



*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 reduziert • Gypsum reduced

Gipsbestandteile in Betonrezyklaten – Herkunft, Auswirkungen und Abtrennung mittels Setztechnik, Teil 2

Zusammenfassung: Teil 1 des nachfolgenden Artikels – veröffentlicht in AT 6/2010, S. 34-43 – behandelte die bautechnischen Auswirkungen von Gipsbestandteilen in Betonrezyklaten. Welche Möglichkeiten die Aufbereitungstechnik zur Abtrennung dieses Baustoffes beim Rückbau von Betonbruch bietet, zeigen die Autoren nachfolgend, am Beispiel einer Versuchsserie zur Gipsabtrennung mit Hilfe der Setzmaschinenteknik. Die Auswertung der Versuchsergebnisse verdeutlicht die durch den Setzprozess erreichten Qualitätsverbesserungen des Recyclingbaustoffes, der aufgrund des verringerten Gipsgehalts umwelt- wie auch bautechnische Anforderungen erfüllt und damit problemlos einsatzfähig gemacht werden kann.

Gypsum constituents in recycled concrete – origin, effects and removal by jigging, part 2

Summary: Part 1 of the following article – published in AT 6/2010, p. 34-43 – discussed the structural implications of gypsum constituents in recycled concrete. The authors explain the possibilities available in mineral processing for the removal of this building material in the reclaiming of concrete rubble on the basis of a series of gypsum removal tests using jigs. Evaluation of the test results clearly shows an improvement in the quality of the recycled building material, which, thanks to the lower gypsum content, meets environmental and structural requirements and can easily be made suitable for further use.



Nasssetzmaschine während des Versuchsablaufs • Wet jigging machine during the experimental procedure

4.2 Vorgehensweise bei den Setzversuchen zur Gipsabtrennung aus RC-Baustoffen

4.2.1 Versuchsaufbau

Die Nasssetzmaschine Triple A einschließlich aller benötigten zusätzlichen Aggregate und Versorgungseinheiten wurde bei den Stadtwerken Erfurt am Standort des Bauabfallrecyclingzentrums in Erfurt-Schwerborn installiert und in Betrieb genommen. Im Bild 8 ist der Anlagenaufbau dargestellt, der aus der eigentlichen Nasssetzmaschine, einem Klärbehälter, einem Pumpensumpf, einem Entwässerungssieb sowie einer Linatex 80 Pumpe besteht. Im Bild 9 a-c ist die Setzmaschine einschließlich der peripheren Anlagen sowie einige Details dargestellt. Bei voller Auslastung erreicht die Setzmaschine einen Materialdurchsatz von 5-7 t/h.

Der Aufgabebehälter der Setzmaschine hat ein Volumen von ca. 0,1 m³; er fasst also eine RC-Baustoffmenge von ca. 120 kg. Der Setzgutträger der Maschine hat die Abmaße 400 x 1000 mm². Die Absetzbecken verfügen jeweils über ein Fassungsvermögen von ca. 1 m³ Wasser. Die Linatex Pumpe fördert ca. 50 m³ Prozesswasser pro Stunde im Kreislauf.

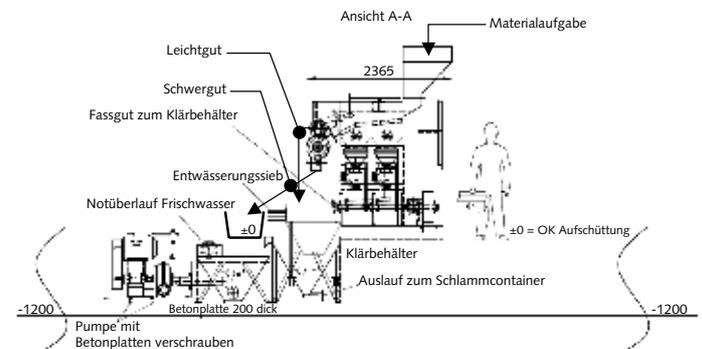
4.2.2 Untersuchungsmaterial

Als Ausgangsmaterialien wurden Betonbruch von Gleisschwellen (A), Ziegelbruch und selektiv ausgebaute Gips-

