



*Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland
www.uni-weimar.de/Bauing/aufber/*

Anette Müller studierte an der Fakultät Bauingenieurwesen der HAB Weimar (1964–1968). Nach der Promotion 1974 folgte 1988 die Habilitation. Seit 1995 leitet Prof. Müller den Lehrstuhl „Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung“ mit den Forschungsschwerpunkten Aufbereitung von Primärstoffen, Abfällen zur Verwertung und Produkten, die Entwicklung und Eigenschaften von Recyclingbaustoffen sowie die Verwertung industrieller Nebenprodukte.

*Dipl.-Ing. Thomas Schnellert
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland*

*Dipl.-Ing. Kati Kehr
Bauhaus-Universität Weimar
Weimar/Deutschland*

Gips im Griff • Gypsum under control

Gipsbestandteile in Betonrezyklaten – Herkunft, Auswirkungen und Abtrennung mittels Setztechnik, Teil 1

Zusammenfassung: Gips ist ein wegen seiner günstigen Eigenschaften zunehmend eingesetzter Baustoff. Wenn dieser Baustoff beim Rückbau nicht selektiert bzw. bei der Aufbereitung nicht abgetrennt wird, sind die erzeugten Recyclingbaustoffe nicht einsetzbar, weil sie zum einen die umwelttechnischen Anforderungen nicht erfüllen. Zum anderen bestehen bautechnische Unverträglichkeiten, die zur Bildung von sekundärem Ettringit führen, was sowohl in Betonen als auch in ungebundenen Tragschichten Treiberscheinungen auslöst. Mögliche Gegenmaßnahmen durch zusätzliche Aufbereitungsschritte werden im Folgenden dargestellt.

Gypsum constituents in recycled concrete – origin, effects and removal by jigging, part 1

Summary: Gypsum is being used increasingly as a building material because of its favourable properties. If this building materials is not selected during demolition or not removed during processing then the recycled building materials produced cannot be used because, for one thing, they do not fulfil environmental requirements. Apart for this there are also construction engineering problems that lead to the formation of secondary ettringite, which initiates expansion phenomena both in concretes and in unbound base courses. Possible countermeasures by using additional processing steps are described below.



Bauschuttrecycling • Recycling of construction waste

1 Einleitung

Gips ist ein Baustoff, der im Innenausbau als Putz, als Estrich oder in Form von Platten eingesetzt wird. Die Merkmale von Gipsbaustoffen sind die einfache Verarbeitbarkeit und günstige bautechnische Eigenschaften. Gleichzeitig ist für die Herstellung ein vergleichsweise niedriger Energieaufwand erforderlich, was zu ökologischen und ökonomischen Vorteilen führt. All das trägt dazu bei, dass sich die Gipsindustrie, abgesehen von konjunkturellen Einflüssen, weltweit in einer Wachstumsphase befindet [1]. Als Folge wächst das Lager an Gipsbaustoffen in Gebäuden überproportional an.

In einer Stoffstrombetrachtung [2] wird nachgewiesen, dass der Gipseinsatz im Hochbau im Jahr 2000 3 % beträgt gegenüber 1 % 1985. Bestätigt wird diese Aussage durch eine Gegenüberstellung der Produktionszahlen für Beton, der im Hochbau verwendet wird einerseits, mit den produzierten Mengen an Gipsbaustoffen andererseits (Bild 1). Auch danach nimmt die auf die produzierte Betonmenge bezogene Gipsmenge seit Jahrzehnten zu. In Zukunft ist also mit einer Zunahme des Gipsanteils im Bauschutt zu rechnen. Dadurch kann dessen Wiederverwertung deutlich erschwert oder gänzlich in Frage gestellt werden.

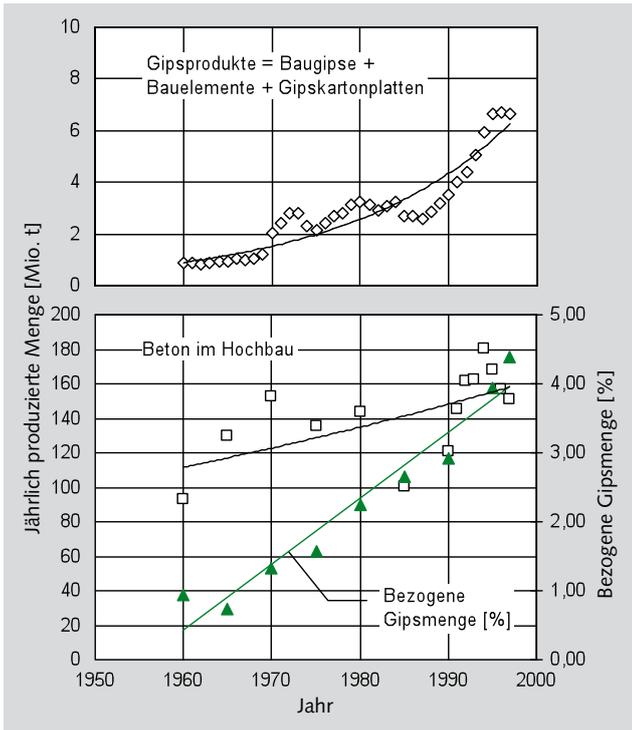
Bei der Betrachtung der Auswirkungen, die sich aus der Anwesenheit von Gipsbestandteilen in Rezyklaten ergeben, stehen gegenwärtig in erster Linie die wasserwirtschaftlichen Gesichtspunkte im Mittelpunkt. Die bautechnischen Auswirkungen von Gipsbestandteilen in Betonrezyklaten können aber mindestens genauso existenziell für die

1 Introduction

Gypsum is a building material that is used in interior finishing work as plaster, floor screed and in the form of panels. Gypsum building materials are characterized by their simple workability and favourable structural engineering properties. At the same time comparatively little energy is required for their production, which has ecological and economic advantages. All this means that, apart from cyclical economic effects, the gypsum industry is in a growth phase worldwide [1]. As a consequence there is a disproportionately large increase in the amount of gypsum materials in buildings.

In a material flow analysis [2] it has been shown that the use of gypsum in building construction amounted to 3 % in 2000 as compared to 1 % in 1985. This information is confirmed by comparison of the production figures for concrete used in building construction on the one hand with the quantities of gypsum building materials produced on the other (Fig. 1). This also shows that for decades there has been an increase in quantity of gypsum relative to the quantity of concrete produced. This means that the percentage of gypsum in building rubble can be expected to increase in the future. This can make the re-use of building rubble significantly more difficult or call it into question altogether.

