38: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel in Abhängigkeit von der Rohdichte im ofentrockenen Zustand (Quelle: Eigene Darstellung, Daten von Dombrowski 2003, Manns/Wies 1998, Mueller 2001, Eden et al. 2010)

Zu Beginn von Abschnitt 5.1 wurde dargestellt, dass die Anforderungen an die bautechnische und die wasserwirtschaftliche Güte gegenläufig sind. Güteüberwachte Recycling-Baustoffe aus Betonbruch erreichen bei beiden Anforderungen hohe Qualitäten. Die zur erneuten Betonherstellung verwendete Rezyklate "übererfüllen" die wasserwirtschaftlichen Anforderungen. Rezyklate, die lediglich als Schüttgut eingesetzt werden, "übererfüllen" die bautechnischen Anforderungen. Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch weisen für beide Anforderungen ungünstigere Werte auf. Daraus ergibt sich zwangsläufig ein Dilemma. Durch eine striktere Trennung der Stoffströme und eine erweiterte Aufbereitung ließe sich die wasserwirtschaftliche Güte verbessern. Trotzdem bleibt die bautechnische Qualität gering und das Material kann nur für Verfüllungen etc. eingesetzt werden.

5.2 Recycling-Baustoffe als Rohmaterial

Die Betrachtung von Recycling-Baustoffen als Rohstoff für neue Produkte erfordert die Untersuchung der chemischen Zusammensetzung (Tabelle 13). Die ursprünglichen Unterschiede der chemischen Zusammensetzung zwischen den Baustoffarten werden geringer. Trotzdem bleiben folgende typische Unterschiede bestehen:

- GV RC aus MW < GV RC aus Beton: Der im Mauerwerkbruch enthaltene Ziegel als gebranntes Produkt bewirkt den geringeren Glühverlust, während Betone und mineralisch gebundene Baustoffe chemisch gebundenes Wasser als essentiellen Bestandteil enthalten.
- Al₂O_{3 RC aus MW} > Al₂O_{3 RC aus Beton}: Der höhere Al₂O₃-Gehalt geht wiederum auf den Ziegel bzw. den zu seiner Herstellung verwendeten Ton zurück.
- CaO _{RC aus MW} < CaO _{RC aus Beton}: Betone und die mineralisch gebundenen Baustoffe basieren auf CaO-haltigen Bindemitteln.

Tabelle 13: Oxidzusammensetzung und Glühverlust (GV) von Recycling-Baustoffen aus Beton- bzw. Mauerwerk

	[Masse-%]	GV	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
Recycling-Baustoffe	Mittelwert	5,57	66,75	9,67	3,72	8,21	1,60	2,12	0,77	0,84
aus Mauerwerkbruch Probenanzahl: 64	Standardab- weichung	2,64	6,68	1,92	1,24	3,68	1,04	0,57	0,28	0,72
Recycling-Baustoffe	Mittelwert	9,73	65,09	6,03	2,45	11,93	1,20	1,58	0,80	0,58
aus Betonbruch Probenanzahl: 62	Standardab- weichung	5,46	10,18	1,51	0,68	5,30	1,02	0,67	0,32	0,18

Werden die Zusammensetzungen der Recycling-Baustoffe in die Dreistoffdiagramme eingetragen (Abbildung 39, Abbildung 40), sind die ursprünglichen Unterschiede zwischen den Hauptbaustoffen (siehe Abbildung 25, Abbildung 26) nur noch wenig sichtbar. Unter dem Aspekt der chemischen Zusammensetzung hat während der Abbruch- und Aufbereitungsphase gewissermaßen eine Vergleichmäßigung stattgefunden.

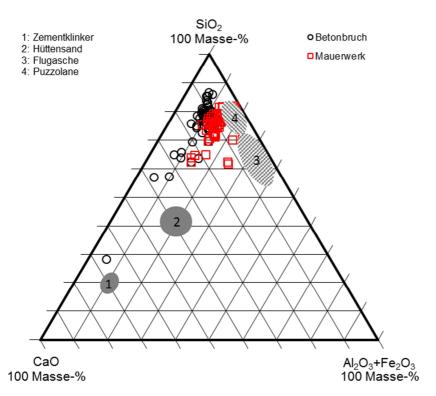


Abbildung 39: Recycling-Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO₂-CaO-(Al₂O₃+Fe₂O₃) zur Bewertung von Rohstoffen für die Herstellung von Zement (Quelle: Eigene Darstellung)

Hinsichtlich der rohstofflichen Verwertung lässt sich aus der Zusammensetzung schlussfolgern, dass die Recycling-Materialien als Korrekturkomponente für die Zementherstellung eingesetzt werden könnten. Allerdings sind die aus Betonbruch hergestellten Rezyklate mit einem Al_2O_3 von 10 Masse-% nicht in der Lage, Defizite im Aluminiumoxidgehalt von Zementrohstoffen auszugleichen. Mit einem CaO-Gehalt zwischen 10 und 30 Masse-% ist ihre Verwertung als Rohstoffkomponente zwar möglich. Der Beitrag zur Verbesserung der CO₂-Bilanz des Zementbrennprozesses – vorausgesetzt das CaO liegt nicht karbonatisch gebunden vor – ist aber gering. Rezyklate aus Mauerwerkbruch eignen sich als Al_2O_3 -Lieferant für die Zementklin-

kerherstellung, was bereits praktiziert wird (Lampl 2009). Sie haben von der Zusammensetzung her auch das Potenzial als puzzolanische Zusatzstoffe eingesetzt zu werden, wenn ihre Reaktivität durch mechanische und/oder thermische Vorbehandlungen erhöht werden kann.

Günstigere Voraussetzungen für eine rohstoffliche Verwertung bieten die Produkte auf keramischer Basis. Denkbar ist der Einsatz bei der Ziegelherstellung, wo die natürlichen Tonrohstoffe zumindest teilweise ersetzt werden können. Begrenzende Faktoren könnten hier die für die Formgebung erforderliche Plastizität und der Gehalt an freiem Kalk sein.

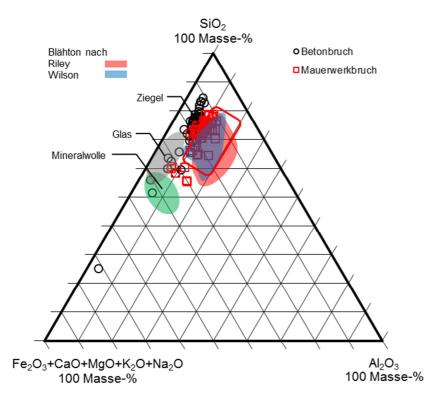


Abbildung 40: Recycling-Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO₂-(Fe₂O₃+CaO+MgO+K₂O+Na₂O)-Al₂O₃ zur Bewertung von Rohstoffen für die Herstellung keramischer Produkte (Quelle: Eigene Darstellung)

Ein anderer Weg des rohstofflichen Recycling ist die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen aus Mauerwerkbruch. Hierfür wird der Mauerwerkbruch, der mit einem Blähmittel versetzt wurde, gemahlen, granuliert und im Drehrohrofen gebrannt. Die Herstellungsbedingungen sind denen von Blähtonen vergleichbar (Müller 2014). Schwankungen des Ziegelgehaltes im Ausgangsmaterial zwischen 25 und 75 Masse-% haben nahezu keine Auswirkungen auf das Produkt. Weiterer Vorteil ist, dass sich die Technologie für die Verwertung der Sandfraktionen eignet. Vom erreichten Entwicklungsstand her könnte eine Umsetzung der Laborergebnisse in den Pilotmaßstab erfolgen.

6 Konkretisierung der Verwertungsmatrix und der erforderlichen Technologien

6.1 Verwertungskonzepte

Die Verwertungsmöglichkeiten für Recycling-Baustoffe hängen vom Typ und der jeweiligen Qualität ab. In der gegenwärtigen Recyclingpraxis dominieren die im Kapitel 5 beschriebenen zwei Typen: Aus Betonbruch hergestellte Rezyklate und solche aus Mauerwerkbruch. Durch einen selektiven Rückbau oder spezielle Aufbereitungstechniken erzeugte Recycling-Baustoffe aus sortenreinen Wandbaustoffen spielen bisher eine untergeordnete Rolle. Weitere Einflussgröße ist die Korngröße, in welcher das Material vorliegt. Insbesondere der Anteil der Sandfraktionen < 4 mm kann Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten nehmen.

Bei Recycling-Baustoffen aus Betonbruch überwiegt die werkstoffliche Verwertung. Sie bestehen durchschnittlich aus 60 Masse-% Beton und 20 Masse-% natürlichen Gesteinskörnungen. Betone weisen wiederum einen Anteil an natürlichen Gesteinskörnungen von 70 bis 80 Masse-% auf, so dass sich ein Gehalt an natürlichen Gesteinskörnungen von insgesamt 65 Masse-% ergibt, der in gebundener und ungebundener Form vorliegt. Wegen ihrer Nähe zu natürlichen Gesteinskörnungen sind Recycling-Baustoffe aus Betonbruch mit bestimmten Einschränkungen geeignet, natürliche Gesteinskörnungen zu substituieren. Technische Vorschriften, die auf den Ergebnissen systematischer Forschungen und auf Praxiserfahrungen beruhen, wurden entwickelt. Damit ist ein geregelter Einsatz in definierten Produkten des Straßenbaus und für die Betonherstellung möglich, der genutzt werden kann.

Wandbaustoffe sind auf die Anforderungen im Mauerwerkbau hin entwickelte Baustoffe. Ihre Eigenschaften unterscheiden sich deutlich von denen der natürlichen Gesteinskörnungen. Die substituierbaren Anteile der Gesteinskörnungen in Tragschichten oder bei der Betonherstellung sind deshalb begrenzt. Beim Einsatz in Tragschichten sind nach den gültigen Vorschriften trotzdem 30 Masse-% Klinker, Ziegel und Steinzeug im Anteil > 4 mm + 5 Masse-% Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe im Anteil > 4 mm zulässig. Bei der Betonherstellung beträgt der zulässige Anteil an Mauerziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine und nicht schwimmendem Porenbeton maximal 30 Masse-%. Diese Spannen werden bisher nicht genutzt (vgl. Tabelle 11). Ursachen sind einerseits die Modifizierung der Vorschriften in Richtung geringerer zulässiger Gehalte in einigen Bundesländern sowie die mangelnde Akzeptanz von Recycling-Bausoffen im Allgemeinen, die noch zunimmt, wenn die Rezyklate deutlich wahrnehmbare Anteile von Ziegeln enthalten. Andererseits erfordert eine gezielte Einstellung der zulässigen Gehalte einen technologischen Mehraufwand und ist deshalb gegenwärtig eher die Ausnahme.

Verwertungsdefizite bestehen also vor allem für Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch. Die im Folgenden vorgelegten Recherchen bzw. Überlegungen zu möglichen Verwertungswegen bauen auf zwei Konzepten auf (Abbildung 41):

Die Entwicklung von Stoffsubkreisläufen. Dieses Konzept wurde bereits 1998 von Kohler genannt und wurde bei den aktuellen Forschungen zum "Stoffkreislauf im Mauerwerksbau SIM" wieder aufgegriffen. Bei dieser "differenzierenden" Strategie werden die verschiedenen mineralischen Baustoffarten aus den Bauabfällen zunächst separiert. Die dann sortenrein vorliegenden Fraktionen an Ziegel, Kalksandstein, Poren- oder Leichtbeton können als Sekundärrohstoff für die Herstellung des jeweiligen Baustoffes wieder eingesetzt wer-

- den oder in anderen Sektoren verwendet werden. Für beide Möglichkeiten müssen die Anforderungen klar definiert werden. Zusätzliche Aufbereitungsschritte können erforderlich sein.
- Verwertung ohne vorherige Trennung. Bei dieser "integrierenden" Strategie wird das gesamte Bauabfallgemisch ohne Stofftrennung verwertet. Baut diese Verwertung auf den Werkstoffeigenschaften des Gemischs auf, muss sie sich nach der Komponente mit den ungünstigsten Eigenschaften beispielsweise hinsichtlich der Kornfestigkeit richten. Die Nutzung des Volumens des Gemisches für Verfüllungen von Hohlräumen bleibt meist als einzige Möglichkeit. Wird das Gemisch einer rohstofflichen Verwertung zugeführt, werden in einem stoffumwandelnden Prozess neue Produkte mit einheitlichen Eigenschaften erzeugt. Welcher Prozess in Frage kommt und welches Produkt erzeugt werden kann, hängt von der "Sekundärrohstoffchemie" des Materials ab.

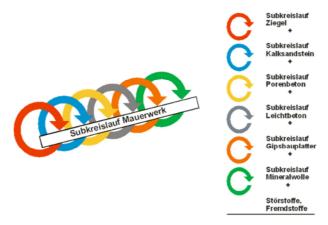


Abbildung 41: Konzepte für die Verwertung von Mauerwerkbruch nach einer Stofftrennung (Kohler 1998) bzw. als Gemisch (Eigene Darstellung)

Für die Trennung nach Baustoffarten als Voraussetzung für Stoffsubkreisläufe bestehen folgende Möglichkeiten:

- Trennung durch selektiven Rückbau: Bei dieser Methode bestehen Grenzen hinsichtlich der erreichbaren Sortenreinheit. Bei kleineren Steinformaten der Wandbaustoffe wie sie heute im Abbruchmaterial überwiegen, sind neben dem jeweiligen Wandbaustoff immer Mörtel in der Größenordnung von mindestens 20 Masse-% vorhanden. Putze und andere auf die Oberfläche aufgebrachte Baustoffe können zusätzlich vorhanden sein.
- Trennung durch Anreicherungseffekte in bestimmten Fraktionen: In Abhängigkeit von den Zerkleinerungswiderständen der nebeneinander vorliegenden Baustoffarten können An- und Abreicherungen bei der Zerkleinerung stattfinden. Der vollständige Übergang eines Bestandteils in eine bestimmte Fraktion tritt nicht auf, wie Untersuchungen an mit Gipsputz versehenen Mustersteinenoder -wänden gezeigt haben (Müller 2006, Landmann 2014). Weiterer Nachteil ist, dass die störstoffhaltige Fraktion in der Regel noch hohe Wertstoffgehalte aufweist, die dann der Verwertung entzogen und deponiert werden.
- Trennung durch Sortierung bei der Aufbereitung: Die Sortiertechniken nach Stand der Technik bauen auf der Rohdichte als Sortierkriterium auf. Durch sich überlappende Rohdichtebereiche (siehe Abbildung 13) ist keine Trennung in sortenreine Fraktionen möglich.