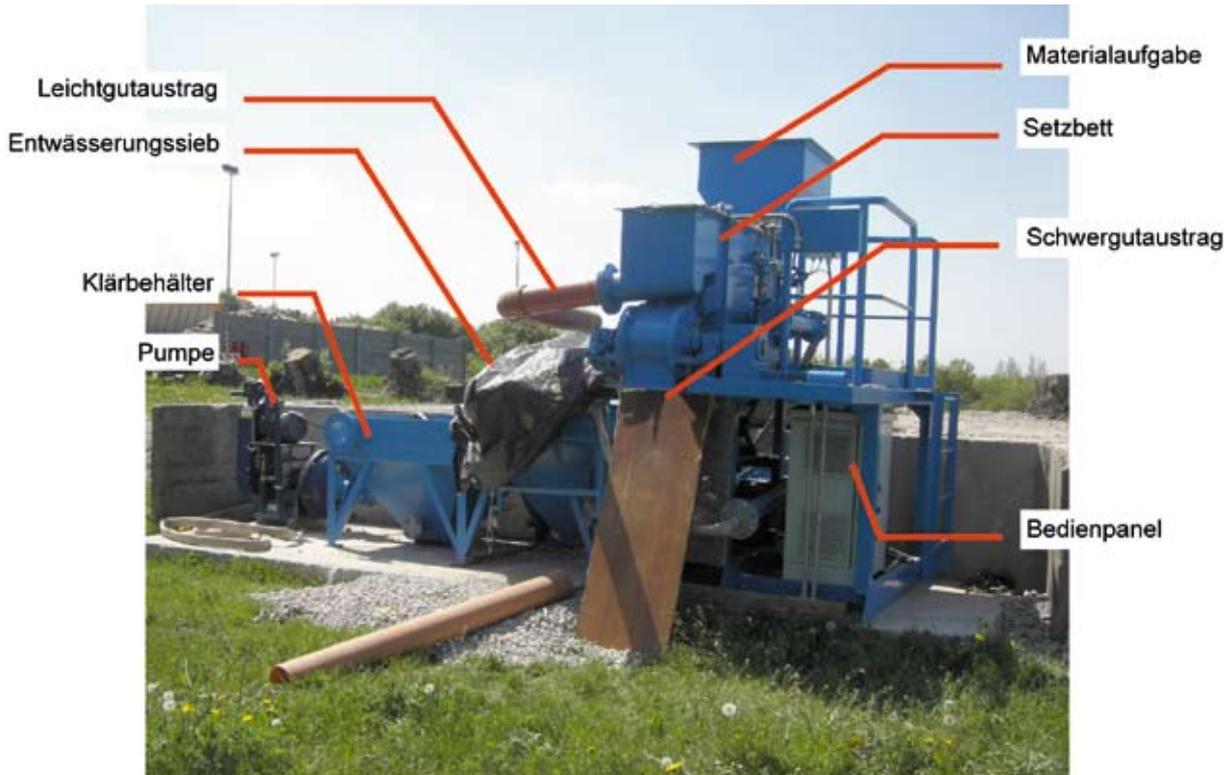
4.2 Procedure for removing gypsum from recycled building materials during the jigging trials

4.2.1 Test set-up

The Triple A wet jigging machine together with all the necessary accessories and supply units was installed and commissioned at the Erfurt municipal works at the building waste recycling centre in Erfurt-Schwerborn. Fig. 8 shows the structure of the plant that consists of the actual wet jigging



8 Aufstellplan der Nasssetzmaschine Triple A der Firma AGS Anlagen und Verfahren GmbH
Installation plan for the Triple A wet jigging machine from AGS Anlagen und Verfahren GmbH