When considering the effects that occur in the presence of gypsum constituents in recycled material the main emphasis is currently on the water resources aspects. However, the structural engineering effects of gypsum constituents in recycled concrete can be just as crucial for the utilization of recycled building materials. Reactions caused by sulfate have



1 Gegenüberstellung der jährlichen Produktionsmengen von Gipsbaustoffen und Hochbaubeton [3]

Comparison of the annual production figures for gypsum building materials and concrete used in building construction [3]

Verwertung von Recycling-Baustoffen sein. Bereits gegenwärtig können an Betonbruch aus Plattenbauten in einigen Regionen Mitteldeutschlands sulfatbedingte Reaktionen festgestellt werden, wenn dieses Material in ungebundenen Schichten eingesetzt wird. Der Wirkungsmechanismus und mögliche Gegenmaßnahmen durch zusätzliche Aufbereitungsschritte werden im Folgenden dargestellt.

2 Herkunft von Gipsbestandteilen im Betonbruch am Beispiel von Plattenbauten

In Recyclinganlagen müssen zunehmend Betone aus dem Rückbau von Bauten, die zwischen 1970 und 1990 entstanden sind, aufbereitet werden. In Ostdeutschland stammt dieser Betonbruch zu einem beträchtlichen Anteil aus Plattenbauten (Bild 2), die im Rahmen des Programms „Stadtumbau Ost“ abgerissen werden. Eine Zwischenbilanz zeigt, dass bis Ende 2005 der Rückbau von ca. 105 000 Wohnungen realisiert wurde. Gemessen an dem im Jahr 2002 formulierten Programmziel – Reduzierung des Leerstandes um ca. 350 000 Wohnungen – muss der Rückbau in den nächsten Jahren fortgesetzt oder sogar intensiviert werden [4].

Bei der Errichtung von Wohngebäuden in der DDR, welcher nach 1960 fast ausschließlich in Plattenbauweise erfolgte, wurden im Innenausbau in erheblichem Umfang Gipsbaustoffe eingesetzt. Der Schwerpunkt lag dabei besonders in den Bezirken, in welchen sich die Gipslagerstätten befanden. Die DDR gehörte mit einer Fördermenge zwischen 2,5 bis 2,8 Mio. t/a zu den führenden Förderländern

already been detected in crushed concrete from prefabricate buildings in some regions in central Germany where this material has been used in unbonded courses. The action mechanism and possible countermeasures by using additional processing steps are described below.

2 Origin of gypsum constituents in crushed concrete using the example of prefabricated buildings

Recycling plants are increasingly having to process concrete from the demolition of buildings erected between 1970 and 1990. In eastern Germany a considerable proportion of this crushed concrete comes from prefabricated buildings (Fig. 2) that are being pulled down as part of the “Eastern Urban Redevelopment” programme. An interim balance shows that about 105 000 apartments had been demolished by the end of 2005. Measured against the programme objective formulated in 2002 – reduction in the number of unoccupied apartments by about 350 000 – the demolition will have to be continued and even intensified in the next few years [4].

During the construction of apartment buildings in the DDR (German Democratic Republic), which after 1960 was carried out almost entirely by the prefabricated slab system, gypsum building materials were used extensively for the interior finishing. The main focus lay in the districts where gypsum deposits were available. With an output of between 2.5 and 2.8 million t/a the DDR was one of the leading countries for the output of gypsum and anhydrite. The extensive deposits had uncomplicated stratification and were therefore easy to extract in quarries with gypsum levels of about 85 % that fluctuated within narrow margins. The main deposits were concentrated regionally in Thuringia and Saxony Anhalt. Building plaster and a variety of gypsum units were used. The range of gypsum units used is shown in Table 1 [5]. The composition varied. Pure gypsum building materials and also gypsum concrete, i. e. gypsum mixed with sand, were used.

Gypsum was installed in various types of buildings in bath cubicles, partition walls, as anhydrite floor screed and as dividing and facing walls. If it is assumed that such buildings



2 Betonbruch aus Plattenbauten
Crushed concrete from prefabricate buildings

Tabelle 1: Erzeugnissortiment wichtigster Gipsbauelemente in der DDR [5]

Table 1: Range of products of the most important gypsum units in the German Democratic Republic [5]

	Abmessungen / Dimensions [mm]
Nicht hydrophobierte und hydrophobierte Gipskartonplatten / Non-moisture resistant and moisture resistant gypsum plasterboard	2400 bis / to 3300 x 1200
Konstruktionen aus Gipskartonplatten / Structures made of gypsum plasterboard	
Ständerwände / Single-sheet walls	2400 bis / to 3300 x 1200
Untergehängte Decken / Suspended ceilings	400 bis / to 1200 x 600 bis /to 2400
Vorsatzschalen mit Wärmedämmung / Curtain walling with insulation	2400 to / bis 3300 hoch / high
Montage-Estrich / Floor screed	
Gipsbauplatten für Trennwände / Gypsum plaster slabs for dividing walls	666 x 500 x 70
Deckenelemente / Ceiling elements	600 x 600
Luftleitungselemente / Air duct elements	max. 2800 mm lang / long
Formteile: L- und U-Profile / Moulded parts: L and U profiles	max. 1600 mm lang / long
Brandschutzverkleidungselemente / Fire protection cladding elements	max. 1500 mm lang / long
Schmuck- und Architekturelemente / Decorative and architectural elements	
Sanitärzellen / Sanitary units	2600 x 2200 x 2100
Raumwandgroße Trennwandplatten / Wall-sized partition wall slabs	3300 x 5200 x 70
Raumhohe Streifenplatten / Ceiling height precast planks	max. 3000 x 510 x 70

an Gips und Anhydrit. Die Gipsproduktion war aufgrund großflächiger Lagerstätten mit unkomplizierter Lagerung und damit leichter Gewinnbarkeit im Tagebau sowie in engen Grenzen schwankenden Gipsgehalten dieser Vorkommen um 85 % gut entwickelt. Die Hauptvorkommen konzentrierten sich regional auf Thüringen und Sachsen-Anhalt. Zur Anwendung kamen Baugipse sowie verschiedene Gipsbauelemente. Das Sortiment der verwendeten Gipsbauelemente ist in **Tabelle 1** dargestellt [5]. Die Zusammensetzung war variabel. Sowohl reine Gipsbaustoffe als auch Gipsbeton, worunter ein mit Sand gemagerter Gips zu verstehen ist, wurden eingesetzt.