Eine zukünftige Lösung könnte darin bestehen, grob vorzerkleinerten Mauerwerkbruch mittels sensorgestützter Sortierung in seine Bestandteile zu trennen. Als Sortiermerkmale können die Farbe und/oder Spektren im Nahinfrarotbereich dienen. Für die Anwendung in der Recyclingpraxis gibt es bisher wenige Beispiele bzw. Berichte darüber. In Spanien wird Gips aus Bauschutt mittels NIR-Sensorik ausgeschleust. In der Schweiz wird ebenfalls eine entsprechend ausgerüstete Recyclinganlage betrieben. Eine direkte chemische Analyse als Grundlage der Sortierung ist mit dem Verfahren der Laser-Emissionsspektroskopie (LIBS) möglich und für Feuerfestmaterialien bereits in der Anwendung (Feierabend 2013). Ob sensorgestützte Verfahren zukünftig auch für die Sortierung von mineralischem Bauschutt zur Anwendung kommen werden, wird weniger von der technischen als von der wirtschaftlichen Machbarkeit abhängen.

6.2 Verwertung von Recycling-Baustoffen aus Betonbruch

Aus Betonbruch hergestellte Recycling-Baustoffe können in Frostschutz- oder Schottertragschichten im Straßenoberbau verwertet werden. Das gesamte Korngemisch, welches bei der Zerkleinerung entsteht, kann eingesetzt werden. Untersuchungen zum Verhalten der Recycling-Baustoffe nach längerer Verkehrsbeanspruchung ergaben, dass sich diese nicht ungünstig auf das Gebrauchsverhalten der gesamten Befestigung auswirken (Wörner 2004).

Die Herstellung von konstruktivem Beton unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen stellt neben dem Straßenbau den Baustoffkreislauf mit dem größten Potenzial dar. Verwertbar sind Fraktionen mit 2 mm als unterer Korngröße und beispielsweise 22 mm als oberer Korngröße. Damit kann nur ein Teil des Korngemisches zum Einsatz kommen. Werden die in der Abbildung 8 dargestellten Sieblinien zugrunde gelegt, beträgt der für die Betonherstellung verwertbare Anteil 2/22 mm etwa 40 Masse-%. Die Fraktionen < 2 mm mit 30 Masse-% und > 22 mm mit ebenfalls 30 Masse-% stehen für andere Verwertungen zur Verfügung. Eine Option ist die Zugabe zu den Korngemischen für Frostschutz- oder Schottertragschichten. Die Gegenüberstellung der Sieblinien von Recycling-Baustoffen für Tragschichten aus Güteüberwachungsprotokollen mit den Sollsieblinien zeigt, dass im feinkörnigen Bereich genügend Spielraum für die Zudosierung der anfallenden feinen Gesteinskörnungen vorhanden ist (Abbildung 42). Es muss aber sichergestellt werden, dass der Gehalt an Feinanteilen mit Partikelgrößen < 0,063 mm von 5 Masse-% dadurch nicht überschritten wird. Für die Sandfraktion von Mauerwerkbruch besteht diese Option nicht. Die Materialzusammensetzung in diesem Korngrößenbereich ist unbekannt. Die Charakterisierung anhand von Eluatwerten ist wenig aussagekräftig im Hinblick auf die bautechnische Eignung des Materials.

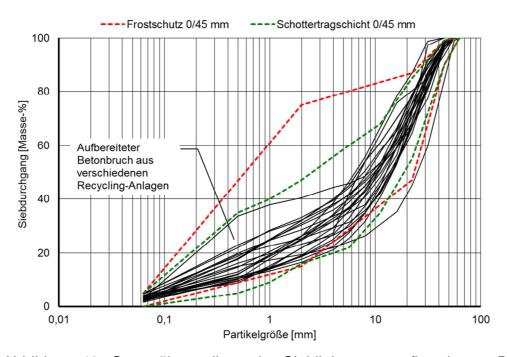


Abbildung 42: Gegenüberstellung der Sieblinien von aufbereitetem Betonbruch mit den Sollsieblinien für Gesteinskörnungen für Frostschutz- und Schottertragschichten (Quelle: Eigene Darstellung)

Als weitere Anwendung für Recycling-Baustoffe aus Betonbruch kommt die Herstellung von nicht-konstruktiven, unbewehrten Ortbetonen mit geringen Festigkeiten in Betracht (Tabelle 14). Die in den Festigkeitsklassen C 8/10, C 12/15 und C 20/25 angebotenen Betone werden mit flüssiger bis fließfähiger oder in erdfeuchter Konsistenz hergestellt:

- Betone mit fließfähiger Konsistenz kommen bei Hohlraumverfüllungen oder Hinterfüllungen z.B. von Kanälen, Arbeitsräumen, im Leitungsbau etc. zum Einsatz. Das Größtkorn der Betone liegt bei 4 mm. In diese Kategorie können auch die Bodenmörtel eingeordnet werden, die aus einem Matrixmaterial, geringen Mengen an Zement, Wasser sowie Stabilisatoren und Plastifikatoren bestehen. Als Matrixmaterial können neben Aushubböden als Ausgangspunkt der Entwicklung auch Recycling-Baustoffe zum Einsatz kommen.
- Zur Herstellung von zementgebundenen Fließestrichen, bei denen bis zu 50 Masse-% der Gesteinskörnungen durch Rezyklate ersetzt wurden, sind Laborversuche durchgeführt worden. Die Substitution von 20 Masse-% des Natursandes durch Rezyklate < 4 mm blieb ohne Auswirkungen auf die Eigenschaften des Endprodukts (Boehme 2013).
- Betone mit sehr steifer bis erdfeuchter Konsistenz kommen für das Setzen von Randsteinen zur Anwendung. Dafür können Recycling-Baustoffe ohne das Abtrennen der Sandfraktion verwendet werden. Die Anforderungen an Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Frostbeständigkeit werden erfüllt (Diedrich 2001, Schmidt 2004).

Die Herstellung von Betonwaren unter Verwendung von Recycling-Baustoffen ist ein weiteres Anwendungsfeld, das genutzt werden kann. In Bezug auf Mauersteine wurde in Laborversuchen mehrfach nachgewiesen, dass die Herstellung unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen ohne eine Erhöhung des Zementgehalts möglich ist. Größere Chargen von Steinen wurden bereits maschinell produziert und

bei Renovierungsarbeiten verwendet (Boehme 2011). Bei der Herstellung von Pflastersteinen ist die Verwendung von Betonrezyklaten im Kernbeton möglich. Für den Vorsatzbeton sind Rezyklate wegen des erforderlichen hohen Frostwiderstands eher nicht geeignet.

Tabelle 14: Übersicht über Verwertungsmöglichkeiten für betonstämmige Recycling-Baustoffe

Recycling-Baustoff aus Beton				
Materialzum- mensetzung [Masse-%] Partikelgröße [mm]	100 % Beton	100 % Recycling-Baustoff "Beton" (vgl. Abbildung 32, Tabelle 11)		
Gesamtes Korngemisch				
0/8, 0/11, 0/16, 0/22, 0/32, 0/45, 0/56, 0/63	Frostschutzschichten			
0/32, 0/45, 0/56	Schottertragschicht			
0/X	Ortbeton mit sehr steifer bis erdf	euchter Konsistenz		
0/X	Ortbeton mit sehr fließfähiger Ko	nsistenz		
Fraktionen				
< 2	Zugabe zu Frostschutzschichten			
< 2	Füllsand	_		
2/16, 2/22 etc.	Rezyklierte Gesteinskörnung in Konstruktionsbeton			
< 2, 2/X	Betonwaren			

In Bezug auf die rohstoffliche Verwertung von Betonbruch ist die Fragestellung naheliegend, ob daraus erneut Zement hergestellt werden kann. Wird dabei eine Mineralzusammensetzung wie bei traditionellem Zement mit dem Klinkermineral Alit als Hauptträger der Festigkeitsentwicklung angestrebt, führt der Weg nur über eine entsprechende chemische Zusammensetzung des Ausgangsmaterials und einen erneuten Brennprozess. Sortenreiner Betonbruch mit Gesteinskörnungen aus Kalkstein kommt in seiner Zusammensetzung dem Ausgangsmaterial der Zementherstellung nahe. Aber selbst Betone mit einem sehr hohen Kalkgehalt entsprechen in chemischer Hinsicht eher einem minderwertigen Kalkstein und können nur 20 % des dann benötigten, sehr hochwertigen natürlichen Kalksteins ersetzen (Mishulovich 2003). Beim Einsatz dieses Betonbruchs würde der Verbrauch an natürlichen Ressourcen bei der Zementherstellung zwar vermindert, die CO₂-Bilanz bleibt aber unverändert. Betonbruch aus silikatischen Gesteinskörnungen und Recycling-Baustoffe, bei denen der Gesteinskörnungstyp nicht bekannt ist, bestehen hauptsächlich aus SiO₂. Sie können als Korrekturkomponente eingesetzt werden.

Als Fazit kann für Betonbruch festgestellt werden, dass eine Reihe von Anwendungsgebieten für Recycling-Baustoffe aus Betonbruch vorhanden sind. In Bezug auf die Betonherstellung setzt die Erschließung dieses Potenzials voraus, dass die Recyclingunternehmen als Gesteinskörnungslieferanten und die Hersteller von Transportbeton oder Betonwaren enger zusammenarbeiten. Ein Abgleich zwischen den verfügbaren und den benötigten Mengen und Qualitäten muss erfolgen. Die Recyclingunternehmen müssen die benötigten Mengen kontinuierlich und in gleichbleibender Qualität bereitstellen. Die Betonhersteller müssen die Recycling-Baustoffe abnehmen. Da sowohl ein dichtes Netz an Recyclinganlagen als auch an Betonherstellern vorhanden ist, dürften Transportentfernungen unter 25 km realisierbar sein.

6.3 Verwertung von Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch

6.3.1 Verwertung nach dem Konzept der Stoffsubkreisläufe

Unter der Voraussetzung, dass aus Mauerwerkbruch ausreichend sortenreine Rezyklate gewonnen werden können, müssen Verwertungsmöglichkeiten, welche die spezifischen Stoffeigenschaften der unterschiedlichen Wandbaustoffe berücksichtigen, gefunden und die jeweiligen Anforderungen definiert werden. Dazu werden seit 2007 koordinierte, breit angelegte Studien und Untersuchungen unter der Überschrift "Stoffkreislauf im Mauerwerksbau" durchgeführt. Ein Spezifikum vom Mauerwerkbaustoffen ist die vergleichsweise hohe Porosität, die sie einerseits für die Herstellung von Vegetationsbaustoffen qualifiziert, andererseits aber ihre Eignung als Bestandteil von Recycling-Baustoffen für Tragschichten im Straßenbau in Frage stellt. Beide Anwendungsgebiete wurden untersucht.

Einsatzgebiete für Ziegelrezyklate

Die werkstoffliche Verwertung sortenreiner Ziegelsande und -splitte für den Sportund Tennisplatzbau oder in vegetationstechnischen Anwendungen wird seit langem praktiziert. Dabei werden die charakteristischen Merkmale von Ziegeln wie Farbe, Porosität und neutrales chemisches Verhalten genutzt. Wassergefährdende Stoffe dürfen nicht enthalten sein. Daraus können Einschränkungen resultieren, die neu produzierte Ziegel ebenso wie Ziegel aus dem Rückbau betreffen.

Bei Sportanlagen mit Tennenflächen wie beispielsweise Sandtennisplätze, Hartfußballplätze oder auch Reitplätze besteht die Oberfläche aus einem verdichteten, mineralischen Korngemisch ohne zusätzliches Bindemittel. Hierfür eignen sich aufbereitetes Bruchmaterial von Ziegelwerken oder auch sortenrein vorliegende Gemische von Ziegeln und Dachziegeln aus dem Rückbau. Eingesetzt werden hauptsächlich feine Körnungen 0/1 mm, 0/2 mm und/oder 0/3 mm, die ein- oder mehrschichtig bis zu einer Schichtstärke von 50 mm eingebaut werden. Der Bedarf an Ziegelkörnungen für diese Einsatzgebiete ist allerdings gering und wird hauptsächlich mit Bruchmaterial aus Ziegelwerken gedeckt.

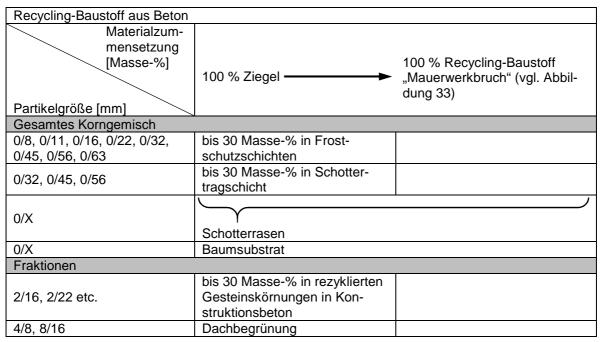
Bei der Begrünung von Bauwerken oder innerstädtischen Flächen wird zwischen Dach- und Bauwerksbegrünungen, Schotterrasen in ein- oder zweischichtiger Bauweise für gelegentlich benutzte Parkflächen und Notfahrbereiche sowie Baumsubstraten insbesondere im Bereich von Stadtstraßen unterschieden. Für alle drei Sektoren können Ziegelrezyklate eingesetzt werden. Die Anforderungen an Planung, Ausführung und Pflege sind in Richtlinien und Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau zusammengefasst. Folgende spezifischen Unterschiede bestehen:

Vegetationsbaustoffe für Dachbegrünungen müssen eine ausreichende, offene Porosität aufweisen. In den Poren werden Wasser und Nährstoffe gespeichert, um sie den Pflanzen über einen langen Zeitraum in ausreichender Menge zur Verfügung zu stellen. Die Anforderung an die Kornfestigkeit der eingebrachten Baustoffe ist gering, weil keine Verdichtung der Schüttungen stattfindet. Neben Gesteinskörnungen wie Lava, Bims, Blähton und –schiefer eignet sich auch aufbereiteter Ziegelbruch. Beispielsweise kann Ziegelsplitt der Fraktion 4/16 mm als Gerüstbaustoff oder in der Drainschicht eingesetzt werden. Durch die Absiebung des Feinkornanteils wird die notwendige, hohe Wasserdurchlässigkeit erreicht.

- Bei Fluranwendungen wie Schotterrasen muss ein Kompromiss zwischen der Tragfähigkeit der eingebrachten Schichten und den vegetationstechnischen Erfordernissen gefunden werden. Trotz der notwendigen Porosität, die den Luft- und Wasserhaushalt sichert, der für das Pflanzenwachstum wichtig ist, muss eine ausreichende Kornfestigkeit gewährleistet sein, damit bei den jeweils definierten Verkehrsbelastungen keine Verformungen auftreten. Das gesamte, bei der Zerkleinerung entstehende Kornband kann eingesetzt werden, wobei bestimmte Partikelgrößenverteilungen und Anteile < 0,063 mm einzuhalten sind.
- Straßenbäume benötigen einen durchwurzelbaren Bodenbereich von erheblicher Größe. Wenn die Baumgruben bis unter die Straßenbefestigung reichen, muss die Vegetationsschicht verdichtet werden, um eine ausreichende Tragfähigkeit zu erzielen. Trotzdem muss ein bestimmtes Gesamtporenvolumen als Voraussetzung für ein zufriedenstellendes Wachstum erhalten bleiben. Ausreichend feste Mineralstoffe mit offener Porosität wie Ziegel eignen sich für diese Aufgabe.