9 Versuchsstand zur Erprobung der Setztechnik
Experimental rig for testing the jigging process

a Gesamtansicht des Versuchsaufbaus
a General view of the test set-up



9b Blick in das Setzbett
View inside the jig bed



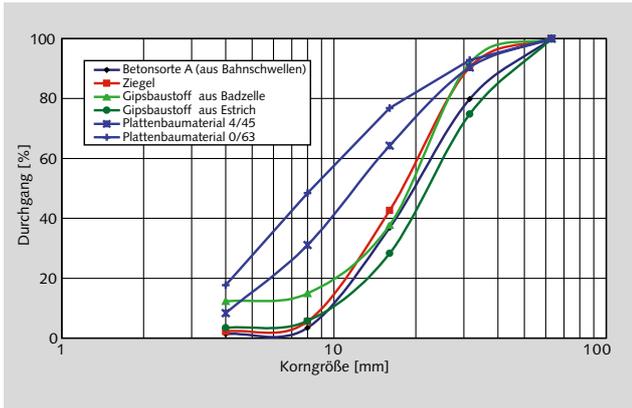
9c Leichtgutaustrag auf das Entwässerungssieb
Light material discharge onto the dewatering screen

baustoffe verwendet, welche durch Auswahl und Vorsortierung annähernd sortenrein waren. Zusätzlich wurde Plattenbauabbruch als Praxisgemisch in die Untersuchungen einbezogen. Die Materialien wurden in der Aufbereitungsanlage des Bauabfallrecyclingzentrums zerkleinert und klassiert. Sie lagen überwiegend als Kornfraktion 4/32 mm vor. Die Parameter der aufgegebenen Materialien sind in [Tabelle 4](#) zusammengefasst. Die Partikelgrößenverteilungen sind im [Bild 10](#) dargestellt.

Die Rohdichten der untersuchten Materialien bewegen sich zwischen dem für den Bahnschwellenbeton gemessenen Höchstwert von 2,40 g/cm³ und dem für den Gipsbaustoff

maschine, a settling container, a pump sump, a dewatering screen and a Linatex 80 pump. The jigging machine, including the peripheral equipment and some details, is shown in [Fig. 9 a-c](#). At full load the jigging machine achieves a material throughput of 5-7 t/h.

The feed container for the jigging machine has a volume of about 0.1 m³, which means that it can hold about 120 kg of recycled building material. The material support in the machine has dimensions of 400 x 1000 mm². The settling tanks can each hold about 1 m³ of water. The Linatex pump can recycle about 50 m³ of process water per hour.



10 Partikelgrößenverteilungen der untersuchten Ausgangsmaterialien der Setzversuche
 Particle size distributions of the starting materials for the jiggling trials

aus der Badzelle (Bild 11) gemessenen niedrigsten Wert von 1,56 g/cm³. Die Gehalte der jeweiligen Hauptkomponenten liegen über 94 Masse-%. Eine Ausnahme bildet das Ziegelmaterial, welches zu ca. 90 Masse-% aus Ziegeln besteht und daneben noch ca. 10 Masse-% Beton enthält.

Anhand der mittleren Partikelgröße und der Partikelgrößenverteilung ergibt sich, dass das Ziegelmaterial bzw. der Gipsbaustoff aus der Badzelle etwas feiner vorliegen als die ande-



11 Gipsbaustoff aus der Badzelle
 Building material from the bath cubicles

4.2.2 Test material

Crushed concrete from railway sleepers (A), crushed brick and selectively demolished gypsum building materials were used as the starting materials; these were nearly pure materials due to the selection and preliminary sorting. Demolition rubble from prefabricated buildings was also included in the investigations as a practical mixture. The materials were comminuted and screened in the processing plant of the building waste recycling centre. They consisted predominantly of the

ren Ausgangsmaterialien. Das gilt ebenfalls für die Plattenbaumaterialien 4/45 bzw. 0/63, die wegen des Ausfalls der Siebanlage nicht bzw. nur händisch abgeseibt wurden.