Gips wurde in den verschiedenen Gebäudetypen in Badzellen, Zwischenwänden, als Anhydritestrich und als Trenn- und Vorsatzwand eingebaut. Wird angenommen, dass ein solches Gebäude ohne Selektion der gipshaltigen Baustoffe rückgebaut wird, liegen im Ergebnis einer Abbruchmaßnahme Gemische aus Beton und Gips vor. Der Gehalt an gipshaltigen Baustoffen kann exemplarisch für Gebäude des Plattenbautyps P 2, der von 1966 bis 1990 in der DDR gebaut wurde und ca. 17 % des Wohnungsbestands in Fertigteilbauweise ausmacht, abgeschätzt werden. Basierend auf den Dokumentationen zu Materialarten und -mengen für diese Typenserie [6, 7] beträgt der Gehalt an gipshaltigen Baustoffen 3,1 Masse-%, wenn lediglich Anhydritestrich als sulfathaltiger Baustoff eingebaut wurde. Er steigt auf 6,6 Masse-% an, wenn die eingebaute Sanitärzelle ebenfalls gipshaltig ist.

Im Rahmen der Setzversuche wurden die Gipsgehalte von RC-Baustoffen, die überwiegend aus Plattenbaumaterial hergestellt worden waren, durch händische Sortierung ermittelt. Die Ergebnisse von 7 Sortieranalysen sind in der **Tabelle 2** zusammengefasst. Danach beträgt der Gipsgehalt im Mittel 2,73 Masse-% und bewegt sich zwischen 1,8 und 5,35 Masse-%. Die Abschätzungen des Gipsgehaltes anhand der nominellen Zusammensetzung werden also bestätigt.

are demolished without selecting the building materials that contain gypsum then demolition will result in a mixture of concrete and gypsum. The content of building materials that contain gypsum can be estimated for buildings of the P 2 prefabricated type that were built in the DDR from 1966 to 1990 and account for about 17 % of the prefabricated housing. Based on the documentation of the types and quantities of materials for this type [6, 7] the content of building materials consisting of gypsum is 3.1 mass % when anhydrite floor screed was the only building material installed that contained sulfate. It rises to 6.6 mass % if the sanitary modules installed also containing gypsum.

During the jiggling trials the gypsum levels in recycled building materials that had been produced predominantly from prefabricated building material were determined by manual sorting. The results of a total of 7 sorting analyses are summarized in **Table 2**. This shows that the average gypsum content is 2.73 mass % and varies between 1.8 and 5.35 mass % and therefore confirms the estimates of the gypsum content based on the nominal composition.

3 Effect of gypsum constituents in crushed concrete

All the instructions developed for recycled materials limit the permissible sulfate content. For example, the content of acid-soluble sulfate in recycled aggregates complying with DIN 4226-10 that are intended for re-use in concrete production must not exceed 0.8 mass % to exclude any expansion phenomena in the secondary concretes. Values for the sulfate concentrate in the eluate that are based on the water resources policy apply to aggregates that are to be used in unbonded courses in road construction.

Isolated cases of heave, which required removal of the material, have been observed when using recycled concrete building materials in unbonded systems. These cases of heave occurred both with courses covered by top courses and with

Tabelle 2: Zusammensetzung von RC-Baustoffen, überwiegend hergestellt aus Abbruchmaterial von Plattenbauten

Table 2: Composition of recycled building materials, produced predominantly from demolition material from prefabricated buildings

	Mittelwert / Average	Standard- abweichung / Standard deviation	Variations- koeffizient / Coefficient of variation	Min.	Max.
	[M.-% / Mass%]		[%]	[M.-% / Mass%]	
Beton und Gesteinskörnung / Concrete and aggregate	93,75	1,70	1,81	90,49	95,39
Ziegel, Klinker, Steinzeug / Brick, clinker, stoneware	2,85	1,59	55,73	1,20	6,18
Gipsbaustoffe / Gypsum building materials	2,73	1,11	40,52	1,80	5,35
Andere Bestandteile / Other constituents	0,65	0,21	31,63	0,36	0,96

3 Auswirkungen von Gipsbestandteilen im Betonbruch

In allen für Rezyklate entwickelten Vorschriften wird der zulässige Sulfatgehalt beschränkt. So darf der Gehalt an säurelöslichem Sulfat in rezyklierten Gesteinskörnungen nach der DIN 4226-100, welche wieder zur Betonherstellung eingesetzt werden sollen, 0,8 Masse-% nicht überschreiten, um Treiberscheinungen in den Sekundärbetonen auszuschließen. Für Körnungen, die in ungebundenen Schichten im Straßen- und Wegebau eingesetzt werden sollen, gelten wasserwirtschaftliche begründete Werte für die Sulfatkonzentration im Eluat.

Beim Einsatz von RC-Baustoffen aus Beton in ungebundenen Systemen wurden vereinzelt Hebungen beobachtet, die den Ausbau des Materials notwendig machten. Solche Hebungen traten sowohl bei mit Deckschichten überbauten Schichten als auch bei Schichten ohne Überbauung auf. Das eingesetzte Material entsprach in allen Fällen den Anforderungen. Der Sulfatgehalt im Eluat lag unterhalb der in der TL Gestein-StB [8] angegebenen Konzentration bzw. entsprach den Vorgaben der LAGA für den Sulfatgehalt im Eluat [9]. Trotzdem konnte bei den Untersuchungen der Schadensfälle in jedem Fall das sulfathaltige Mineral Ettringit und zum Teil auch Thaumasit nachgewiesen werden.

Für Betone ist das Phänomen der Gefügeschädigung durch Ettringitbildung seit mehr als 100 Jahren bekannt und bis heute Gegenstand intensiver Forschungen. Ausgelöst wird die Ettringitbildung durch das Zusammenwirken von Sulfaten und reaktionsfähiger Tonerde bei einem ausreichenden Kalkangebot und dem Vorhandensein von Wasser. Die Sulfate können entweder aus dem Beton selbst oder aus Wässern und Böden stammen. Es entsteht die Verbindung Ettringit $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$. Eine Volumenvergrößerung bis auf das 8-fache des Ausgangsvolumens tritt auf. Treiberscheinungen sind die Folge.