Die Verwertung von Ziegelrezyklaten als Nebenbestandteil von Recycling-Baustoffen für Frostschutz- und Tragschichten ist bis zu Anteilen von 30 Masse-% möglich. Wenn ein sortenreines Ziegelrezyklat vorliegt, ist die Einstellung dieses Gehaltes entweder über Dosiereinrichtungen oder mittels der Wägevorrichtungen von Radladern möglich. Eine gezielte Zudosierung von Recycling-Baustoffen mit Ziegelanteilen zwischen 30 und 100 Masse-% setzt voraus, dass zunächst der Ziegelanteil bestimmt und daraus die mögliche Zugabemenge berechnet wird. Die gleiche Vorgehensweise gilt für Bauwerksplitt für die Betonherstellung, der bis zu 30 Masse-% Mauerziegel aus gebranntem Ton, Kalksandstein und nicht schwimmenden Porenbeton enthalten darf. Neben den Ziegelgehalten sind die Nebenbestandteile der zudosierten Recycling-Baustoffe unbedingt zu berücksichtigen, um in der Summe ein anforderungsgerechtes Gemisch herzustellen. Die Einsatzmöglichkeiten von Ziegelrezyklaten sind in Tabelle 15 zusammengefasst.

Tabelle 15: Übersicht über Verwertungsmöglichkeiten für Recycling-Baustoffe aus Ziegel bis hin zu Mauerwerkbruch



Sortenreine Ziegelrezylate, die in Form von Brennbruch anfallen, können nach einer Mahlung der erneuten Ziegelproduktion zugeführt werden. Nach Umfragen wird das für ein Drittel des insgesamt anfallenden Brennbruchs von 220.000 t/a praktiziert (Rosen 2008). Die rohstoffliche Verwertung in Ziegeln aus gleichem Ausgangsmaterial wird also, wenn auch in sehr geringen Anteilen, bereits vorgenommen. Eine Rückführung ist auch für sortenreine Ziegel aus dem Rückbau möglich, wie von Van Dijk nachgewiesen wurde. Ziegel mit befriedigender Qualität wurden aus Rohmischungen, bei denen bis zu 50 Masse-% Ton durch Ziegelbruch ersetzt wurde, hergestellt (van DijK 2001, van Dijk 2004). Diese Aussage kann allerdings nicht verallgemeinert werden. Im Unterschied beispielsweise zu Gesteinskörnungen, die zusammen mit dem genormten Produkt Zement zu Beton verarbeitet werden, werden auch die Merkmale der jeweiligen Tonrohstoffe die Anforderungen und die Anteile, die substituiert werden können, beeinflussen. Nach Untersuchungen der Wienerberger AG war die Substitution von 20 Masse-% eines lehmigen Tons ohne Verschlechterung der Produktgualität möglich. Sehr plastische Tone beispielsweise Westerwälder Tone konnten bis zu 60 Masse-% des fein gemahlenen Füllers aufnehmen. Trotzdem waren qualitativ hochwertige Produkte mit geringer Porosität herstellbar (Koch 2012).

Eine Orientierung zu den Anforderungen gibt das unter der Bezeichnung "Cerafill" von einer belgischen Firma angebotene Produkt, das aus der "roten" Fraktion von Bauabfällen hergestellt wird und als Rohstoff für die Ziegelproduktion eingesetzt werden kann (Tabelle 16). Das Material hat eine Partikelgröße < 150 μm und muss folgende chemische Merkmale aufweisen: Glühverlust < 3 Masse-%, Gesamtschwefelgehalt < 0,5 Masse-%, CaCO₃-Gehalt < 10 Masse-%.

Tabelle 16: Vorläufige Qualitätsparameter für Bruchmaterial für die Ziegelherstellung

Komponente	Anforderung	Begründung/Auswirkungen
Partikelgröße	< 150 μm	Aufrechterhaltung der für die Formgebung erforderlichen Plastizität. Möglichst homogene Verteilung des Ziegelmehls in der Masse.
Glühverlust	< 3 Masse-%	
Gesamtschwefel	< 0,5 Masse-%	Lösliche Sulfate können Ausblühungen verursachen.
CaCO ₃	< 10 Masse-%	Beeinflussung von Sinterverhalten und Farbe Anforderungen an Partikelgröße + CaCO ₃ -Gehalt stellen sicher, dass keine Kalkabsprengungen beispielsweise durch grobe Partikel aus Kalkputzen auftreten.

Einsatzgebiete für Kalksandsteinrezyklate

Die werkstoffliche Verwertung von Kalksandsteinbruch war Gegenstand systematischer Untersuchungen, die von der Forschungsstelle der Kalksandsteinindustrie zunächst allein, später im Verbund mit den anderen Wandbaustoffherstellen vorangetrieben wurde. Wesentliche Ergebnisse sind:

- Für die vegetationstechnische Anwendung in Baum- und Dachsubstraten sind Kalksandsteinkörnungen bedingt geeignet. In den umfangreichen Untersuchungen zeigte sich ein verzögertes Pflanzenwachstum, verursacht durch die anfangs hohen pH-Werte. Durch die Auswahl von Pflanzengattungen, die das alkalische Milieu bevorzugen, lässt sich dieser Nachteil ausgleichen (Bischoff et al. 2014).
- Bei der Herstellung von Betonen mit groben Gesteinskörnungen aus Kalksandsteinkörnungen ergab sich eine deutliche Abnahme der Festigkeit mit

zunehmendem Anteil, die durch die höhere Porosität der Körnungen aus Kalksandstein verursacht wird. Der verbesserte Frostwiderstand hat vermutlich die gleiche Ursache, weil die porösen Körnungen selbst als Expansionsraum für das sich bildende Eis dienen. Die Zugabemenge von 10 Vol.-% bezogen auf die grobe Gesteinskörnung sollte nicht überschritten werden, um Qualitätseinbußen gegenüber Betonen mit natürlichen Gesteinskörnungen zu vermeiden (Eden et al. 2003). Das entspricht etwa dem nach der gültigen Vorschrift denkbaren Fall, dass die groben Gesteinskörnungen zu 35 Vol.-% durch Bauwerksplitt substituiert werden, der maximal 30 Masse-% Kalksandstein enthalten darf.

• Für die Verwertung im Straßenoberbau gilt, dass nicht mehr als 5 Masse-% an Kalksandstein enthalten sein dürfen. Dies ist begründet in der höheren Porosität, die eine deutliche Verringerung der Kornfestigkeit und des Frostwiderstands verursacht. Um eine gesicherte Aussage zur Erhöhung des zulässigen Anteils machen zu können, wurden weitere Untersuchungen für notwendig gehalten (Eden et al. 2003). Die Ergebnisse der erneuten Untersuchungen zeigen wiederum, dass eine Zugabe von 40 Masse-% Kalksandstein in Baustoffgemischen für Tragschichten ohne Bindemittel auf Basis der Laborergebnisse möglich zu sein scheint. Sichergestellt werden muss, dass kein Gipsputz zusammen mit dem Kalksandsteinbruch eingetragen wird, da schon geringe Mengen das Gesamttragverhalten des Baustoffgemisches deutlich reduzieren (Eden et al. 2010).

Sortenreine Kalksandsteinrezyklate, die als Verschnittabfälle bei der Konfektionierung von Kalksandstein-Bausätzen anfallen, werden bereits zu geringen Anteilen in produktionsinternen Kreisläufen verwertet. Angaben zu den Mengen werden nicht gemacht (Steinbruch und Sandgrube 2007). Aus den Laboruntersuchungen zum Subkreislauf "Kalksandstein" ging allerdings hervor (Eden 1994), dass die Substitution der natürlichen Sande durch aufbereiteten Kalksandsteinbruch bereits ab einem Anteil vom 7 Masse-% mit einer Abnahme der Rohdichte verbunden ist, weil der Kalksandsteinbruch eine höhere Porosität als die üblicherweise eingesetzten Sande hat. Infolge der Rohdichteabnahme nimmt auch die Festigkeit ab. Durch eine höhere Kalkdosis bzw. längere Dampfhärtezeiten lässt sich der Festigkeitsverlust ausgleichen, was allerdings einen höheren Primärenergieinhalt im Vergleich zu Kalksandsteinen, die auf herkömmliche Weise produziert wurden, zur Folge hätte. Bei Kalksandsteinbruch mit bautypischen Verunreinigungen treten zum Teil bereits bei kleinsten Anteilen erhebliche Festigkeitsverluste auf (Eden 1997).

Bei Untersuchungen in den Niederlanden (Schuur 2000) wurden Kalksandsteine im Labormaßstab hergestellt, wobei der Sand zu 20, 50 und 100 Masse-% durch Sande aus Kalksandstein-, Ziegel- bzw. Betonbruch ersetzt wurde. Die Sande stammten von Bauschutt-Recyclinganlagen und lagen als Körnungen 0/5,6 mm vor. Die mechanischen Eigenschaften der Kalksandsteine mit den Recycling-Sanden waren denen der Steine ohne Zusätze vergleichbar. Im technischen Maßstab wurden diese Ergebnisse bestätigt. Aus den Untersuchungen wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass die Substitution von 20 Masse-% des Natursandes durch Recycling-Sande die mechanischen Eigenschaften der Steine keinesfalls verschlechtert. Allerdings wird das wichtige, optische Erscheinungsbild durch geringe Anteile von organischen Bestandteilen negativ beeinflusst, was eine Grenzwertsetzung für den Gehalt an organischem Kohlenstoff erforderlich macht. Eine Sandwäsche wird empfohlen, um Qualitätsverbesserungen zu erreichen.

Angaben zu relevanten Qualitätsparametern und den Grenzen für bestimmte Verunreinigungen – ebenfalls aus einer niederländischen Quelle – sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Zusätzlich wären Anforderungen an die Partikelgröße zu definieren, um so die Kornporigkeit der Rezyklate als Ursache der Festigkeitsabnahme zu verringern oder eine höhere Packungsdichte zu erreichen.

Tabelle 17: Vorläufige Qualitätsparameter für Bruchmaterial für die Kalksandsteinherstellung (Hendriks 2000: Seite 132)

Komponente	Anforderung	Begründung/Auswirkungen
Reaktives SiO ₂	-	Reaktivität ist der von natürlichen Sanden vergleichbar.
TOC aus Holz, Kunststoffen, Dämmstoffen, Bitumen	< 0,1 Masse-%	Organische Komponenten verursachen Schwachstellen im Gefüge. Punktförmige schwarze oder braune Verfärbungen entstehen.
Humusartige Komponenten	keine	Verursachen Verfärbungen.
Chloride	< 0,015 Masse-%	Frost-Tau-Widerstand wird verringert. Ausblühungen können entstehen. Korrosion der Anlagen.
Sulfate	< 0,1 Masse-%	Der Löschprozess wird verzögert, was zu einer Volumenzu- nahme bei der Autoklavierung führt. Ausblühungen können entstehen. Als Bariumsulfat oder im Zementstein gebunde- nes Sulfat ist weniger kritisch als lösliches Sulfat.
PAKs	< 50 mg/kg	Grenzwert resultiert aus wasserwirtschaftlichen Erfordernissen.

Einsatzgebiete für Porenbetonrezyklate

Porenbeton ist von den Werkstoffeigenschaften her auf eine geringe Rohdichte und ein hohes Wärmedämmvermögen hin entwickelt. Die Festigkeit daraus hergestellter Körnungen ist demzufolge sehr gering, so dass die Einsatzgebiete Straßenbau und Betonherstellung nahezu ausgeschlossen sind. Seine hohe Wasseraufnahme macht den Porenbeton aber für die Konditionierung von Baggergut und Boden, als Ölbinder oder für den Einsatz als Hygienestreu geeignet. Zumindest für die letztgenannten Einsatzgebiete werden Produktionsabfälle der Porenbetonwerke verwendet. Weitere Möglichkeiten der Verwertung von sortenrein vorliegendem Porenbeton sind:

- In Kombination mit Ziegel- oder Kalksandsteinkörnungen kann Porenbeton als Wasserspeicher in Dachsubstraten dienen (Bischoff et al. 2014). Eine gezielte Pflanzenauswahl, bei welcher auch die hohen Gehalte an löslichem Sulfat zu berücksichtigen sind, wird erforderlich sein.
- Porenbeton-/Kalksandstein-Gemische werden mit methanoxidierenden Bakterien besiedelt und in einer oberen Schicht auf Hausmülldeponien aufgebracht.
 Das aus dem Deponiekörper entweichende Methan wird durch die Bakterien in einer Oxidationsreaktion zu CO₂ und Wasser umgewandelt (Eden 2014).
- Die Herstellung von zementgebundenen Leichtsteinen und Mörteln aus Porenbeton war zunächst Gegenstand von Laborversuchen, in welchen die Machbarkeit nachgewiesen und entsprechende Rezepturen entwickelt wurden (Hlawatsch 2008). Auf dieser Basis erfolgte ein Scale up, um den Produktionsweg für die industrielle Fertigung aufzuzeigen (Aycil 2014). Aus Porenbetonrezyklaten, die von einem Recyclingunternehmen aus dem Bauschutt selektiert und getrennt aufbereitet wurden, sind auf einer Rüttelpresse eines Betonsteinherstellers insgesamt 2.300 Mauersteine hergestellt worden. Parallel erfolgte die Herstellung eines Mörtels aus getrocknetem Porenbetonrezyklat, Zement sowie Zusatzmitteln. Es wird angestrebt, die Produkte für die Errich-

tung von nicht-tragenden Innenwänden in einem Demonstrationsobjekt in Bremen anzuwenden.

Die werksinterene Kreislaufführung von Porenbetonbruch wird praktiziert (Xella 2014). Konzepte für die Rücknahme von Porenbetonbruch aus dem Rückbau wurden bereits vor 15 Jahren entwickelt (Lang-Beddoe 1999). Darin wird von einem rückführbaren Anteil von 15 Masse-% der Porenbetontrockenrezeptur ausgegangen.

Einsatzgebiete für Leichtbetonrezyklate

Leichtbetone werden auf Basis von natürlichen leichten Gesteinskörnungen wie Bims oder unter Verwendung von Blähtonen hergestellt. Bimsvorkommen befinden sich hauptsächlich im Neuwieder Becken. Die Erschöpfung der Vorkommen zeichnet sich ab. Leichtbeton kann ähnlich wie Normalbeton nach einer Aufbereitung wieder als Gesteinskörnung eingesetzt werden. Im Unterschied zu Normalbeton werden die Körnungen infolge des anhaftenden Zementsteins schwerer. Ihr Wiedereinsatz in Sortimenten, wo die Rohdichte und ein gutes Wärmedämmvermögen keine Rolle spielen, ist möglich. Für produktionsinterne Leichtbetonabfälle wird bereits eine Kreislaufführung vorgenommen. Eine Orientierung für die substituierbare Menge können die Vorgaben zur Betonherstellung aus rezyklierten Gesteinskörnungen geben, wonach 35 Vol.-% der groben Körnungen substituiert werden dürfen. Somit dürfen bis zu 20 Masse-% der leichten Gesteinskörnungen Rezyklate sein.