4.2.3 Versuchsablauf

In den ausgewählten Setzversuchen, über die hier berichtet werden soll (Tabelle 5), wurden zunächst die optimalen Maschineneinstellungen an tertiären Mischungen aus Beton, Ziegel und Gipsbaustoffen ermittelt. Anschließend wurden mit diesen Einstellungen Versuche zur Trennung binärer Beton-Gips-Gemische mit abgestuften Gipsgehalten vorgenommen. Für die Herstellung der Gemische wurden die benötigten verschiedenen Komponenten verworfen und im Mischbettverfahren homogenisiert.

Des Weiteren wurden Versuche zum Einfluss der Korngröße unter Verwendung des 3-Komponenten-Aufgabematerials aus Beton, Ziegel und Gipsbaustoff durchgeführt. Hierbei mussten für die Sortierung der Fraktion 2/4 mm die Maschineneinstellungen verändert werden. Versuche zur Trennung von realem Plattenbaumaterial mittels Setzmaschine schlossen sich an.

Während des Versuchsablaufs wurden das gesamte Leicht- und Schwergut aufgefangen und für die weiteren Untersuchungen getrocknet, gewogen und zwischengelagert. Anhand der Ergebnisse der Wägung kann das Massenausbringen

4/32 mm size fraction. The parameters of the feed materials are summarized in Table 4. The particle size distributions are shown in Fig. 10.

The bulk densities of the materials under investigation varied between the highest value of 2.40 g/cm³ measured for the railway sleeper concrete to the lowest value of 1.56 g/cm³ measured for the gypsum building material from the bath cubicles (Fig. 11). The main components each accounted for over 94 mass % of the respective content. An exception was the brick material that consisted of about 90 mass % of bricks and still contained about 10 mass % of concrete.

On the basis of the average particle size and the particle size distribution it was found that the brick material and the gypsum building material from the bath cubicles was somewhat finer than the other starting materials. This also applied to the 4/45 and 0/63 prefabricated building materials that, because of the failure of the screening plant, were only sieved by hand or not at all.

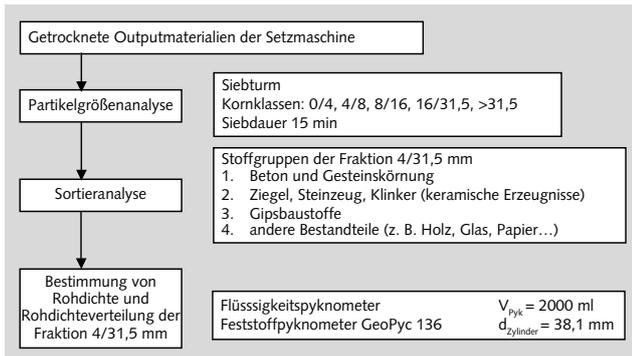
4.2.3 Experimental procedure

In the chosen jiggging trials that are reported here (Table 5) the first step was to determine the optimum machine settings for tertiary mixtures of concrete, brick and gypsum building materials. These settings were then used for trials to separate binary concrete-gypsum mixtures containing graduated lev-