Parallel zur Bildung von Ettringit kann bei Sulfatangriff auch Thaumasit gebildet werden. Reaktionspartner sind in diesem Fall Siliziumdioxid, Carbonat, Sulfat und Wasser. Thaumasit ist ein dem Ettringit verwandtes Mineral mit ähnlicher Kristallstruktur und der Zusammensetzung $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$. Die Thaumasitbildung führt im Unterschied zur Ettringitbildung nicht zu einer treibenden Reaktion, sondern zu einer Entfestigung bis hin zu

courses without any covering. In all cases the material used complied with the requirements. The sulfate content in the eluate lay below the concentration specified in TL Gestein-StB [8] and complied with the guidelines in the LAGA for the sulfate content in the eluate [9]. In spite of this the sulfate-containing mineral ettringite, and in some cases also thaumasite, were detected in every case in the investigations of the damage.

The phenomenon of damage to the microstructure of concrete through ettringite formation has been known for more than 100 years and is until today the subject of intensive research. Ettringite formation is initiated by the interaction of sulfates and reactive alumina with an adequate input of lime and the presence of water. The sulfates can come either from the concrete itself or from the water and soil. The compound ettringite $3 \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3 \text{CaSO}_4 \cdot 32 \text{H}_2\text{O}$ is formed with an increase in volume of up to 8-times of the original volume, resulting in expansion phenomena.

Thaumasite can also be formed during sulfate attack in parallel with the formation of ettringite. The reaction partners in this case are silicon dioxide, carbonate, sulfate and water. Thaumasite is mineral that is related to ettringite. It has a similar crystal structure and the composition $\text{CaSiO}_3 \cdot \text{CaCO}_3 \cdot \text{CaSO}_4 \cdot 16 \text{H}_2\text{O}$. Unlike the formation of ettringite the formation of thaumasite does not lead to an expansive reaction but to a loss of strength culminating in “dissolution of the hardened cement paste matrix, so that hardened concrete is converted into a pulpy mass” [10]. Thaumasite formation tends to occur at temperatures below 15 °C.

It is also known from soil stabilization with fine white lime (CaO) or slaked lime that chemical reactions and the formation of swellable compounds can occur if there are sulfates in the soil. The compounds observed in this connection are again ettringite and thaumasite [11]. If there is a sufficient quantity of water available during, or even after, the generation of these compounds then a significant increase in volume will occur. The result is heave and cracking in the top courses. If the starting constituents of the harmful reactions – lime from soil stabilization, aluminium oxide and sulfate from the soil, and moisture – are available in sufficient quantities then the occurrence of these reactions must be expected. Complete replacement of the soil is usually necessary to

einer „Auflösung der Zementsteinmatrix, so dass sich fester Beton in eine breiige Masse umwandelt“ [10]. Eine Thaumasitbildung erfolgt vorzugsweise bei Temperaturen unter 15 °C.

Auch aus der Bodenstabilisierung mit Weißfeinkalk (CaO) oder Kalkhydrat ist bekannt, dass es zu chemischen Reaktionen und zur Bildung quellfähiger Verbindungen kommen kann, wenn im Boden Sulfate vorhanden sind. Die in diesem Zusammenhang beobachteten Verbindungen sind wiederum Ettringit und Thaumasit [11]. Bei ausreichendem Wasserangebot während oder auch nach der Entstehung dieser Verbindungen tritt eine deutliche Volumenzunahme auf. Die Folge sind Hebungen und Rissbildungen in Deckschichten. Solange die Ausgangsprodukte der Schadreaktionen – Kalk aus der Bodenstabilisierung, Aluminiumoxid und Sulfat aus dem Boden sowie Feuchtigkeit – in ausreichenden Mengen zur Verfügung stehen, muss mit dem Auftreten dieser Reaktionen gerechnet werden. Deshalb ist zur Behebung der Schäden in der Regel ein kompletter Bodenaustausch erforderlich, weil durch Reparaturen der Deckschichten nicht die eigentlichen Ursachen beseitigt werden.

Das Beispiel der Bodenstabilisierung zeigt, dass bereits ein Kalkeintrag in den Boden ausreicht, um Ettringit- und Thaumasitbildung auszulösen. Alle anderen Reaktionspartner (Al_2O_3 , SiO_2 , CaCO_3 , SO_3 , H_2O) können vom Boden zur Verfügung gestellt werden. Werden RC-Baustoffe aus Beton im Boden eingesetzt, können die o. g. Reaktionspartner für die Ettringit- bzw. Thaumasitbildung ebenfalls vorhanden sein. Dabei müssen sie nicht zwingend allein aus dem Beton herrühren, sondern können auch aus dem Boden stammen. Zwei Beispiele aus der Literatur belegen das anschaulich:

Beispiel 1:

Bei Untersuchungen an verschiedenen Körnungen aus RC-Beton zeigte nur der RC-Beton eine Dehnung, der durch Sulfatangriff geschädigt war. Hier trat nach einer Wasserlagerung von 70 Tagen eine Volumendehnung von 4 % auf [12]. In diesem Fall war also das RC-Material selbst die Quelle der Sulfationen.

Beispiel 2:

Bei Untersuchungen zum Wiedereinsatz von RC-Beton, der aus dem Rückbau von Start- und Landebahnen von insgesamt 8 Flughäfen an verschiedenen Standorten der USA stammte, wurden nur in einem Fall Schäden beobachtet [13]. Bei dem in New Mexico gelegenen Flughafen traten an den Schichten aus dem RC-Beton erhebliche Treiberscheinungen durch Sulfatangriff auf, obwohl der Ausgangsbeton aus einem sulfatresistenten Zement hergestellt worden war und im zwischengelagerten Material keinerlei Gips, Ettringit oder Thaumasit nachgewiesen wurde. Hauptursache ist der für New Mexico typische, sehr hohe Sulfatgehalt im Boden. Begünstigt wird der Angriff durch die Anwesenheit von Bodenpartikeln im RC-Material, die als Al_2O_3 -Träger wirken können, und die naturgemäß höhere Permeabilität von RC-Körnungen im Vergleich zu Beton.

Es werden weitere Schadensfälle dargestellt sowohl an stabilisierten Böden als auch an RC-Baustoffen [14]. Dabei traten

rectify the damage because repairing the top course does not eliminate the actual cause.