Als Fazit kann für Mauerwerkbruch festgestellt werden, dass hauptsächlich für sortenreine Ziegel eine Reihe von Verwertungsmöglichen bestehen, die unmittelbar genutzt werden können. Für die anderen Wandbaustoffe liegen Forschungsergebnisse mit unterschiedlichen Aussagen und unterschiedlichem Entwicklungsstand vor. Eine unmittelbare Umsetzung der Verwertungsmöglichkeiten in die Praxis ist nicht zu erwarten. Außerdem stellt die Erzeugung sortenreiner Körnungen eine technologische Herausforderung dar, die bisher nicht gelöst ist.

6.3.2 Verwertung ohne vorherige Trennung

Bei der integrierenden Strategie für die Verwertung von Mauerwerkbruch wird das Gemisch ohne Stofftrennung verwertet. Diese Strategie stellt die wahrscheinlich einzige Option dar, die Ressourceneffizienzpotenziale der Sandfraktionen hochwertig zu erschließen. Anstelle der werkstofflichen Eigenschaften, die bei der Verwertung der Körnungen genutzt werden, tritt die chemische Zusammensetzung in den Vordergrund. Das Material wird als ausschließlicher oder ergänzender Rohstoff in einem stoffumwandelnden, thermischen Prozess verwendet. Durch die thermische Behandlung wird ein Produkt mit neuen Eigenschaften erzeugt. Gleichzeitig kann der Prozess zumindest für Gips als Schadstoffsenke dienen. Bei einer ausreichend hohen Brenntemperatur um 1200 $^{\circ}$ C wird der Gips zersetzt. Das SO $_2$ kann mittels Entschwefelungsverfahren aus dem Rauchgas abgeschieden und als Rauchgasentschwefelungsgips wiederverwertet werden.

Ausgehend von den Darstellungen der chemischen Zusammensetzung von Betonund Mauerwerkbruch in den Dreistoffdiagrammen (Abbildung 39 und Abbildung 40) ist die rohstoffliche Verwertung in folgenden Prozessen oder Produkten möglich bzw. denkbar:

• Herstellung von Zement: Mauerwerkbruch kommt als Al₂O₃-haltige Rohmehlkomponente für die Zementherstellung in Frage (vgl. Lampl 2009).

- Herstellung von Ziegeln: Von den verschiedenen Wandbaustoffen hat die Ziegelherstellung am ehesten das Potenzial Mauerwerkbruch rohstofflich zu verwerten. Bisher werden bei der Ziegelherstellung bereits Nebenprodukte für die Porosierung, als Sinterhilfsmittel oder als magernde Zusätze verwertet. Der Einsatz von Mauerwerkmehl ist vorstellbar, wenn es dadurch zu keinen negativen Auswirkungen auf die Produktqualität kommt. Eine sorgfältige Abstimmung zwischen den Eigenschaften und der Menge des zugegebenen Mauerwerkbruchs einerseits und den Merkmalen der Tonrohstoffe, der Art der hergestellten Ziegel und den technologischen Möglichkeiten andererseits ist erforderlich.
- Herstellung von leichten Gesteinskörnungen: Die Ergebnisse aus dem Forschungsprojekt "Aufbaukörnungen" (Müller 2014) belegen, dass sich Mauerwerkbruch als Rohstoff für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen ähnlich Blähtonen eignet. Schwankungen in der Zusammensetzung des Ausgangsmaterials wirken sich wenig auf das Produkt aus. Das Verfahren könnte sich für die Rückgewinnung des im Mauerwerkbruch enthaltenen Gips eignen.
- Herstellung puzzolanischer Zusatzstoffe: Mauerwerkbruch könnte von der Zusammensetzung her eine Rohstoffkomponente für die Herstellung von puzzolanischen Zusatzstoffen sein, die nach der geplanten Stilllegung von Kohlekraftwerken an die Stelle von Steinkohlenflugasche treten könnten. Diese Idee ergibt sich allerdings nur als Schlussfolgerung aus dem Dreistoffdiagramm und ist im Unterschied zu den anderen Varianten in keiner Weise überprüft.

Der Entwicklungsstand der vorgeschlagenen Verwertungswege ist ganz unterschiedlich. Im technischen Maßstab bereits durchgeführt wird der Einsatz von Nebenprodukten bei der Zement- und Ziegelherstellung. Eine im Labormaßstab abgeschlossene Entwicklung, die in einer Pilotanlage zu überprüfen wäre, liegt im Fall der Aufbaukörnungen vor. Lediglich als Idee existiert die Verwertung von Mauerwerkbruch als Rohstoff für ein puzzolanisches Produkt, das die Nachfolge von Steinkohlenflugasche antreten könnte.

7 Szenarien für die Verwertung

Die Ermittlung des Materialbestands und des Materialbedarfs für die gebaute Umwelt steht im Mittelpunkt einer beträchtlichen Anzahl von Untersuchungen (z.B. Steger et al. 2011, Schiller et al. 2015). Die Ergebnisse können zu einer summarischen Betrachtung der Aufnahmekapazitäten der verschiedenen Sektoren genutzt werden. Die Grundlage dieser Untersuchungen sind Bottom-Up-Ansätze, in welchen das Materiallager "Bau" aus dem vorhandenen Bestand an Bauwerken unter Verwendung von Kennzahlen für die Materialintensität berechnet wird. Aus den in Abbildung 43 dargestellten Ergebnissen kann entnommen werden, dass die Verkehrsinfrastruktur den höchsten Materialbestand aufweist. Die Infrastrukturbauten für Wasser und Abwasser sowie Bauten für Energieerzeugung und -verteilung folgen mit deutlichem Abstand. Beim Materialbedarf dominiert die Verkehrsinfrastruktur ebenfalls. Auf diesem Sektor hat die Instandhaltung den größten Materialbedarf, während bei den anderen Infrastruktursektoren der Materialbedarf für den Neubau überwiegt. Werden Gebäude in die Betrachtungen einbezogen, stehen der Materialbestand und der Materialbedarf für Neubau und Instandhaltung von Wohngebäuden an zweiter, der von Nichtwohngebäuden an dritter Stelle.

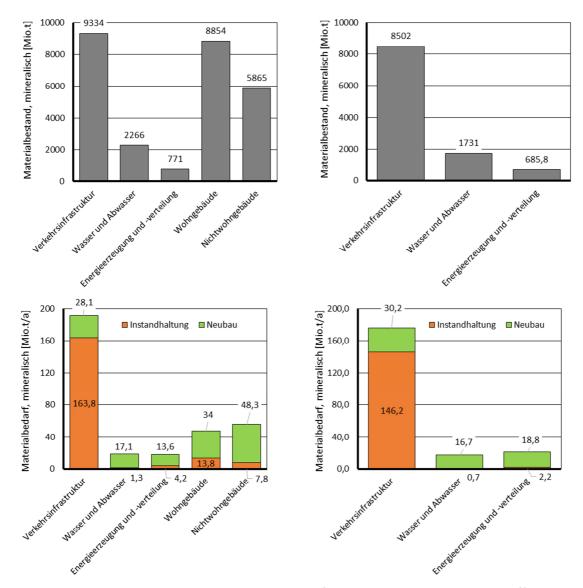


Abbildung 43: Bestand und jährlich zu geführte mineralische Baustoffe nach dem Botton-Up-Ansatz (Quelle: Eigene Darstellung, links Daten von Schiller et al. 2015: Tabellen 13,14,15,48,49,50,51; rechts Steger et al. 2011: Abbildungen 12, 13, 14,15,16,17,19,22,25,28)

Die angegebenen Daten beziehen sich auf die im Bestand vorhandenen bzw. jährlich zugeführten mineralischen Baustoffe ohne Differenzierung nach Verwendungs- bzw. Baustoffart. Bei einer Summation des Materialbedarfs von der Verkehrsinfrastruktur bis zu den Nichtwohngebäuden ergibt sich eine Menge von 332 Mio.t/a. Dem steht eine jährliche Produktionsmenge an mineralischen Baumaterialien von 532 Mio.t/a (Deutschland Rohstoffsituation 2013: Tabelle 70) gegenüber. Eine schlüssige Erklärung für die Differenz von über 200 Mio.t steht aus.

Der Materialverbrauch für Neubau, Erweiterung sowie Instandhaltung der Verkehrsinfrastruktur, der Infrastrukturbauten für Wasser und Abwasser, der Bauten für Energieerzeugung und –verteilung beträgt nach dem Bottom-up-Ansatz 228 Mio.t/a. Für Wohn- und Nichtwohngebäude werden 104 Mio.t/a benötigt. Dem steht eine Menge von Recycling-Baustoffen aus Betonbruch von 27 Mio.t/a gegenüber. Würde entgegen der gegenwärtigen Vorgehensweise ein "Mischungsgebot" für Rezyklate bestehen, die mindestens die Anforderungen der umwelttechnischen Zuordnungsklasse Z erfüllen, würde eine Zugabe zu natürlichen Gesteinskörnungen von unter

10 Masse-% ausreichen, um die betonstämmigen Rezyklate zu verwerten. Signifikate Veränderungen der bautechnischen Eigenschaften dieser aus natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen bestehenden Gemische gegenüber reinen natürlichen Gesteinskörnungen wären nicht zu erwarten. Die Vorgaben hinsichtlich der Einsatzgebiete könnten vereinfacht werden. Bei diesem Konzept wäre eine vollständige Verwertung der Rezyklate aus Betonbruch, die mit den gegenwärtig verfügbaren Aufbereitungstechniken hergestellt werden, möglich.

Szenario 1: Aufbereitung und Verwertung nach dem Stand der Technik

Es wird davon ausgegangen, dass durch einen selektiven Rückbau und/oder eine Vorsortierung auf der Abbruchbaustelle das Ausgangsmaterial getrennt nach Betonbruch, Mauerwerkbruch und Störstoffen vorliegt. Beim Betonbruch sind zwei Vorgehensweisen möglich:

- Nach der Zerkleinerung erfolgt keine weitere Trennung nach der Partikelgröße, so dass die Recycling-Baustoffe als Korngemische beispielsweise 0/45 mm vorliegen.
- Nach der Zerkleinerung erfolgt eine Siebtrennung bei einer Partikelgröße von 2 mm, so dass die Recycling-Baustoffe als feine und grobe Gesteinskörnungen vorliegen. Letztere können weiter in Korngruppen beispielsweise 2/16 mm, 16/32 mm klassiert werden.

Die Korngemische können in Funktionsschichten im Straßenoberbau eingesetzt werden, wenn sie die bautechnischen Anforderungen erfüllen. Der Schwerpunkt könnte dabei der Neubau und die Erweiterung von Gemeindestraßen sein, die den höchsten Materialbedarf innerhalb der Straßeninfrastruktur aufweisen. Für ungebundene Schichten werden jährlich ca. 10 Mio.t Gesteinskörnungen benötigt (Abschätzung siehe Anlage 2). Weil die wasserwirtschaftliche Güte von betonstämmigen Recycling-Baustoffen in der Regel keinen Grund zur Besorgnis liefert, ist auch die Verwendung für das Anlegen von Dämmen oder im Erdbau möglich, was aber ein niedrigeres Verwertungsniveau bedeuten würde. Die durch Siebung hergestellten Korngruppen können für die Herstellung von Transportbeton, die feinen Gesteinskörnungen als Füllsand oder für die Herstellung von Betonwaren verwendet werden (Abbildung 44). Der Einsatz zum Neubau oder zur Erweiterung von Gemeindestraßen hat ebenso wie die Verwendung für die Transportbetonherstellung den Vorteil, dass zwischen Herstellern und Abnehmern von Recycling-Baustoffen kurze Transportwege bestehen.

Beim Mauerwerkbruch wird von der von einigen Recyclingunternehmen praktizierten Vorgehensweise ausgegangen, dass größere Ziegelbruchstücke und Vollziegel zunächst händisch aussortiert und separat zerkleinert werden. Die Korngemische können als Baumsubstrat oder Schotterrasen eingesetzt werden. Die Korngruppen eignen sich für die Herstellung von Substraten für die Dachbegrünung. Das Material, das für diese Anwendungsfelder eingesetzt werden soll, muss vegetationstechnische Anforderungen erfüllen, so dass es sich um eine hochwertige Verwertung handelt. Der Anteil, der aus dem Mauerwerkbruch händisch aussortierten Ziegel wird in Bezug auf die insgesamt anfallende Menge aber gering sein (Abbildung 44). Im Straßenbau sind Recycling-Baustoffe, die aus Mauerwerkbruch hergestellt werden, nicht anwendbar. Ihre Anwendung im Erdbau ist wegen der teilweise ungünstigen Eluatwerte nur eingeschränkt möglich. Eine Alternative wäre die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen mit Hilfe eines thermischen Verfahrens (Müller 2014). Auf diese Weise könnte ein homogenes Produkt mit reduziertem Sulfatgehalt erzeugt werden,

das u.a. für die Leichtbetonherstellung einsetzbar ist. Allerdings dürfte nur ein Anteil des insgesamt anfallenden Mauerwerkbruchs so verwertet werden können.

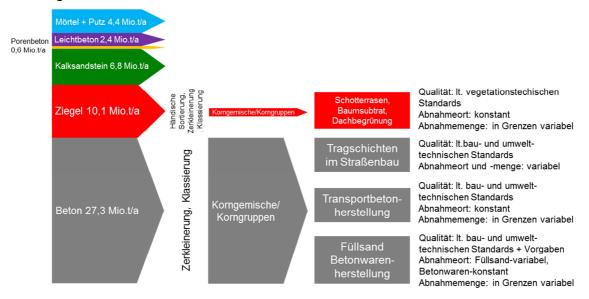


Abbildung 44: Verwertungspfade für Recycling-Baustoffe nach dem Stand der Technik (Quelle: Eigene Darstellung)

Das Potenzial von Bauschutt kann unter abfallwirtschaftlichem Blickwinkel mit der Recyclingquote und unter rohstofflichem Blickwinkel mit der Substitutionsquote erfasst werden. Die für die Berechnung erforderlichen Definitionen sind in Abbildung 45 angegeben.

```
Recyclingquote = \frac{Menge an zu Recycling-Baustoffen aufbereitetem und verwertetem Bauschutt}{Menge an insgesamt anfallendem Bauschutt}*100 [%]

Maximalwert bei vollständiger Verwertung = 100 %

Substitutionsquote = \frac{Menge an Recycling-Baustoffen f\tilde{u} die werk-oder rohstoffliche Verwertung}{Menge an insgesamt verbrauchten,nat\tilde{u}rlichen mineralischen Baurohstoffen}*100 [%]

Maximalwert bezogen auf Bauschutt aus dem Hochbau (51,6 Mio. t) bei vollst\tilde{a}ndiger Verwertung = 9, 7 % (Bezugsbasis 532 Mio.t Baurohstoffe)

Definition Recycling-Baustoff: Erf\tillt bau- und umwelttechische Standards bzw. rohstoffliche Anforderungen
```

Abbildung 45: Definitionen für Recycling- und Substitutionsquoten (Quelle: Eigene Darstellung)

Nach Szenario 1 können im Wesentlichen nur die Recycling-Baustoffe aus Betonbruch hochwertig verwertet werden. Die Recyclingquote als Verhältnis aus der Menge an Recycling-Baustoffen zu der insgesamt anfallenden Menge an (Hochbau)-Schutt beträgt 53 %. Die Substitutionsquote als Kennwert für die durch das Recycling mögliche Ressourceneinsparung beträgt 5 %, wenn von einem Rohstoffverbrauch von 532 Mio. t/a ausgegangen wird.