Tabelle 4: Parameter der Ausgangsstoffe der Setzversuche

Table 4: Parameters of the starting materials for the jiggging trials

	Beton A / Concrete A	Ziegel / Brick	Gipsbaustoffe / Gypsum building materials		Plattenbau- material / Prefabricated building material 4/45
			Badzelle / Bath cubicles	Fußboden- estrich / Floor screed	
Physikalische Parameter / Physical parameters					
Reindichte / True density [g/cm ³]	n.b	2,807	2,595	2,551	2,774
Mittlere Rohdichte / Average bulk density [g/cm ³]	2,40	1,85	1,56	1,89	2,22
Mittlere Partikelgröße / Average particle size [mm]	23,88	20,59	19,91	25,9	15,22
Sortieranalyse / Sorting analysis [Masse- / Mass %]					
Beton und Gesteinskörnung / Concrete and aggregate	98,72	9,83	3,14	0,78	94,62
Ziegel, Klinker, Steinzeug / Brick, clinker, stoneware	0,64	89,22	1,10	0,33	2,53
Gipsbaustoffe / Gypsum building materials	0,04	0,76	94,58	98,11	2,49
Andere Bestandteile / Other constituents	0,60	0,27	1,18	0,78	0,36
Chemische Zusammensetzung / Chemical composition [M.- / Mass %]					
Trockenverlust bei / Loss on drying at 100 °C	1,2	0,6	0,01	0,1	1,5
Glühverlust bei / Loss on ignition at 1000 °C	10,9	2,3	11,6	12,8	15
SiO ₂	51,8	62	29,3	20,6	47,9
Al ₂ O ₃	9,1	15,6	2	0,8	7,8
Fe ₂ O ₃	3,1	6,2	0,7	0,4	2,5
CaO	17,3	4,5	23,4	26,4	18,5
MgO	1,2	3,3	0,5	0,4	0,9
K ₂ O	2,67	3,49	0,79	0,31	3,71
Na ₂ O	1,68	0,94	0,21	0,12	0,67
SO ₃	0,7	1,1	25,4	37,3	1,3
Wasserlösliches Chlorid / Water soluble chloride	0,006	0,013	0,016	0,010	0,012



12 Schema des Ablaufs der Probenbeurteilung und eingesetzte Methoden

Diagram showing the sequence for the sample assessment and the methods used

gen v_p an Produkt berechnet werden. Das Massenausbringen macht Aussagen zur Effektivität des Verfahrens.

$$v_p = \frac{M_p}{M_A} \cdot 100 = \frac{M_p}{M_p + M_{LG}} \cdot 100 [\%]$$

M_p : Produktmasse = Schwergutmasse
 M_{LG} : Leichtgutmasse

Für die Bewertung des Trennergebnisses wurden an den Materialien folgende Parameter bestimmt:

els of gypsum. The mixtures were produced by weighing out the different components required and then homogenizing them in a blending bed. Trials were also carried out to find the influence of the particle size using the 3-component feed material consisting of concrete, brick and gypsum building material. In this case the machine settings had to be changed for sorting the 2/4 mm fraction. This was followed by trials to separate real prefabricated building material with the jigging machine.

During the trials all the light and heavy material was collected and then dried, weighed and placed in intermediate storage for further investigations. The mass yield of product v_p can be calculated from the results of the weighing. The mass yields provide information about the effectiveness of the process.

$$v_p = \frac{M_p}{M_A} \cdot 100 = \frac{M_p}{M_p + M_{LG}} \cdot 100 [\%]$$

M_p : product mass = mass of heavy material
 M_{LG} : mass of light material

The following parameters of the materials were determined for evaluation of the separation result:

- particle size distributions of the light and heavy materials generated

- Partikelgrößenverteilungen der erzeugten Leicht- und Schwergüter
- Gipsgehalte im Schwergut, ermittelt durch händische Sortierung
- Gipsgehalte im Leichtgut ebenfalls durch händische Sortierung ermittelt
- Mittlere Dichten der erzeugten Leicht- und Schwergüter
- Dichteverteilungen ausgewählter Leicht- und Schwergüter

Der Ablauf der Materialuntersuchungen und die eingesetzten Methoden sind im **Bild 12** dargestellt. Die Gipsgehalte dienen hauptsächlich zur Bewertung der Güte der erzeugten Produkte. An den Dichten und Korngrößenverteilungen kann abgelesen werden, ob sich durch die Setsortierung weitere Eigenschaftsveränderungen des Schwerguts gegenüber dem Leichtgut ergeben haben.