The example of soil stabilization shows that an input of lime into the soil is all that is needed to initiate the formation of ettringite and thaumasite. All the other reaction partners (Al_2O_3 , SiO_2 , CaCO_3 , SO_3 , H_2O) can be provided by the soil. The above-mentioned reaction partners for the formation of ettringite and thaumasite can also be present if recycled concrete building materials are used in the soil. They do not have to originate just from the concrete but can also come from the soil. This can be demonstrated clearly by two examples from the literature.

Example 1:

During investigations carried out on various particle size ranges from recycled concrete only the recycled concrete that had been damaged by sulfate attack exhibited expansion. A volumetric expansion of 4 % occurred after storage in water for 70 days [12]. In this case the recycled concrete itself was the source of the sulfate ions.

Example 2:

In the investigations carried out into the re-use of recycled concrete that came from the demolition of take-off and landing strips from a total of 8 airports at various locations in the USA damage was observed in only one case [13]. In the airport located in New Mexico considerable expansion phenomena due to sulfate attack occurred in the courses made with the recycled concrete although the original concrete had been produced with sulfate-resistant cement and absolutely no gypsum, ettringite or thaumasite was detected in the material that had been placed in intermediate storage. The main cause was the very high sulfate content of the soil that is typical of New Mexico. The attack was promoted by the presence of soil particles in the recycled material that could act as a source of Al_2O_3 and the naturally higher permeability of the recycled particulate material when compared with concrete.

Other cases of damage have been found both in stabilized soil and in recycled building materials [14]. Damaged and undamaged sections of a road appeared immediately next to one another. Gypsum was detected in the soil in the damaged sections.

The literature that has been examined confirms that cases of heave that were observed in courses made of recycled building materials were caused by the formation of ettringite or thaumasite. The sulfate ions needed for the formation of ettringite or thaumasite could originate not only from the recycled material itself but also from geogenic or anthropogenic pollution of the soil. A multi-stage procedure is necessary if the unwanted expansive reaction is to be avoided. Firstly, there is always the option of removing the gypsum building materials during the demolition. If this is not possible for organizational or technical reasons the gypsum building materials must be removed from the recycled building material during the processing. In addition to these measures for reducing the amount of gypsum it is absolutely essential to take the local exposure conditions into account.



3 Leichtgut • Light material



4 Schwergut • Heavy material

geschädigte und nichtgeschädigte Abschnitte einer Straße unmittelbar nebeneinander auf. In den geschädigten Abschnitten wurde Gips im Boden nachgewiesen.

Durch die gesichtete Literatur wird bestätigt, dass die Hebungen, welche an Schichten aus RC-Baustoffen beobachtet wurden, durch Ettringit- oder Thaumasitbildung verursacht werden. Dabei können die für die Ettringit- oder Thaumasitbildung benötigten Sulfationen nicht nur aus dem RC-Material selbst sondern genauso aus geogenen oder anthropogenen Belastungen des Bodens stammen. Sollen die unerwünschten Treibreaktionen verhindert werden, ist eine mehrstufige Vorgehensweise erforderlich: Zunächst ist immer geboten, eine Abtrennung der Gipsbaustoffe bereits während des Rückbaus vorzunehmen. Falls das aus organisatorischen oder technischen Gründen nicht möglich ist, müssen die Gipsbaustoffe während der Aufbereitung aus dem RC-Baustoff abgetrennt werden. Zusätzlich zu diesen Maßnahmen zur Gipsreduzierung ist es unbedingt erforderlich, die Einbaubedingungen zu beachten.

Sowohl für den Sulfatgehalt der RC-Körnungen als auch für den Sulfatgehalt des Bodens, in welchen diese Baustoffe eingebracht werden sollen, sind Schranken festzulegen. Die Einbaubedingungen müssen also ebenso eindeutig definiert werden wie die Qualität des RC-Baustoffs selbst. Darüber hinaus sollte der Eintrag von Al_2O_3 , das als weiterer Auslöser für Treibreaktionen vermutet wird, in das RC-Material durch die Vermischung mit Bodenbestandteilen vermieden werden.

4 Abtrennung von Gipsbestandteilen mittels Setztechnik

4.1 Stand der Technik

Die Setztechnik stellt eine Möglichkeit dar, Gipsbaustoffe während der Aufbereitung aus RC-Baustoffen abzutrennen. Sie ist ein seit Jahrhunderten bekanntes Aufbereitungsverfahren, das erstmals 1556 von Agricola als Erzgewinnungsverfahren zur Erwähnung fand [15]. Heute dienen Setzmaschinen zur Aufbereitung von Kohle, Erzen, Kiesen und anderen Rohstoffen. Zunehmend wird diese Technik auch beim Recycling von Baustoffen eingesetzt.

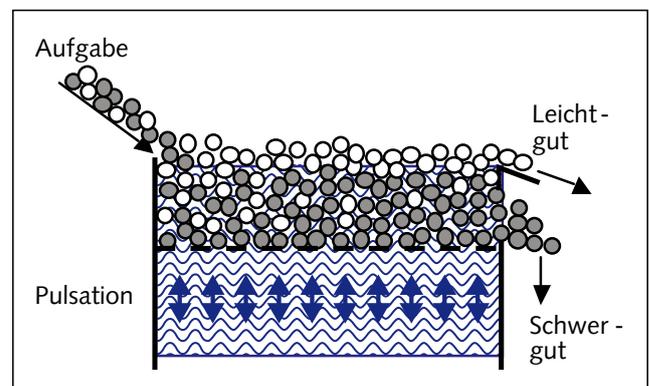
Restrictions must be laid down both for the sulfate content of the recycled aggregates and for the sulfate content of the soil in which these building materials are to be placed. The exposure conditions must therefore be just as clearly defined as the quality of the recycled building material itself. The input of Al_2O_3 , which is believed to be another initiator of expansive reactions, into the recycled material by mixing with soil components should also be avoided.