Szenario 2: Erweiterte Aufbereitung und Verwertung

Die Recycling-Baustoffe aus Betonbruch können wie oben beschrieben aufbereitet und verwertet werden. Welche der genannten Varianten der Vorzug zu geben ist, richtet sich nach der Nachfrage und den regionalen Gegebenheiten.

Bei den Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch erfolgt nach der Zerkleinerung die Trennung in eine Fraktion < 8 mm und eine Fraktion > 8 mm. Aus der Fraktion > 8 mm werden die Ziegelpartikel mittels sensorgestützter Sortierung "herausgelesen". Unter den Annahmen, dass der Fraktionsanteil > 8 mm 50 Masse-% beträgt (vgl. Abbildung 9) und die Zerkleinerung keine An- bzw. Abreicherungsvorgänge hervorruft, ergeben sich als Ergebnis dieser Aufbereitungstechnologie folgende Stoffströme:

- Sortenreine Ziegelkörnungen > 8 mm
- Körnungen < 8 mm mit einer gegenüber dem unaufbereiteten Mauerwerkbruch unveränderter Materialzusammensetzung
- Gemischte K\u00f6rnungen > 8 mm, bestehend aus Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton, M\u00f6rtel und Putz.

Für die sortenreinen Ziegelkörnungen besteht eine Reihe von Anwendungen. Als Hauptbestandteil können sie für das Anlegen von Schotterrasen, als Baumsubstrate oder für die Dachbegrünung eingesetzt werden. Als Nebenbestandteil sind sie in Tragschichtmaterial oder rezyklierten Gesteinskörnungen verwertbar. Ferner kann die Ziegelkörnung durch eine Mahlung auf Partikelgrößen < 150 µm aufbereitet und rohstofflich bei der Ziegelherstellung eingesetzt werden (Abbildung 46).

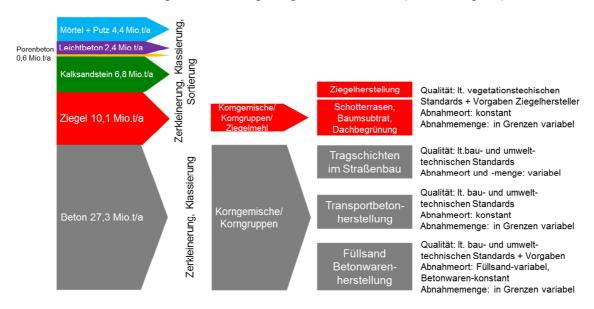


Abbildung 46: Verwertungspfade für Recycling-Baustoffe, aufbereitet nach erweiterter Technologie (Quelle: Eigene Darstellung)

Die Körnungen < 8 mm mit Mauerwerkzusammensetzung wären wiederum als Rohstoff für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen geeignet. Die Körnungen > 8 mm, die hauptsächlich aus mineralisch gebundenen Wandbaustoffen bestehen, sind von ihrer chemischen Zusammensetzung dafür nicht geeignet. Mit der erweiterten Aufbereitung wird eine Erhöhung der Recyclingquote auf 63 % und der Substitutionsquote auf 6 % erreicht, wobei eine ggf. mögliche Verwertungen der Körnungen < 8 mm nicht einbezogen wurde. Mit der Erzeugung einer sortenreinen Ziegelkör-

nung sind die Voraussetzungen für einen Einstieg in die rohstoffliche Verwertung im ursprünglichen Produkt geschaffen.

Szenario 3: Advanced Processing

Bei den Recycling-Baustoffen aus Betonbruch kann weiterhin wie oben beschrieben vorgegangen werden. Alternativ wäre die Aufbereitung nach den im Kapitel 3 dargestellten Technologien möglich. Energetisch und wirtschaftlich ist das aber nur dann sinnvoll, wenn für die Feinfraktion eine auf ihren besonderen Eigenschaften basierende Verwertung gefunden wird. Grundlagenuntersuchungen zeigen (Splittgerber 2011), dass selbst aus reinem Zementstein erst durch eine Temperaturbehandlung bei 1400 ℃ wieder ein hydraulisches Bindemittel er zeugt werden kann. Denkbar wäre die Herstellung eines Bindemittels, dessen Verfestigung wie bei Kalken auf einer Karbonatisierung beruht.

Beim Mauerwerkbruch wird folgender Ablauf der Aufbereitung angenommen:

- Es wird eine feinkornarme Zerkleinerung realisiert, bei welcher lediglich 25 Masse-% der Fraktion < 8 mm entsteht (vgl. Abbildung 9).
- Die Fraktion > 8 mm wird in einer mehrstufigen Sensorsortierung in die Materialfraktionen Ziegel, Kalksandstein, Porenbeton, Leichtbeton, Mörtel und Putzgetrennt.

Für alle Baustoffarten wird für die sortenreinen Grobfraktionen eine rohstoffliche Verwertung in dem ursprünglichen Produkt mit einem bestimmten Einsatzfaktor angenommen (vgl. Kapitel 6). Dieser Einsatzfaktor hat zum gegenwärtigen Zeitpunkt rein fiktiven Charakter. Eine Bestätigung durch systematische Versuche im Laborund im technischen Maßstab ist erforderlich.

Für die Baustoffe Ziegel und Kalksandstein wird der verbleibende Rest von 80 % für Verwertungen in anderen Sektoren, in welchen bestimmte Anteile von Ziegel und Kalksandstein zulässig sind, genutzt:

- In Tragschichtmaterial sind bis zu 30 Masse-% Klinker, dichte Ziegel, Steinzeug zulässig. In den Berechnungen wird von einer Zugabemenge von 22 Masse-% ausgegangen, weil bereits etwa 8 Masse-% vorhanden sind (vgl. Tabelle 11).
- Für Kalksandstein gilt in Tragschichtmaterial eine Grenze von 5 Masse-%, die durch die Zugabe von 3 Masse-% Kalksandsteinkörnungen ausgeschöpft wird (vgl. Tabelle 11).
- Es wird davon ausgegangen, dass die Menge an Recycling-Baustoffen, die in Tragschichten verwertet wird, 10 Mio. t beträgt.
- "Bauwerksplitt", der 35 Vol.-% der natürlichen Gesteinskörnungen für die Betonherstellung ersetzen kann, darf bis zu 30 Masse-% Mauerziegel aus gebranntem Ton, Kalksandstein und nicht schwimmender Porenbeton enthalten sein. Bei einer Aufteilung des zulässigen Anteils auf Ziegel und Kalksandstein entspricht das jeweils etwa 5 Masse-% bezogen auf die hergestellte Betonmenge, die zu 10 Mio. t angenommen wird.

Aufbauend auf diesen Annahmen ergibt sich die in Tabelle 18 dargestellte Bilanz. Die jeweilige Menge an sortenreinen Fraktionen > 8 mm übersteigt die Menge, die rohstofflich im ursprünglichen Produkt verwertet werden kann. Bei Ziegeln kann der Überschuss für die Herstellung von Recycling-Baustoffen für Tragschichten, für die Betonherstellung oder für die Vegetationstechnik verbraucht werden. Kalksandsteinkörnungen > 8 mm können in geringerem Umfang ebenfalls diesen Anwendungsge-

bieten eingesetzt werden. Bei Porenbeton, Leichtbeton sowie Mörtel und Putz bestehen diese Möglichkeiten nicht.

Als weiterer "Rückstand" entsteht die Fraktion < 8 mm in einer Menge von 6,1 Mio.t. Sie kann als Rohstoff für die Herstellung von leichten Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Alternativ wäre die rohstoffliche Verwertung zur Herstellung eines puzzolanischen Zusatzstoffs für die Betonherstellung denkbar, der zukünftig an die Stelle der Steinkohlenflugasche treten könnte. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt hat diese Alternative aber rein fiktiven Charakter, weil sie lediglich auf den Betrachtungen zur chemischen Zusammensetzung basiert. Mit dem Advanced Processing wird eine Erhöhung der Recyclingquote auf 80 % und der Substitutionsquote auf 7,6 % erreicht, ohne die rohstoffliche Verwertung der Fraktion < 8 mm zu berücksichtigen. Eine weitere Steigerung der Substitutionsquote bis hin zu dem Maximalwert 9,6 % ist nur bei Realisierung der rohstofflichen Verwertung möglich.

Tabelle 18: Verwertung der Bestandteile von Mauerwerkbruch

Fraktionen nach der Zer- kleinerung [Mio. t]		Verwertung Fraktion > 8 mm [Mio. t]						
< 8 mm: 25 Masse-%	> 8 mm: 75 Masse-%	im ursprünglichen Neu- produkt		in anderen Sektoren				
Ziegel- und D	achziegelbruc	h 10,1 Mio.t						
2,525	7,575	20 % von 12 Mio.t	2,4	Straßenbau: 22 % von 10 Mio. t	2,2			
				Betonherstellung: 5 % von 10 Mio.t	0,5			
				Vegetationstechnik + Rest	2,475			
Kalksandsteir	bruch 6,8 Mic	o.t						
1,7	5,1	20 % von 5,4 Mio.t 1,1		Straßenbau: 3 % von 10 Mio. t	0,3			
			Betonherstellung: 5 % von 10 Mio.t		0,5			
				Vegetationstechnik + Rest				
Porenbetonbr	ruch 0,6 Mio.t							
0,15	0,45	15 % von 0,7 Mio.	0,105	5 Hygienestreu, Ölbinder etc.				
Leichtbetonbr	ruch 2,4 Mio.t							
0,6	1,8	20 % von 1,5 Mio.t	0,3	N.N.	1,5			
Mörtel + Putz	4,4 Mio.t							
1,1	3,3	20 % von 4,2 Mio.t	0,84	N.N.	2,46			

Es ist fraglich, ob die im Szenario 3 angenommene starke Differenzierung nach Materialarten durchweg sinnvoll ist, da für die Verwertung ein ausreichend dichtes Netz von Abnehmern vorhanden sein muss. Insbesondere die Verwertung im ursprünglichen Produkt ist bei Mauerwerkbaustoffen an bestimmte Standorte gebunden. Aus einer stark vereinfachten Modellvorstellung (Anlage 3) ergibt sich die in Abbildung 47 dargestellte Abhängigkeit, wonach die Transportentfernung zwischen den Abnehmern von Recycling-Baustoffen und den Aufbereitern von Bauschutt mit abnehmender "Anlagendichte" zunimmt. Unter Anlagendichte wird die Anzahl der Abnehmer pro Quadratkilometer verstanden. Stehen den 2073 Recyclinganlagen (vgl. Abbildung 16) beispielsweise 2000 Abnehmer gegenüber, bleibt die berechnete Transportentfernung unter 20 km. Dieser Fall beschreibt in etwa die Situation bei der Betonherstellung. Sind dagegen nur etwa 100 Abnehmer vorhanden, wächst die Transportentfernung auf ca. 40 km. Bei 10 Abnehmern beträgt sie etwa 140 km.

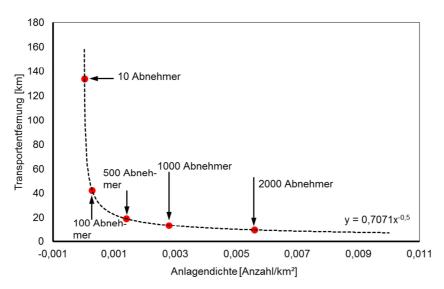


Abbildung 47: Vereinfachte Abhängigkeit zwischen Dichte der Anlagen, die Recyclingmaterial verarbeiten, und Transportentfernung für die Anlieferung (Quelle: Eigene Darstellung)

Um den Einfluss der Anlagendichte, der besonders für die Rückführung der Mauerwerkbaustoffe bestehen dürfte, zu mindern, muss die Logistik für die Verteilung eng mit einer Rücknahmelogistik verknüpft werden.

8 Schlussfolgerungen und Ausblick

Bauabfälle sind der größte Abfallmassenstrom in Deutschland. Sie setzen sich aus Boden und Steinen, Straßenaufbruch aus Asphalt und Beton, Bauschutt aus Beton- und Mauerwerkbruch, gemischten Bau- und Abbruchabfällen sowie Abfällen auf Gipsbasis zusammen. Die vergleichsweise sortenreinen Varietäten Ausbauasphalt sowie demontierte Gipskartonplatten und Gipsplattenverschnitt werden getrennt gewonnen, gesammelt und mit spezieller Anlagentechnik aufbereitet. Wenn die Aufbereitungsprodukte bestimmte, in Standards festgelegte Qualitäten erreichen, werden sie im ursprünglichen Produkt wieder eingesetzt.

Für Betonbruch besteht die Möglichkeit durch entsprechende Maßnahmen beim Rückbau und/oder durch die Steuerung der Stoffströme über die Annahmegebühren für einen Teil des Inputmaterials eine ausreichende Sortenreinheit zu erzielen. Aus diesem Stoffstrom können mit Hilfe der Zerkleinerung und Klassierung sowie der Sortierung mittels Überbandmagnet Korngemische und Korngruppen in solchen Qualitäten hergestellt werden, die eine Verwertung im Straßenoberbau oder für die Betonherstellung ermöglichen. Ist der Betonbruch mit leichten Fremdstoffen wie Folien, Pappe, Papier, Dämmstoffe, Kunststoffformteilen und Holzstücken verunreinigt, können diese durch eine Windsichtung entfernt werden. Allerdings können so nur grobe Körnungen gereinigt werden. Mit nassen Sortierverfahren lassen sich zusätzlich Leichtbaustoffe wie Porenbeton und Holz abtrennen.