4.3 Ergebnisse der Setzversuche zur Gipsabtrennung aus RC-Baustoffen

4.3.1 Einfluss der Maschineneinstellungen

In den ersten Versuchsserien, in denen die optimalen Maschineneinstellungen ermittelt wurden, konnte zunächst nachgewiesen werden, dass die Abtrennung des Gipses und z. T. auch des Ziegels aus der aufgegebenen tertiären Mischung möglich ist. Entsprechend der dargestellten, auf den Mittelwerten der insgesamt 9 Versuchsserien zur Maschineneinstellung aufbauenden Massenbilanz (**Bild 13**) wird das Aufgabematerial in das Schwergut (0,57 kg/kg) und das Leichtgut (0,43 kg/kg) aufgeteilt. Im Schwergut ist der Beton im Mittel von 62 Masse-% im Aufgabematerial auf

- gypsum content in the heavy material, determined by manual sorting
- gypsum content in the light material, also determined by manual sorting
- average densities of the light and heavy materials generated
- density distributions of selected light and heavy materials

The sequence of the material investigations and the methods used are shown in **Fig. 12**. The gypsum levels serve mainly to assess the quality of the products that have been obtained. From the densities and particle size distributions it is possible to deduce whether the jig sorting has resulted in any other changes in properties of the heavy material as compared with the light material.

4.3 Results of the jiggling trials to remove gypsum from recycled building materials

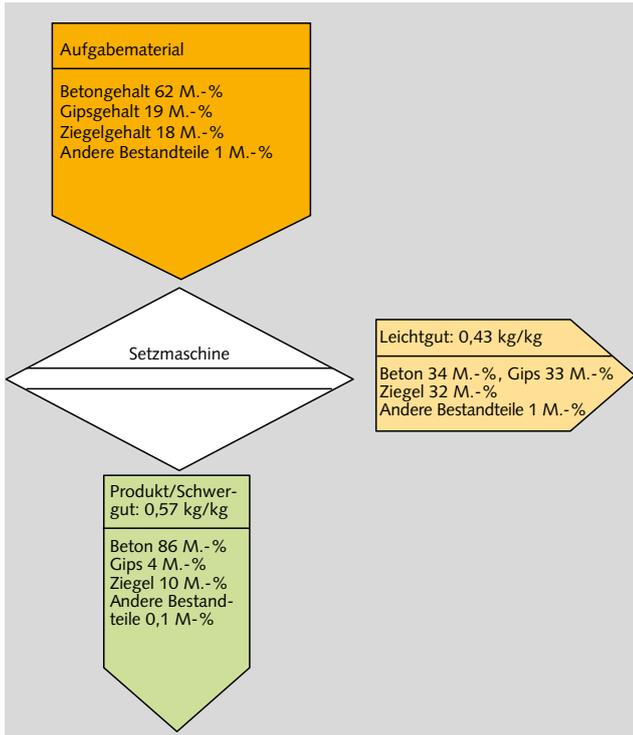
4.3.1 Influence of the machine settings

In the first test series in which the optimum machine settings were established it was first shown that it is possible to remove the gypsum, and in some cases also the brick, from the tertiary feed mixture. The feed material was divided into the heavy material (0.57 kg/kg) and the light material (0.43 kg/kg) in accordance with the mass balance shown in **Fig. 13** based on the average values of the total of 9 test series for the machine adjustment. The concrete averaging 62 mass % in the feed material was enriched to 86 mass % in the heavy material and the gypsum was depleted from 19 mass % to 4 mass %. The brick content fell from 18 mass % to 10 mass %. The light material was made up of approximately one third each of concrete, brick and gypsum.