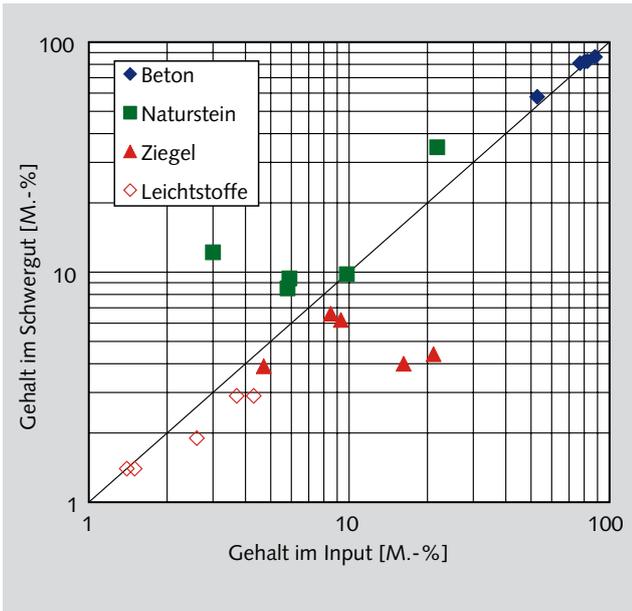
4 Removal of gypsum constituents by jigging

4.1 State of the art

Jigging is one possible way of removing gypsum building materials from recycled aggregates during the processing. It is a processing procedure that has been known for centuries and was first mentioned as an ore extraction procedure by Agricola in 1556 [15]. Jigging machines are now used for processing coal, ores, gravel and other raw materials. This technology is also being used increasingly during the recycling of building materials.

During jigging the separation process makes use of the different densities of the solid components that are present alongside one another in a mixture of materials. The input material, which consists of particles of different densities, is separated into light material (Fig. 3), in which particles with


 5 Schematische Darstellung des Setzvorgangs
 Schematic representation of the jigging process



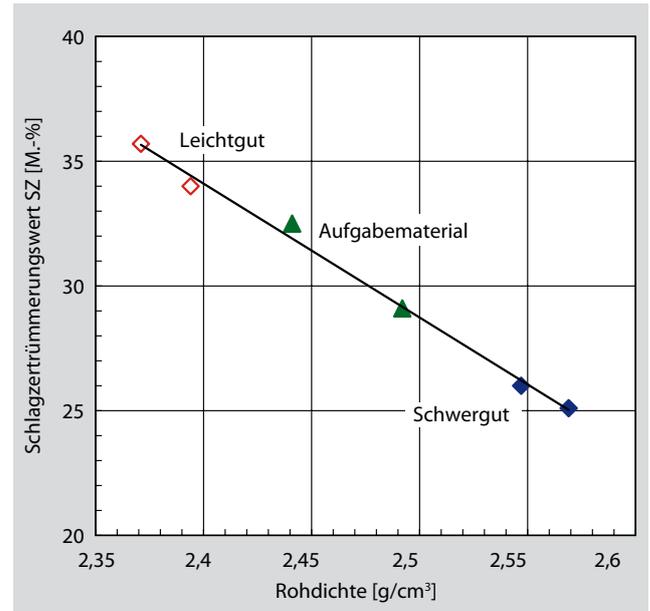
6 Mit der Setzmaschine erzielte Sortierergebnisse [18, 19]
 Sorting results obtained with the jiggging machine [18, 19]

Bei der Setztechnik werden die unterschiedlichen Dichten der Feststoffkomponenten, die in einem Materialgemisches nebeneinander vorliegen, zur Trennung genutzt. Das aufgebene Material, das aus Partikeln unterschiedlicher Dichte besteht, wird in Leichtgut (Bild 3), in welchem die spezifisch leichteren Partikel angereichert sind, und Schwergut (Bild 4), in welchem die spezifisch schwereren Partikel angereichert sind, getrennt. Während des Setzvorganges wird das zu sortierende Korngemisch von einem pulsierenden Wasserstrom aufgelockert. Dabei sinken die spezifisch schwereren Körnungen ab und die spezifisch leichteren Körnungen steigen nach oben auf und ordnen sich über den spezifisch schwereren Körnern an. Die leichteren Körner werden über ein Wehr ausgetragen. Die schwereren Körner werden im unteren Teil des Setzbettes abgezogen. Der Setzgutträger ist ein Siebboden. Das Prinzip der Setzmaschine ist auf Bild 5 dargestellt.

Der Setzvorgang wird durch die Eigenschaften des Aufgabeguts wie Dichte, Korngröße sowie Kornform und durch Prozessparameter wie Setzbethöhe, Viskosität des Fluids, Hubfrequenz, Hubhöhe, Form des Setzhubdiagramms etc. beeinflusst. Letztere dienen zur Steuerung des Setzvorgangs.

In der Bauschutt-sortierung wird die Setzarbeit bereits in einigen Fällen verwendet, um eine Abscheidung von Leichtstoffen [16, 17, 18] oder eine Sortierung von mineralischen Bestandteilen wie Ziegel und Beton [19, 20] vorzunehmen. Die Abreicherung von Zementstein aus Betonsanden wurde im Technikumsmaßstab erprobt [21].

Die Ergebnisse zur Sortierung der mineralischen Bestandteile, die mit einer seitenluftgepulsten Setzmaschine mit einer Durchsatzleistung von 50 t/h an den Körnungen 4/10 mm und 10/32 mm erzielt wurden, sind in Bild 6 dargestellt. Im Schwergut findet eine Anreicherung von Naturstein ein-



7 Abhängigkeit des Schlagzertrümmerwertes von der Rohdichte der Sortierprodukte
 Dependence of the impact fragmentation value on the bulk density of the products of sorting

a lower density accumulate, and heavy material (Fig. 4), in which the particles with a greater density accumulate. During the jiggging process the mixture of particles to be sorted is loosened by a pulsating stream of water. The particles with greater density sink and the particles with the lower density rise to the top and position themselves above the heavier particles. The lighter particles are discharged over a weir. The heavier particles are drawn off in the lower part of the jig bed. The material in the jiggging machine is supported on a sieve tray. The principle of the jiggging machine is shown in Fig. 5.

The jiggging process is affected by the properties of the feed material, such as density, particle size and particle shape, and by process parameters such as jig bed depth, viscosity of the fluid, stroke frequency and stroke height, shape of the jig stroke diagram, etc. These last are used to control the jiggging process.

Jiggging is already being used in some instances for sorting building rubble to remove lightweight materials [16, 17, 18] or to sort mineral constituents, such as bricks and concrete [19, 20]. Removal of hardened cement paste from concrete sand has already been tested on a pilot-plant scale [21].