Mauerwerkbruch ist ein Gemisch aus unterschiedlichen Wandbaustoffen sowie Mörtel und Putz. Weitere Bestandteile sind Wärmedämmverbundsysteme, Estriche, Fliesen etc. Als Wandbaustoffarten sind Ziegel, Kalksandsteine, Porenbeton sowie Leicht- und Normalbeton enthalten. Die Aufbereitung erfolgt mit den gleichen Aggregaten, die für Beton eingesetzt werden. Damit kann bestenfalls eine grobe Körnung, die aus Wandbaustoffen einschließlich Mörtel und Putz besteht aber keine Fremdstoffe enthält, herstellt werden. Die Sortierung von Mauerwerkbruch in die verschiedenen Wandbaustoffarten erfordert eine sensorgestützte Einzelkornsortierung, wie sie in anderen Sektoren der Abfallwirtschaft bereits angewandt wird. Für die Sortierung von Bauschutt wird sie bisher kaum eingesetzt. Ausnahmen sind eine Recyclinganlage in Spanien, wo die Aussortierung von Gips aus Bauschutt mittels Nahinfrarottechnik realisiert wird, und in der Schweiz, wo die Trennung von Beton- und Ziegelpartikeln mit Hilfe einer Farbsortierung vorgenommen wird.

Recycling-Baustoffe aus Betonbruch können in Funktionsschichten des Straßenoberbaus sowie für die Herstellung von Transportbeton oder von bestimmten Betonwaren eingesetzt werden. Dafür müssen sie einer regelmäßigen Güteüberwachung unterzogen werden und die Anforderungen, die in bau- und umwelttechnischen Vorschriften festgelegt sind, erfüllen. Die für diese Einsatzgebiete benötigten Mengen an mineralischen Baustoffen liegen deutlich über den verfügbaren Mengen an Recycling-Baustoffen aus Betonbruch. Der Neubau oder die Erweiterung von Gemeindestraßen hat verglichen mit den anderen Sektoren des Straßenbaus den höchsten Materialbedarf. Dieses Einsatzgebiet hat ebenso wie die Verwendung für die Transportbetonherstellung den Vorteil, dass zwischen Herstellern und Abnehmern von Recycling-Baustoffen kurze Transportwege bestehen.

Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch sind aufgrund ihrer Heterogenität auch im fremdstofffreien Zustand nur für Sektoren mit geringen bautechnischen Anforderungen wie Verfüllungen geeignet. Bei solchen Verwertungen bestehen einerseits in der Regel hohe umwelttechnische Anforderungen. Andererseits weist gerade Mauerwerkbruch bedingt durch den zunehmenden Einsatz von Gipsputzen hohe Sulfatge-

halte auf, so dass die umwelttechnischen Anforderungen z.T. nicht erfüllt werden können. Daraus können sich Entsorgungsengpässe ergeben, die sich schon heute abzeichnen.

Das bisher praktizierte Recycling stellt eine werkstoffliche Verwertung dar. Die mechanischen Eigenschaften der Recycling-Baustoffe werden genutzt, die chemische und mineralogische Zusammensetzung wird nicht verändert. Als Alternative bietet sich insbesondere für die heterogenen Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch die rohstoffliche Verwertung an. In einem stoffumwandelnden Prozess wird die chemische bzw. mineralogische Zusammensetzung gezielt verändert, um neue Produkteigenschaften zu generieren. Zwei Varianten stehen zur Auswahl:

- Sortenreine Wandbaustoffe werden durch eine mehrstufige Sortierung aus Mauerwerkbruch zurückgewonnen und als Rohstoff in der jeweiligen Wandbaustoffproduktion eingesetzt.
- Die Gemische werden ohne Trennung rohstofflich verwertet.

Im Falle der Variante 1 ist ein erheblicher Aufwand für die Aufbereitung erforderlich. Die substituierbare Rohstoffmenge kann zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht angegeben werden, dürfte aber unter 20 % bleiben. Weitere offene Punkte sind die Anforderungen, die an die Substitute gestellt werden müssen, und logistische Fragen, die mit der Rückführung des Substituts an einen bestimmten Produktionsstandort im Zusammenhang stehen. Im Falle der Variante 2 ist der Aufwand für die Aufbereitung geringer. Außerdem kann auch die Sandfraktion verwertet werden. Voraussetzung für die Realisierung der Variante 2 ist allerdings, dass ein Produkt gefunden oder entwickelt wird, für welches das Gemisch als Rohstoff bzw. Rohstoffkomponente eignet ist.

Forschungen auf dem Baustoffsektor beginnen mit der Entwicklung des jeweiligen Baustoffs und der erforderlichen Technologie. Sie haben eine sehr lange Tradition. Dagegen steckt die Forschung zur gezielten Produkt- und Verfahrensentwicklung auf dem Sektor des Baustoffrecyclings noch in den Kinderschuhen. Somit besteht ein erheblicher Forschungs- und Entwicklungsbedarf, wenn der Beitrag des Baustoffrecyclings zur Ressourceneffizienz quantitativ und qualitativ erhöht werden soll. Als Schlussfolgerungen aus dem hier Dargestellten ergeben sich folgende Fragestellungen, die bearbeitet werden sollten:

- Der Fundus der Güteüberwachungsprotokolle sollte besser genutzt werden. Einerseits wäre die Auswertung einer deutlich höheren Anzahl an Protokollen wünschenswert. Anderseits sollte die Auswertung um die Darstellung der jeweiligen Aufbereitungstechnologie durch Vor-Ort-Recherchen erweitert werden. Einflüsse der eingesetzten Aufbereitungsverfahren auf die Qualität der produzierten Recycling-Baustoffe wären zu ermitteln. Beispielsweise könnte so geklärt werden, ob nasse Sortierverfahren den Sulfatgehalt der erzeugten Recycling-Baustoffe merklich beeinflussen.
- Auf Grund der Heterogenität der Recycling-Baustoffe ist es fraglich, ob mit dem gegenwärtig vorgeschriebenen Rhythmus der Eigen- und Fremdüberwachung eine gleichbleibende Produktqualität gewährleistet werden kann. Fraglich ist auch, ob die untersuchten Probemengen ausreichen, um geringe Gehalte an Fremdstoffen mit ausreichender statistischer Sicherheit nachzuweisen. Beispielsweise darf der Fremdstoffgehalt bei Tragschichtmaterial 0,2 Masse-% nicht überschreiten (vgl. Tabelle 11). Neue Konzepte und Lösungen wie automatisierte Probenahmeverfahren, schnell und zuverlässig bestimmba-

- re Qualitätsparameter und entsprechende Messgeräte sollten Gegenstand von Forschungen sein.
- Bei einer Weiterentwicklung der Vorschriften zur Betonherstellung wäre eine Kopplung der erlaubten Zugabemengen an die Qualität und die Gleichmäßigkeit der Rezyklate analog zu der Verwertung von Asphalt zu prüfen.
- Um die Verwertung nach dem Konzept der Stoffsubkreisläufe voranzubringen, müssen Verfahren für die Sortierung von Mauerwerkbruch entwickelt werden. Weitere Einsatzgebiete für die werkstoffliche Verwertung der Bestandteile von Mauerwerkbruch, die den physikalischen Eigenschaften der Rezyklate entgegenkommen, müssen gefunden und entwickelt werden. Parallel dazu sind die Qualitätsparameter zu ermitteln, die einzuhalten sind, wenn die separierten Wandbaustoffe als Rohstoffsubstitute in das ursprüngliche Produkt zurückgeführt werden sollen.
- Zurzeit werden geschlossene Kreisläufe für demontierbare Gipsbaustoffe wie Gipskartonplatten aufgebaut. Für Gipsputze und Anhydritestriche, die am Untergrund haften, gibt es noch keine technischen Lösungen, mit denen sie aus dem Bauschutt abgetrennt werden können. Diese Aufgabenstellung bedarf dringend der Bearbeitung. Zum einen kann damit den steigenden Sulfatwerten in Recycling-Baustoffen entgegengewirkt werden. Zum anderen wäre die Rückführung der abgetrennten Gipse auch unter rohstoffwirtschaftlichen Gesichtspunkten vorteilhaft. Infolge der bevorstehenden energiepolitischen Veränderungen wird die Gipsindustrie zukünftig kaum noch auf Rauchgasentschwefelungsgips zurückgreifen können.
- Bei der rohstofflichen Verwertung der Gemische ist die im Labormaßstab erprobte Technologie der Herstellung von leichten Gesteinskörnungen in den Pilotmaßstab zu überführen. Das thermische Verfahren hat das Potenzial, Sulfate effektiv aus dem Rohstoff "Mauerwerkbruch" zu entfernen und als Rauchgasentschwefelungsgips zurückzugewinnen. Der Nachweis kann nur im Pilotmaßstab erbracht werden.
- Die energiepolitische Wende führt zum Wegfall weiterer Kraftwerksnebenprodukte. Es ist zu überprüfen, ob daraus Chancen erwachsen, Mauerwerkbruch als Rohstoff für Nachfolgeprodukte zu nutzen. Die erforderliche Entwicklung stoffumwandelnder thermischer Verfahrenen wäre anzustoßen und zu fördern.
- Es muss zur Regel werden, dass Neuentwicklungen von Baustoffen oder Baustoffverbunden experimentell im Hinblick auf ihre Rezyklierbarkeit geprüft werden. Ein "Standardzerkleinerungsversuch" vorzugsweise im Backenbrecher könnte die Basis sein, um Aussagen zum Aufschlussverhalten zu machen. Auf der Grundlage von Modellen zum Zerkleinerungsverhalten verschiedener Massiv- und Ausbaustoffe wäre eine geeignete Methodik zu entwickeln. Damit sollten bereits verwendete Massiv- und Ausbaustoffe und Neuentwicklungen untersucht werden, um ein praktikables Kriterium für die Rezyklierbarkeit abzuleiten.

Die Erfahrungen bei der Einführung der erneuerbaren Energien zeigen, dass der Ersatz alter Produkte durch neue auch bei gleicher Leistungsfähigkeit schwierig ist. Bei Recycling-Baustoffen kommt erschwerend hinzu, dass ihnen oftmals eine geringere Leistungsfähigkeit unterstellt wird. Recycling-Baustoffe werden sich gegenüber den traditionellen Baustoffen ohne gezielte Förderung kaum in dem avisierten Zeitraum durchsetzen. Die bei den erneuerbaren Energien gesammelten Erfahrungen sollten

deshalb auf die Recycling-Baustoffe übertragen werden. Durch gezielte Fördermaßnahmen beispielsweise steuerliche Entlastungen bei der Herstellung und beim Einsatz von Recycling-Baustoffen könnte eine verstärkte Anwendung erreicht werden. Welche Maßnahmen im Einzelnen geeignet sind, sollte Gegenstand einer ökonomischen Untersuchung sein. Bei den Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch muss darüber hinaus die Forschungen und Entwicklungen durch Fördermaßnahmen forciert werden, um in absehbaren Zeiten zu Baustoffen mit merklichen Rezyklatanteilen bzw. zu Produkten, die auf Bauabfällen als Rohstoffe basieren, zu kommen.

Anlage 1: Auszüge aus den Preislisten für die Annahme von Bauschutt verschiedener stationärer Recyclinganlagen

Bun- desland	Jahr	Beton klein- formatig	Beton Über- größe	Dachziegel, Ziegel ohne Mörtel	Bauschutt, Ziegel, Klinker etc ohne Sortierreste	Bauschutt, Ziegel, Klinker etc. mit gerin- gen Sortier- resten	Gemischte Bau- und Ab- bruchabfälle (mineralische Anteile mind. 90%)	Gasbeton, Porenbeton, Leichtbeton	Gasbeton, Porenbeton, Leichtbeton mit geringen Sortierresten	Baustoffe auf Gipsbasis
		AVV: 170101	170101	170102	170101, 17010	2 oder 170107		170101,17010	7,170802	170802
NRW 1	2012	3,70	21,00	-	6,50	12,00	107,50	25,00	40,00	-
	2014	6,00	28,50	-	12,50	22,50	107,50	35,00	50,00	-
						Bims, KS < 50 %				
NRW 2	2007	5,40	auf Anfrage	-	5,40	8,50	-	-	-	
	2012	5,40	auf Anfrage	-	5,40	8,50	35,00	-	1	60,00
					mit < 25 % FA	mit > 25 % FA		Fliesen, Kera- mik, Bims mit < 25% FA	Fliesen, Kera- mik, Bims mit > 25 % FA	einschl. Gas- beton
NRW 3	2012	6,00	auf Anfrage	9,50	14,90	16,90	-	12,50	14,50	72,50
	2014	7,00	auf Anfrage	10,75	16,00	18,40	-	15,00	16,50	72,50
ST	2012	4,00	20,00	9,00	10,00	25,00	-	10,00	-	-
	2015	4,00	20,00	14,20	25,00	25,00	-	14,00	-	-
BY 1	2012	6,80	24,00	8,20	9,50	18,50	42,00	59,00		78,00
	2015	7,50	28,00	9,50	12,50	24,90	58,00	80,00		120,00
BY 2	2012	5,90	8,90	4,90	8,90	14,00	23,00	-	1	73,00
	2014	-	-	4,90	8,90	-	-	-	-	-
					ohne Fremd-	Fremdstoffe <	Fremdstoffe <			
					stoffe	5 Vol%	15 Vol%			
TH	2012	4,80	24,50	-	12,50	25,00	42,00	-	-	-
	2014	6,72	29,41	-	21,01	-	-	-	-	-
						geringer Anteil nicht verwertbarer Bauschutt	mittlerer An- teil nicht ver- wertbarer Bauschutt			
BW 1	2011	5,90	32,00	6,00	18,00	30,00	40,00	80,00		80,00
	2014	6,50	35,00	6,00	25,00	35,00	45,00	80,00		80,00
		-			mit < 20 % FA					
BW 2	2012	5,60	25,00	5,00	6,70	-	-	45,00	-	55,00

	2015	6,30	28,00	6,00	9,50	-	-	60,00	-	60,00
BW 3	2013	3,00	20,00	5,80	7,50	15,00	-	-	-	-
	2015	3,00	20,00	5,80	10,00	18,00	-	-	-	-

AVV: Abfallverzeichnis-Verordnung

FA: Feinanteil

Anlage 2: Abschätzung zum jährlichen Materialbedarf für Tragschichten für Autobahnen und Gemeindestraßen (+ Kreisstraßen)

Jährlicher Materialbedarf für Neubau und Erweiterung der Straßeninfrastruktur (Quelle: Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S.: Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen, Ressourceneffizienz Paper 2.4, Wuppertal, 2011/Tabelle 9)

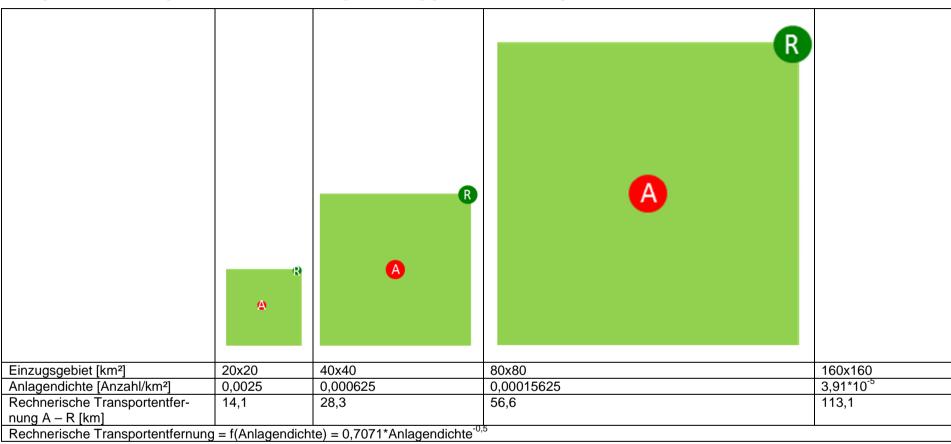
Gesteinskörnungen (GK) für Beton und hydraulisch gebundene Tragschicht ≈ 10 * Zementverbrauch