Tabelle 5: Überblick über ausgewählte Setzversuche

Table 5: Overview of selected jiggling trials

Untersuchungsgegenstand / Subject of investigation	Ausgangsmaterial / Starting material	Variable / Variable
Einfluss der Maschineneinstellung / Influence of the machine setting	Gemisch / Mixture Betsorte A + Ziegel + Gipsbaustoff aus Badzelle / Concrete type A + brick + gypsum building material from bath cubicles 60 % + 20 % + 20 %	Schwimmengewicht, Aufgabeöffnung, Auslassöffnung, Hubfrequenz, Schichtdicke / Float weight, feed opening, outlet opening, stroke frequency, layer thickness
Einfluss des Gipsgehaltes bei abgestufter Dotierung / Influence of the gypsum content with graduated addition levels	Betsorte A + Gipsbaustoff aus Badzelle / Concrete type A + gypsum building material from bath cubicles	Gipsgehalte / Gypsum content 5 %, 10 %, 15 %, 20 %
	Betsorte A + Gipsbaustoff aus Fußbodenestrich A / Concrete type A + gypsum building material from floor screed A	Gipsgehalte / Gypsum content 5 %, 10 %, 15 %, 20 %
Einfluss des Gipsgehaltes bei Mehrfachdurchlauf / Influence of the gypsum content during multiple passes	Gemisch / Mixture Betsorte A + Ziegel + Gipsbaustoff aus Badzelle / Concrete type A + brick + gypsum building material from bath cubicles 60 % + 20 % + 20 %	Anzahl der Durchläufe durch die Setzmaschine / Number of passes through the jiggling machine
Korngrößeneinfluss / Influence of particle size	Gemisch / Mixture Betsorte A + Ziegel + Gipsbaustoff aus Badzelle / Concrete type A + brick + gypsum building material from bath cubicles 60 % + 20 % + 20 %	Kornfraktionen / Particle size fraction 2/4 mm 4/16 mm 16/45 mm 4/45 mm
Trennbarkeit von Praxisgemischen / Separability of the practical mixes	Plattenbaumaterial / Prefabricated building material 4/45 mm Plattenbaumaterial / Prefabricated building material 0/63 mm	Setzdauer / Jiggling duration 15 min, 30 min, 45 min

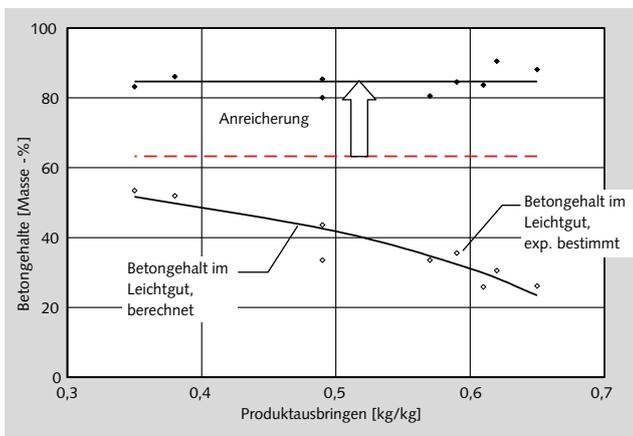


13 Massenbilanz, berechnet als Mittelwert aus den Ergebnissen der Versuche zur Maschineneinstellung

Mass balance calculated as average values from the results of the machine setting trials

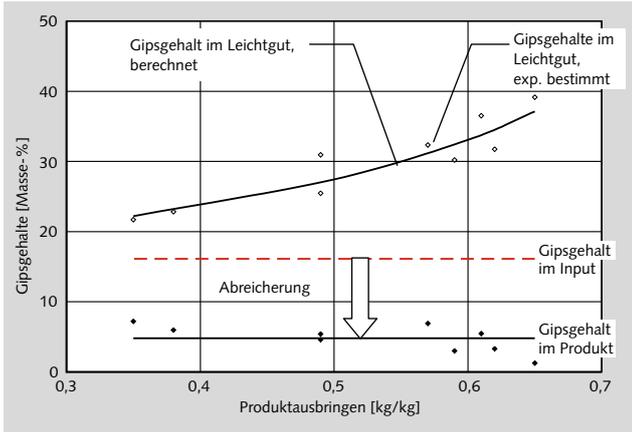
86 Masse-% angereichert. Der Gips ist von 19 Masse-% auf 4 Masse-% abgereichert. Der Ziegelgehalt nimmt von 18 Masse-% auf 10 Masse-% ab. Das Leichtgut besteht zu jeweils etwa einem Drittel aus Beton, Ziegel und Gips.