The results of sorting the mineral constituents that were obtained with a side-air-pulsed jiggging machine with a throughput of 50 t/h on the size fractions 4/10 mm and 10/32 mm are shown in Fig. 6. Natural stone is, including asphalt, accumulated in the heavy material. In the light material there were higher percentages of the brick material and the lightweight materials than in the input material. There was only a slight change in the levels of concrete. At the same time as the change in material content there was also a change in bulk density (Fig. 7), which in turn affected the

Tabelle 3: Dichtequotienten zur Beurteilung der Sortierbarkeit von Gips-Beton-Gemischen in Setzmaschinen
 Table 3: Density quotients for assessing the sortability of mixtures of gypsum and concrete in jiggling machines

Selektierte Partikelart / Type of selected particles	Reindichte / True density [g/cm ³]	Rohdichte / Bulk density OD ¹ [g/cm ³]	Rohdichte / Bulk density SSD ² [g/cm ³]	Sortierquotient für die Trennung zwischen / Sorting quotient for separation between	
				OD	SSD
Gips aus Badzeilenmaterial / Gypsum from bath cubicle material	2,595	1,56	1,96	Beton A – Gips Badzelle / Concrete A – bath cubicle gypsum	2,50 1,60
Gips aus Estrich / Gypsum from floor screeds	2,551	1,89	2,15	Beton A – Gips Estrich / Concrete A – floor screed gypsum	1,57 1,33
Gips aus Beton A / Concrete from concrete A	n.b.	2,40	2,53	Beton Plattenbau Gips Badzelle / Prefabricated building concrete – bath cubicle gypsum	2,18 1,48
Beton aus Platten-baubeton / Concrete from prefabricated building concrete	2,774	2,22	2,42	Beton Plattenbau Gips Estrich / Prefabricated building concrete – floor screed gypsum	1,37 1,24

¹ OD: Oven dry

² SSD: Saturated, surface dry

Berechnet unter Annahme vollständiger Wassersättigung aller im Korn vorhandenen Poren
 Calculated on the assumption of complete water saturation of all the pores in the particle

schließlich Asphalt statt. Im Leichtgut waren das Ziegelmaterial und die Leichtstoffe in höheren Anteilen als im Ausgangsmaterial vorhanden. Die Betongehalte verändern sich nur wenig. Parallel zur Veränderung des Stoffbestandes verändert sich die Rohdichte (Bild 7), was wiederum auch Auswirkungen auf die mechanischen Eigenschaften wie den Schlagzertrümmerungswert oder den Frostwiderstand hat.

In den eigenen Untersuchungen stand die Abtrennung der Gipsbestandteile aus Betonbruch, der beim Abriss von Plattenbauten entsteht, im Mittelpunkt. Dabei galt es zunächst die Sortierbarkeit abzuschätzen. Die Abschätzung der Dichteunterschiede, welche für eine Setsortierung in Wasser erforderlich sind, lässt sich anhand des folgenden Quotienten vornehmen [22]:

$$q = \frac{\rho_S - \rho_{Fl}}{\rho_L - \rho_{Fl}}$$

ρ_S : Dichte des Fluids
 ρ_L : Dichte der spezifisch leichteren Komponente
 ρ_{Fl} : Dichte der spezifisch schwereren Komponente

Folgende Bereiche gelten:

- $q > 2,5$ Trennung bis zu Korngrößen von etwa 100 μm
- $q > 1,5$ Trennung bis zu Korngrößen von etwa 1,5 mm
- $q < 1,5$ durch Setzen keine Trennung möglich

Für Gips-Beton-Gemische wurde der Sortierquotient unter Verwendung der in Tabelle 3 angegebenen Dichten berechnet. Die Dichten wurden durch Messungen an reinen Gips- und Betonpartikeln, die aus den Untersuchungsmaterialien selektiert wurden, ermittelt. Bei den Berechnungen wurden zwei Möglichkeiten berücksichtigt:

- Die bei der Trennung wirksame Dichte ist die Trockenroh-dichte (OD)
- Bei der Trennung wirkt die Dichte im wassergesättigten Zustand (SSD)

mechanical properties such as the impact fragmentation value and the freeze-thaw resistance.

The investigations carried out in-house focused on the removal of the gypsum constituents from crushed concrete obtained during the demolition of prefabricated buildings. It was first necessary to estimate the separability. The differences in density that are necessary for jig sorting in water can be estimated with the aid of the following quotient [22]:

$$q = \frac{\rho_S - \rho_{Fl}}{\rho_L - \rho_{Fl}}$$

ρ_S : density of the lighter component
 ρ_L : density of the heavier component
 ρ_{Fl} : density of the fluid

The following ranges apply:

- $q > 2,5$ separation down to particle sizes of about 100 μm
- $q > 1,5$ separation down to particle sizes of about 1.5 mm
- $q < 1,5$ no separation possible by jiggling

The sorting quotient for gypsum-concrete mixtures was calculated using the densities given in Table 3. The densities were determined by measuring particles of pure gypsum and concrete that had been selected from the materials being investigated. Two possibilities were considered for the calculations:

- The density that is effective during the separation is the dry bulk density (OD)
- The density in the water-saturated state (SSD) should be used for the separation

With the aid of the quotient it can be estimated for the less probable case that the dry bulk density act during the jiggling process that particle mixtures of concrete and gypsum building materials can be separated down to particle sizes of about 100 μm . If the density in the water-saturated state is opera-

Anhand der errechneten Quotienten kann für den wenig wahrscheinlichen Fall, dass die Trockenrohichte während des Setzprozesses wirkt, abgeschätzt werden, dass Partikelgemische aus Beton und Gipsbaustoffen in etwa bis zu Partikelgrößen von 100 µm getrennt werden können. Wirkt die Dichte im wassergesättigten Zustand, scheint bestenfalls eine Trennung von Gemischen mit Körnungen im Millimeterbereich möglich.

Aus der Literatur [22] ebenso wie aus eigenen Untersuchungen [23, 24, 25] ist bekannt, dass bei besonders engen Dichteunterschieden das Trennergebnis verbessert werden kann, wenn die Unterschiede der Bewegungsfunktionen der zu trennenden Partikel verstärkt werden. Das kann mit solchen Setzmaschinen erreicht werden, in welchen asymmetrische Setzhubdiagramme realisierbar sind. Für die Gipsabtrennung mittels Setztechnik wurde deshalb die Nasssetzmaschine Triple A der Firma AGS Anlagen und Verfahren GmbH ausgewählt, welche diese Randbedingung erfüllt. Bei diesem Aggregat können die Erregerfrequenzen durch entsprechende Antriebssysteme so eingestellt werden, dass die unterschiedlichen Bewegungen der Gips- und Betonpartikel verstärkt werden. Dadurch wird die Trennung insbesondere bei geringen Dichteunterschieden unterstützt.