Gesteinskörnungen (GK) für Asphaltdeck- und Tragschichten ≈ 20 * Bitumenverbrauch

	Bundes- autobahn	Bundes- straße	Landes- straße	Kreis- straße	Gemeinde- straße	Erweite- rung BAB auf 6 Strei- fen	Insgesamt
km	126	0	0	84	1.500	70	
(Neubau)	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000t	in 1.000 t	in 1.000t
Gesteinsmehl (Füller)	197	0	0	21	192	28	438
Edelbrechsand	272	0	0	43	403	39	757
Edelsplitt	1.641	0	0	222	1.598	235	3.695
bit. Bindemittel	73	0	0	14	111	10	209
hydr. Bindemit- tel	167	0	0	0	19	24	210
Sand	1.904	0	0	255	4.375	272	6.806
Kies	2.387	0	0	314	4.219	341	7.261
Schotter	0	0	0	37	1.808	0	1.846
Summe	6.640	0	0	906	12.726	949	21.222

		Autobahnen [t]		Gemeinde- und Kreisstraßen [t]		
	Sand	1.904.000	Hyd. Bindemittel	4.375.000	Hyd. Bindemittel	
	Kies	2.387.000	191.000	4.219.000	19.000	
Gesteinskörnungen	Schotter		GK für Beton	1.808.000	GK für Beton	
Gestelliskorrungen	Sand	272.000	1.910.000	255.000	190.000	
	Kies	341.000		314.000		
	Schotter			37.000		
	Füller	197.000	Bitumen	192.000	Bitumen	
	Edelbrechsand	272.000	83.000	403.000	125.000	
"Edel-Gesteinskörnungen"	Edelsplitt	164.1000	GK für Asphalt	1.598.000	GK für Asphalt	
"Edel-Gestelliskorrarigeri	Füller	28.000	1.660.000	21.000	2.500.000	
	Edelbrechsand	39.000		43.000		
	Edelsplitt	235.000		222.000		
Summe Gesteinskörnungen	7.316.000		13.487.000			
Verbrauch für hydraulisch und bitum	3.570.000		2.690.000			
Ungebundene Gesteinskörnungen	3.746.000		10.797.000			

Anlage 3: Abschätzung der Transportentfernung in Abhängigkeit von der Anlagendichte



Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Wertschöpfungskette des Bausektors (Bildquellen: A. Müller) 14
Abbildung 2: Materialarten und deren Anteile in Wohngebäuden (Quelle: Eigene
Darstellung nach Doka 2000: Seite 114, Weber-Blaschke/Faulstich 2005: Seite 10)
bzw. in Wohn- und Nichtwohngebäuden (Deilmann 2014: Tabelle 5)
Abbildung 3: Definitionen zu den Verwertungsmöglichkeiten von mineralischen
Bauabfällen
Abbildung 4: Prinzipieller Aufbau der Verwertungsmatrix
Abbildung 5: Vorgehensweise bei der Gegenüberstellung von Abfallströmen zur
Verwertung und potenziellen Aufnahmekapazitäten
Abbildung 6: Abbruchbaustelle mit vorsortiertem Bauschutt (Bildquelle: A. Müller) 21
Abbildung 7: Vereinfachte Verfahrensfließbilder einer mobilen Aufbereitungsanlage
für mineralische Bauabfälle (links) und einer stationären Aufbereitungsanlage
(rechts) (Quellen: Müller/Lander 2000, Müller 2003)
Abbildung 8: Sieblinien von zu Frostschutz- oder Schottertragschichtmaterial
aufbereitetem Betonbruch (Quelle: Eigene Darstellung nach Prüfprotokollen) 24
Abbildung 9: Sieblinien von in Recyclinganlagen aufbereitetem Mauerwerkbruch im
Vergleich zu einer im Walzenbrecher aufbereiteten Probe aus Ziegelbruch (Quelle:
Eigene Darstellung nach Karnuth 2003: Anhang D 2, Müller 2010)
Abbildung 10: Gebäudeabbruch mit gezielter Trennung nach Materialarten
(Bildquellen: A. Müller)
Abbildung 11: Inputlager für Betonbruch (links) und Mauerwerkbruch (rechts)
(Bildquellen: A. Müller)
Windsichtung bzw. eine nasse Sortierung
Abbildung 13: Dichteverteilung einer Körnung aus Mauerwerkbruch unter Zuordnung
der Baustoffarten (Quelle: Müller/Schnell/Rübner 2013)
Abbildung 14: Recycling-Baustoffe aus Betonbruch
Abbildung 15: Recycling-Baustoffe aus Mauerwerkbruch
Abbildung 16: Anzahl von Anlagen und jährlich verarbeitete Bauschuttmengen
(Quelle: Eigene Darstellung nach Statistischem Bundesamt/Fachserie 19/1996-2014)
Abbildung 17: Vereinfachte Materialkreisläufe für Asphalt und Gipsprodukte (Quellen:
Eigene Darstellungen und Müller 2012)
Abbildung 18: Schema der Anlage zur thermischen Behandlung von pechhaltigem
Asphalt (Quelle: http://www.rekobv.eu/)
Abbildung 19: Ansicht einer Aufbereitungsanlage für Gipskartonplatten (Quelle:
http://www.neuenhauser-umwelttechnik.de/)
Abbildung 20: Aggregate zur Qualitätsverbesserung von Betonrezyklaten nach
Noguchi 2009 37
Abbildung 21: Vergleich von elektrodynamischen (a) und -hydraulischen (c)
Zerkleinerungsverfahren sowie Durchschlagspannungen für verschiedene
Materialien als Funktion der Impulsanstiegszeit (b), Linß 2008
Abbildung 22: Vereinfachte Bildungsschemata von Zement, Kalk und Gips (Quelle:
Eigene Darstellung)
Abbildung 23: Vereinfachte Bildungsschemata unterschiedlicher Wandbausteine
(Quelle: Eigene Darstellung)
Abbildung 24: Bereiche für die Steinrohdichte- und Festigkeitsklassen von
Wandbaustoffen sowie Mörteln und Putzen (Quelle: Eigene Darstellung)41
Transparation of the mortem and rate of (Quelle, Ligene Daistellang)

Abbildung 25: Reine Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO ₂ -CaO-(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃) zur Bewertung von Rohstoffen für die Herstellung von Zement (Quelle: Eigene
Darstellung)
(Fe ₂ O ₃ +CaO+MgO+K ₂ O+Na ₂ O)-Al ₂ O ₃ zur Bewertung von Rohstoffen für die
Herstellung keramischer Produkte (Quelle: Eigene Darstellung)
Abbildung 27: Zeitreihe zur Betonproduktion (Quelle: Eigene Darstellung) 46
Abbildung 28: Zeitreihe zur Produktion an Wandbaustoffen (Quelle: Eigene
Darstellung)
Abbildung 29: Zeitreihe zu den Mengen an Bauabfällen (Quelle: Eigene Darstellung)
48
Abbildung 30: Prognose zu Betonbruchmengen nach Rahlwes 1993
Abbildung 31: Gegenüberstellung der entstehenden Mengen an Bauabfällen und der
produzierten Baustoffmengen 2012 (Quelle: Eigene Darstellung)
Abbildung 32: Gehalte an Beton und natürlichen Gesteinskörnungen von Recycling-
Baustoffen für Anwendungen im Straßenbau (Quelle: Eigene Darstellung, Daten
entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen)
Abbildung 33: Gehalte an Beton und Ziegel von Recycling-Baustoffen aus
Mauerwerkbruch für Verfüllungen (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten Prüfprotokollen)
·
Abbildung 34: Gegenüberstellung der Sulfatgehalte in Betonelementen (Quelle:
Eigene Darstellung) 56 Abbildung 35: Sulfatgehalte im Eluat von Recycling-Baustoffen für Anwendungen im
Straßenbau (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten
Prüfprotokollen)
Abbildung 36: Sulfatgehalte im Eluat von Recycling-Baustoffen aus Mauerwerkbruch
für Verfüllungen (Quelle: Eigene Darstellung, Daten entnommen aus veröffentlichten
Prüfprotokollen)
Abbildung 37: Los Angeles-Koeffizienten in Abhängigkeit von der Rohdichte im
ofentrockenen Zustand (Quelle: Eigene Darstellung, Daten von Marta Sánchez de
Juan/Pilar Alaejos Gutiérrez 2009, Springenschmid/Schmiedmayer/Friedl 1997,
Schießl/Schmiedmayer/Friedl 1998, Barbudo/Agrela/Jiménez/Poon 2012) 58
Abbildung 38: Widerstand gegen Frost-Tau-Wechsel in Abhängigkeit von der
Rohdichte im ofentrockenen Zustand (Quelle: Eigene Darstellung, Daten von
Dombrowski 2003, Manns/Wies 1998, Mueller 2001, Eden et al. 2010)
Abbildung 39: Recycling-Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO ₂ -CaO-(Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃)
zur Bewertung von Rohstoffen für die Herstellung von Zement (Quelle: Eigene
Darstellung) 60
Abbildung 40: Recycling-Baustoffe im Dreistoffdiagramm SiO ₂ -
Fe ₂ O ₃ +CaO+MgO+K ₂ O+Na ₂ O)-Al ₂ O ₃ zur Bewertung von Rohstoffen für die
Herstellung keramischer Produkte (Quelle: Eigene Darstellung) 61
Abbildung 41: Konzepte für die Verwertung von Mauerwerkbruch nach einer
Stofftrennung (Kohler 1998) bzw. als Gemisch (Eigene Darstellung) 63
Abbildung 42: Gegenüberstellung der Sieblinien von aufbereitetem Betonbruch mit
den Sollsieblinien für Gesteinskörnungen für Frostschutz- und Schottertragschichten
(Quelle: Eigene Darstellung) 65
Abbildung 43: Bestand und jährlich zu geführte mineralische Baustoffe nach dem
Botton-Up-Ansatz (Quelle: Eigene Darstellung, links Daten von Schiller et al. 2015:
Tabellen 13,14,15,48,49,50,51; rechts Steger et al. 2011: Abbildungen 12, 13,
14,15,16,17,19,22,25,28)

Abbildung 44: Verwertungspfade für Recycling-Baustoffe nach dem Stand der Technik (Quelle: Eigene Darstellung)
Tabellenverzeichnis
Tabelle 1: Energiebedarf für die Aufbereitung nach Literaturangaben
Kalksandsteinherstellung (Hendriks 2000: Seite 132)

Literatur

- 1. Die Bundesregierung: Deutsches Ressourceneffizienzprogram (ProgRess). Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen. Beschluss des Bundeskabinetts vom 29.02.2012.
- 2. Ivanyi, G.; Lardi, R.; Esser, A.: Recycling Beton Zuschlag aus aufbereitetem Bauschutt. Fraunhofer IRB Verlag, Bauforschung T 1994. Essen 1985.
- 3. Schulz, R.-R.; Wesche, K.: Recycling von Baurestmassen ein Beitrag zur Kostendämpfung im Bauwesen. Fraunhofer IRB Verlag, Bauforschung T 2051. Aachen 1986.
- 4. Willkomm, W.: Querschnittsbericht Recycling -Verfahren für Ausbaumaterialien. Fraunhofer IRB Verlag, Bauforschung T 2101. Hannover 1988.
- 5. Michels, N.; Meyer, G.: Baukostendämpfung durch Recycling von Baurestmassen aus dem Hochbau. Fraunhofer IRB Verlag, Bauforschung T 2120. Aachen 1988.
- 6. Rohr, W.: Entwicklung und Betriebsergebnisse auf dem Gebiet der Sortierung und Klassierung mit dem Aquamator. Aufbereitungs-Technik (1987), Nr. 1, S. 32-40.
- 7. Schütze, H.-J.: Naßaufbereitung von Bauschutt im Aquamator. Aufbereitungs-Technik (1987), Nr. 8, S. 463-469.
- 8. Jungmann, A.; Neumann, Th.: alljig-Setzmaschinen zur Abtrennung schädlicher Bestandteile aus Kies, Sand und Recycling-Material. Aufbereitungs-Technik 32 (1991), Heft 1, S. 18-25.
- 9. Kellerwessel, H.: Setzmaschinen, besonders für Recyclingaufgaben Möglichkeiten, Grenzen, Bauarten. Aufbereitungs-Technik 34(1993), Nr. 10, S. 521-530.
- 10. Derks, J.W.; Moskala, R.; Schneider-Kühn, U.: Naßaufbereitung von Bauschutt mit Schwingsetzmaschinen. Aufbereitungs-Technik 38 (1997), Nr.3, S. 139-143.
- 11. Doka, G.: Ökoinventar der Entsorgungsprozesse von Baumaterialien. Grundlagen zur Integration der Entsorgung in Ökobilanzen von Gebäuden. Zürich 2000.
- 12. Weber-Blaschke, G.; Faulstich, M.: Analyse, Bewertung und Management von Roh- und Baustoffstömen in Bayern. Schlussbericht Verbundprojekt Stofffflussmanagement Bauwerke, TU München Freising 2005.
- 13. Deilmann, C.; Krauß, N.; Gruhler, K.; Reichenbach, J.: Sensitivitätsstudie zum Kreislaufwirtschaftspotenzial im Hochbau. Projekt im Forschungsprogramm Zukunft Bau, Leibniz-Institut für ökologische Raumentwicklung (IÖR), Dresden 2014.
- 14. Krass, K; Radenberg, M.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen. Straße + Autobahn 12/1993, S. 720-714.
- 15. Krass, K.; Koch, C.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von industriellen Neben-produkten und Recycling-Baustoffen im Jahr 1993. Straße + Autobahn 12/1995, S. 714-724.
- 16. Krass, K.; Kellermann, C.; Koch, C.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1995. Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße + Autobahn 2/1997, S. 82-89.
- 17. Krass, K.; Kellermann, C.; Rohleder, M.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1997. Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße + Autobahn 8/1999, S. 414-422.