Lesen Sie den zweiten Teil in der Ausgabe 7-8/2010 der AT INTERNATIONAL. Nach dem Kapitel „Stand der Technik“ beschäftigt sich der folgende Teil dieses Beitrages mit der Vorgehensweise bei den Setzversuchen zur Gipsabtrennung, den daraus resultierenden Ergebnissen und der Auswertung.

Literatur/Literature

- [1] Hummel, H.-U.: Entwicklungen und Trends in der Gipsindustrie. 16. Internationale Baustofftagung, Weimar 2006, Tagungsbericht, Band 1, 1-0017-1-0032
- [2] Arendt, M.: Kreislaufwirtschaft im Baubereich: Steuerung zukünftiger Stoffströme am Beispiel Gips. Dissertation, Forschungszentrum Karlsruhe GmbH, Karlsruhe 2001
- [3] Der Bedarf an mineralischen Baustoffen. Gutachten über den künftigen Bedarf an mineralischen Rohstoffen unter Berücksichtigung des Einsatzes von Recycling-Baustoffen. Herausgeben: Bundesverband Baustoffe Steine+Erden e.V. 2000
- [4] Stadtbau Ost – Stand und Perspektiven Erster Statusbericht der Bundestransferstelle Stadtbau Ost im Auftrag des BMVBS und des BBR Berlin, Januar 2006
- [5] Peter, Helmut: Angebot und Verwendung von Gips- und Anhydritrohstoffen in der DDR. Baustoffindustrie (1989) 2, S. 55-57
- [6] Wiederverwendung von Gebäuden und Gebäudeteilen, Materialien zur Abfallwirtschaft, Landesamt für Umwelt und Geologie, Freistaat Sachsen, 1999
- [7] Mettke, A.; u. a.: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf“ Brandenburgische Technische Universität Cottbus, Fachgruppe Bauliches Recycling, Cottbus 2008
- [8] Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau TL Gestein StB 04, Ausgabe 2004 / Fassung 2007, FGSV-Nr. 613
- [9] LAGA Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Reststoffen/Abfällen. Technische Regeln, Überarbeitete LAGA-Mitteilung 20, 2003/2004, Herausgeber Länderarbeitsgemeinschaft Abfall LAGA
- [10] Sulfatgriff auf Beton – Stellungnahme des DAfStb, März-Ausgabe des DAfStb-Rundschreibens 2003

tive then at best a separation of mixtures with particle sizes in the millimetre range is possible.

It is known from the literature [22] as well as from in-house investigations [23, 24, 25] that the separation result can be improved for particularly small differences in density if the differences in the movement functions of the particles to be separated can be intensified. This can be achieved with jiggling machines in which asymmetrical jig stroke diagrams can be implemented. For this reason the Triple A wet jiggling machine from AGS Anlagen und Verfahren GmbH that fulfils this condition was chosen for removing gypsum by jiggling. In this unit the excitation frequencies can be set by appropriate drive systems so that the different movements of the gypsum and concrete particles are intensified. This assists the separation, especially where there are small differences in density.

Read the second part in issue 7-8/2010 of AT INTERNATIONAL. Following the section headed „State of the Art“, the following part of this paper discusses the procedure adopted in jiggling tests for gypsum separation, the results of these tests and their evaluation.

- [11] Veith, G.: Verwendung von kalkaktivierter Hochofenschlacke bei der Bodenstabilisierung. TIEFBAU (2001), Heft 10, S. 680-682
- [12] Rathje, Ellen; Trejo, David; Folliard, Kevin: Potential Use of Crushed Concrete and Recycled Asphalt. Center for Transportation Research, The University of Texas at Austin, March 2006
- [13] Athar Saeed u. a.: Evaluation, Design and Construction Technique for Airfield Concrete Pavement Used as Recycled Material for Base. Applied Research Associates; Vicksburg 2006
- [14] Dar-Hao Chen u. a.: Forensic Investigation of a Sulfate-Heaved Project in Texas. Journal of Performance of Constructed Facilities © ASCE / November 2005, p 324-330
- [15] Agricola, G.: De re metallica – Translated from the first latin edition of 1556, Hrsg. H.C. Hoover und L.H. Hoover. New York: Dover Publications Inc. 1950
- [16] Kellervessel, H.: Setzmaschinen, besonders für Recyclingaufgaben – Möglichkeiten, Grenzen, Bauarten. Aufbereitungs-Technik 34 (1993), Nr. 10, S. 521-530
- [17] Jungmann, A.: Bauschutttaufbereitung in alljig-Setzmaschinen in Europa und USA. Aufbereitungs-Technik 38 (1997), Nr. 10, S. 543-549
- [18] Derks, J.W.; Moskala, R.; Schneider-Kühn, U.: Naßaufbereitung von Bauschutt mit Schwingsetzmaschinen. Aufbereitungs-Technik 38 (1997), Nr. 3, S. 139-143
- [19] Mesters, K.; Kurkowski, H.: Dichtesortierung von Recycling-Baustoffen mit Hilfe der Setzmaschinentechnik. Aufbereitungs-Technik 38 (1997), Nr. 10, S. 536-542
- [20] Hanisch, J.; Kurkowski, H.: Aktueller Stand der Bauabfallsortierung. EP 18 (2000), H. 3, S. 11-15
- [21] Weimann, K.: Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinentechnik. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2008
- [22] Handbuch der Mechanischen Verfahrenstechnik. Herausgeber H. Schubert. Band 2. Wiley-VCH Verlag, Weinheim 2003
- [23] Wienke, L.; Müller, A.: Untersuchungen zur Optimierung der Setzmaschinentechnik. Ratgeber Abbruch & Recycling 2004, S. 45-50. Stein-Verlag Baden-Baden GmbH, Iffezheim
- [24] Wienke, L.; Müller, A.: Untersuchungen zur Optimierung der Setzmaschinentechnik. Vortrag zum 3. Kolloquium SORTIEREN der Technischen Universität Berlin am 09. und 10. Oktober 2003 in Berlin
- [25] Wienke, L.; Müller, A.: Measurements and models for the gravity concentration of C&D waste through jiggling. Rilem Conference 2004 Barcelona