- 18. Krass, K.; Jungfeld, I.; Trogisch, H.: Anfall, Aufbereitung und Verwertung von Recycling-Baustoffen und industriellen Nebenprodukten im Wirtschaftsjahr 1999. Teil 1: Recycling-Baustoffe. Straße + Autobahn 1/2002, S. 22-30.
- 19. Spyra, W.; Mettke, A.: Ökologische Prozessbetrachtungen RC-Beton zum DBU-Forschungsprojekt: Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen. Zuschlag in der Betonherstellung. Cottbus 2010.
- 20. Rübner. K.; Herbst, T.; Schneider, S.; Beck, T.: Stoffkreislauf im Mauerwerksbau Nachhaltigkeitsanalyse für das Mauerwerksrecycling. Aif-Schlussbericht der Forschungsstellen Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Berlin (BAM) und Universität Stuttgart, Lehrstuhl für Bauphysik 2013
- 21. Quattrone, M.; Angulo, S.C.; John, V.M.: Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production. Resources, Conservation and Recycling 90 (2014), pp 21-33.
- 22. Müller, A.; Lander, S.: Aufbereitung und Verwertung von Bauabfällen, Entsorgungspraxis 2000, Nr. 10, S. 13-17.
- 23. Müller, A.: Baustoffkreisläufe Stand und Entwicklungen. Ibausil-Tagungsbericht, September 2003, S. 1-1289-1-1308.
- 24. Karnuth, M.: Verhalten von Recycling-Materialien in der Umwelt: Labor- und Feldversuche. Dissertation am Fachbereich Geowissenschaften der Johannes Gutenberg-Universität in Mainz, 2003.
- 25. Müller, A.: Qualitätsverbesserungen von Rezyklaten durch neue Technologien. Fachtagung Recycling R´10, Weimar, 22./23.09.2010.
- 26. Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Die Herstellung von Leichtgranulaten aus Mauerwerkbruch. Mauerwerk 17 (2013), Heft 6, S. 365-371.
- 27. Statistisches Bundesamt/Fachserie 19/1996-2014.
- 28. Müller, A.: Bauschutt ohne Gips. Steinbruch und Sandgrube 11/2012, S. 40-45.
- 29. http://www.rekobv.eu/ vom 22.03.2015
- 30. https://www.remex-solutions.de/de/jdownload-j3/send/6-ts-verwertung/123-ts-verwertung-gesamtbroschuere-de.html vom 23.11.2015
- 31. Regelung zur Verwertung von Straßenbaustoffen mit teer-/pechtypischen Bestandteilen in Bundesfernstraßen ARS Nr. 16/2015.
- 32. http://www.neuenhauser-umwelttechnik.de/ vom 22.03.2015
- 33. Pretz, T.; Julius, J.: Stand der Technik und Entwicklung bei der berührungslosen Sortierung von Abfällen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, (2008), Heft 07/08, S. 105-112.
- 34. De Groot, P.J.; Postma, G.J.: Melssen, W.J.; Buydens, L.C.M: Validation of remote, on-line, near-infrared measurements for the classification of demolition waste. Analytica Chimica Acta 453 (2002), S. 117-124.
- 35. Vegas, I.; Broos, K.; Nielsen, P.; Lambertz, O.; Lisbona, A.: Upgrading the quality of mixed recycled aggregates from construction and demolition waste by using near-infrared sorting technology. Construction and Building Materials 75 (2015), pp. 121-128.
- 36. http://www.iab-weimar.de/de/forschung/projekte/171-sensorgestuetzte-sortierung-mineralischer-bau-und-abbruchabfaelle-im-nahinfrarot-bereich vom 25.11.2015
- 37. Angulo, S.C.; John, V. M.; Ulsen, C.; Kahn, H.; Mueller, A.: Optical sorting of ceramic material from mixed construction and demolition waste aggregates (in Portugisisch) Ambiente Construído 06/2013; 13(2), pp. 61-73.

- 38. Noguchi, T.: Lifecycle Perspective of Technologies and Properties of Recycled Aggregate Concrete in Japan. International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment, São Paulo, December 2009.
- 39. Linß, E.; Müller, A.: High performance sonic impulses an alternative method for processing of concrete. Int. J. Miner. Process. 74 S (2004), S. 199-208.
- 40. Menard, Y. u.a.: Innovative process routes for a high-quality concrete recycling. Waste Management 03/2013; 33.
- 41. Thome, V.: Recycling waste concrete with lightning bolts. AWE International | June 2013, pp 18-25.
- 42. Linß, E.: Untersuchungen zur Leistungsschallimpulszerkleinerung für die selektive Aufbereitung von Beton. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2008.
- 43. Linß, E.; Ludwig, H.-M.; Anding, K.: Study of the identification of aggregates of construction and demolition waste by using object recognition methods. 3rd International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering, IALCCE 2012; Vienna; Austria; 3 October 2012 through 6 October 2012.
- 44. Landmann, M.; Müller, A.; Ulsen, K.; Karrasch, A.; Linß, E.: Chemical-mineralogical sorting of mineral construction and demolition wastes for a better recovery. Vortrag, 1st Int. Conf. on Minerals in the Circular Economy, Espoo, Finland, 28.11.2014.
- 45. https://www.vdz-online.de/ vom 22.03.2015
- 46. Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V.: Konjunkturperspektiven/2006-2014.
- 47. Bundesverband der Kalksandsteinindustrie: Festschrift des Bundeverbandes der Kalksandsteinindustrie. Hannover, 1994.
- 48. Bundesverband Baustoffe-Steine und Erden e.V.: Monitoring Bauabfälle /1996-2012
- 49. Rahlwes, K.: Wiederverwendung von Baustoffen im Hochbau. 32. Darmstädter Seminar Abfalltechnik. WAR Schriftenreihe Band 67, S.120-141, Darmstadt 1993.
- 50. Müller, A.: Die Herstellung von Aufbaukörnungen aus Mauerwerkbruch. Müll und Abfall. 2014, H. 11, S. 625-633.
- 51. Arendt, M.: Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel Gips. Dissertation, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 2000.
- 52. Weimann, K.; Matyschik, J.; Adam, C.; Schulz, T.; Linß, E.; Müller, A.: Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2013.
- 53. Marta Sánchez de Juan; Pilar Alaejos Gutiérrez: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials 23 (2009), pp. 872-877.
- 54. Springenschmid, R.; Schmiedmayer, R.; Friedl, L.: Zwischenbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau" Teilprojekt D/01. München März 1997.
- 55. Schießl, P.; Schmiedmayer, R.; Friedl, L.: Zwischenbericht 1/1998 zum BMBF-Forschungsvorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau" Teilprojekt D/01. Muenchen Juli 1998.

- 56. Barbudo, A.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Jiménez, J.R.; Poon C.S.: Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. Construction and Building Materials 28 (2012) pp. 129-138.
- 57. Donner, M.: Untersuchungen an Gesteinskörnungen aus dem Thüringer Raum zum Widerstand gegen Schlag-Abrieb-Beanspruchungen nach dem Los Angeles-Verfahren. Diplomarbeit. Bauhaus-Universität Weimar 2001.
- 58. Dombrowski, K.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar 2003.
- 59. Manns, W.; Wies, S.: Frostwiderstand von Sekundärzuschlag aus Bauschutt. Zwischenbericht zum BMBF-Forschungsvorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau" Teilprojekt D/04. Stuttgart September1998.
- 60. Mueller, C.: Beton als kreislaufgerechter Baustoff. Dissertation. Beuth Verlag Berlin Wien Zürich 2001.
- 61. Eden, W. et al.: Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV Forschungsbericht Nr.111, Hannover März 2010.
- 62. Lampl, C.: Sekundärrohstoffe Anforderungen und Einsatzgebiete für die Baustoffe der Zukunft. Nachhaltige Nutzung von Baurestmassen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband. Wien, 2009.
- 63. Kohler, G.: Kreisläufe schließen. Beratende Ingenieure. Mai, S. 41-48, 1998.
- 64. Müller, A.: Bedeutung von Kornform und Korngröße für die Herstellung von Betonen und das Reycling von Baustoffen. Ibausil-Tagungsbericht, 2-1311-2-1324, September 2006.
- 65. Landmann, M.; Müller, A.; Palzer, U.; Leydolf, B.: Sortenrein•Unmixed. Leistungsfähigkeit von Aufbereitungsverfahren zur Rückgewinnung sortenreiner Materialfraktionen aus Mauerwerk. Teil 1. AT Mineral Processing. Vol. 55, (2014), H.3, S.62-72. Teil 2. AT Mineral Processing. Vol. 55, (2014), H.4, S.66-74.
- 66. Feierabend, A.: Einsatz von optischen Messsystemen auf Basis der LIBS-Spektroskopie zur Analyse und Klassifizierung von mineralischen Materialien. Recycling 13, Weimar 2013.
- 67. Wörner, T.: Reststoffverwertung im Straßenbau. Teilvorhaben 4: Untersuchungen über das Verhalten von Recycling-Baustoffen (RC-Baustoffe) in Tragschichten ohne Bindemittel unter längerer Verkehrsbeanspruchung. Technische Universität, München 2004.
- 68. Boehme, L.; Novakova, I.; Hubacek, A.: Assessment of fine recycled concrete aggregates in cement based flowscreed. Central Europe towards to sustainable building. Praha 2013.
- 69. Diedrich, R.; Brauch, A.; Kropp, J.: Rückenstützenbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben AiF 11414 N. Bremen 2001.
- 70. Schmidt, M.; Weber, M.; Kurkowski, H.: Rückenstützbeton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. TIS, H.4, S.18-23, 2004.
- 71.Boehme, L.: RecyMblock application of recycled mixed aggregates in the manufacture of concrete construction blocks. SB11 HELSINKI World Sustainable Building Conference: Vol. Full Proceedings (Theme 4). World Sustainable Building Conference. Helsinki, Finland, 18 21 October (pp. 2038-2047). Helsinki, Finland: Finnish Association of Civil Engineers RIL and VTT Technical Research Centre of Finland, 2011.

- 72. Mishulovich, A.: Used Concrete/Construction Debris in Portland Cement Manufacturing, R&D Serial No. 2635, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 15 pages, 2003.
- 73. Rosen, D.: Bewertung der Recyclingfähigkeit von Ziegeln. 47. Würzburger Ziegel-Lehrgang 2008.
- 74. Van Dijk, K.; Van der Zwan, J.; Fraaij, A.L.A.; Mulder, E, Hendriks, C.F.: CLOSING THE CLAY-BRICK CYCLE', OPTIONS FOR THE RECYCLING OR REUSE OF MASONRY DEBRIS. CIB World Building Congress, Paper: NOV 53, Page 1 of 12, Wellington, New Zealand, April 2001.
- 75. Van Dijk, K.; Hendriks, C.F.: Hot masonry and magnetic separation close the brick recycling process. Refiring bricks at 540°C. delft outlook 04.2, 2004.
- 76. Koch, G.: Rohstoffreduktion in der Baustoffproduktion Einsatz von Recyclingmaterial in der Ziegelindustrie. Vortrag IFF-Baustoff-FORUM, Weimar 2012.
- 77. Bischoff, G.; Eden, W.; Gräfenstein, R.; Heidger, C.; Kurkowski, H.; Middendorf, B.: Vegetationssubstrate aus rezyklierten Gesteinskörnungen aus Mauerwerk. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 116. Hannover 2014.
- 78. Eden, W., Friedl, L.; Krass, K.; Kurkowski, H.; Mesters, K.; Schießl, P.: Eignung von Kalksandstein-Bruchmaterial zum Recycling in der Baustoffindustrie. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 97. Hannover 2003.
- 79. Eden, W.; Flottmann, N.; Kohler, G.; Kollar, J.; Kurkowski, H. Radenberg, M.; Schütter, F.: Eignung von rezykliertem Kalksandstein-Mauerwerk für Tragschichten ohne Bindemittel. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 111. Hannover 2010.
- 80. Recycling von Kalksandsteinen, Veröffentlichung in "Steinbruch und Sandgrube, Juli 1997
- 81. Eden, W.: Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozess. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 80. Hannover 1994.
- 82. Eden, W.: Herstellung von Kalksandsteinen aus Bruchmaterial von Kalksandsteinen mit anhaftenden Dämmstoffen sowie weiterer Baureststoffe. Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 86. Hannover 1997.
- 83. Schuur, H.M.L.: Calcium silicate products with crushed building and demolition waste. Waste Materials in Construction. G.R. Woolley, J.J.J.M. Goumans and P.J. Wainwright (Editors). Elsevier Science Ltd. 2000.
- 84. Hendriks, Ch., F.: The Building Cycle. Æneas technical publishers. The Netherlands. 2000.
- 85. Eden, W.; Kurkowski, H.; Lau, J.J.; Middendorf, B.: Forschungsvereinigung Kalk-Sand eV, Forschungsbericht Nr. 117. Hannover 2014.
- 86. Hlawatsch, F.; Kropp, J.: Leichtmörtelsteine aus feinen Porenbetongranulaten. Baustoffrecycling BR, Heft 4, S. 28-35. 2008.
- 87. Aycil, H.; Kropp, J.: Scale up des Porenbetonrecyclings. http://www.mpa-bre-men.de/www/fileadmin/user_upload/MPA/Bauwesen/FV212_Veroeffentl.HP_2 014-05.pdf 20.09.2015.
- 88. http://nachhaltigkeitsbericht2014.xella.com/handlungsfelder/prozesse/dengeschlossenen-kreislauf-im-visier.html 20.09.2015
- 89. Lang-Beddoe, I.; Schober, G.: Wiederverwertung von Porenbeton. Baustoffrecycling BR, Heft 12, S. 4-8. 1999.

- 90. Steger, S.; Fekkak, M.; Bringezu, S.: Materialbestand und Materialflüsse in Infrastrukturen. Ressourceneffizienz Paper 2.4, Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. Wuppertal 2011.
- 91. Schiller, G.; Ortlepp, R.; Krauß, N.; Steger, S.; Schütz, H.; Acosta Fernández, J.; Reichenbach, J.; Wagner, J.; Baumann, J.: Kartierung des anthropogenen Lagers in Deutschland zur Optimierung der Sekundärrohstoffwirtschaft. Herausgeber: Umweltbundesamt. TEXTE 83/2015, Dessau-Roßlau 2015.
- 92. Splittgerber, F: Identifizierung der Zementart in Zementsteinen und die Übertragbarkeit auf Mörtel und Betone. Dissertation. Bauhaus-Universität Weimar 2011.

Einige der verwendeten Messwerte stammen aus studentischen Arbeiten und nicht veröffentlichen Forschungsberichten der Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung der Bauhaus-Universität Weimar 1995-2011.

Ausgewählte Vorschriften

Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. TL Gestein StB 2004 (Ausgabe 2007)

DIN 18 035 Teil 5, Sportplätze. DIN-Deutsches Institut für Normung e. V., Beuth-Verlag, Berlin 1987.

Richtlinie für die Planung, Ausführung und Pflege von Dachbegrünungen. Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. FLL. 2008.

Empfehlungen für Bau und Pflege von Flächen aus Schotterrasen. Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. FLL. 2008.

Empfehlungen für Baumplanzungen. Forschungsgesellschaft für Landschaftsentwicklung und Landschaftsbau e.V. FLL. 2010.

DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton.2013.

DIN 4226-100: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen.2002.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100 - Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1045-1.2010.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen im Beton (Alkali-Richtlinie). 2007.