Bei einer Betrachtung der für jede Versuchsfahrt berechneten Massebilanz und der Beton- und Gipsgehalte, die im Schwer- gut und Leichtgut ermittelt wurden, zeigt sich, dass der Betongehalt im Produkt gegenüber dem Aufgabegut ange-



14 Veränderungen der Betongehalte im Produkt und im Leichtgut in Abhängigkeit vom Produktausbringen bei verschiedenen Maschineneinstellungen

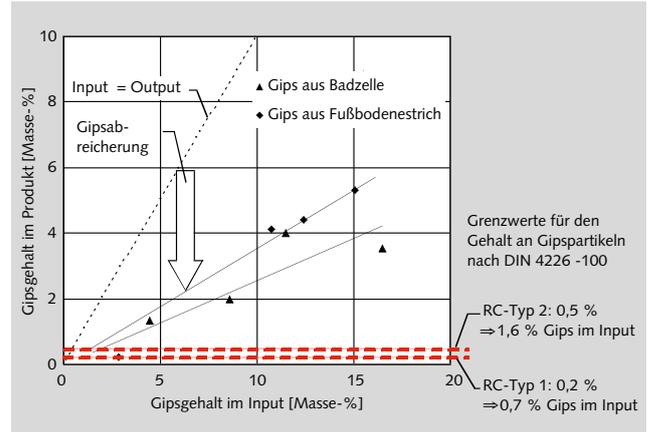
Changes in the levels of concrete in the product and light material as a function of the product yield at different machine settings



15 Veränderungen der Gipsgehalte im Produkt und im Leichtgut in Abhängigkeit vom Produktausbringen bei verschiedenen Maschineneinstellungen
Changes in the levels of gypsum in the product and light material as a function of the product yield at different machine settings

stiegen ist, aber wenig vom Massenausbringen beeinflusst wird. Der Betongehalt im Leichtgut ist abgereichert. Er nimmt mit zunehmendem Massenausbringen deutlich ab (Bild 14).

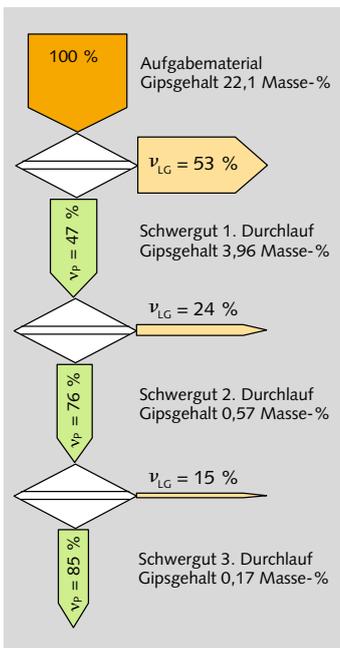
Der Gipsgehalt im Produkt ist gegenüber dem Aufgabegut reduziert. Eine Abhängigkeit vom Massenausbringen ist auch hier nicht zu erkennen. Bei einem Produktausbringen von 0,61 bis 0,65 kg/kg bewegt sich der Gipsgehalt zwischen 5,5 und 1,3 Masse-%. Im Mittel wird der Gipsgehalt im Produkt auf etwa ein Viertel des Ausgangsgehaltes reduziert. Der Gipsgehalt im Leichtgut liegt über dem Gehalt des Inputs und steigt mit zunehmendem Massenausbringen deutlich an (Bild 15).



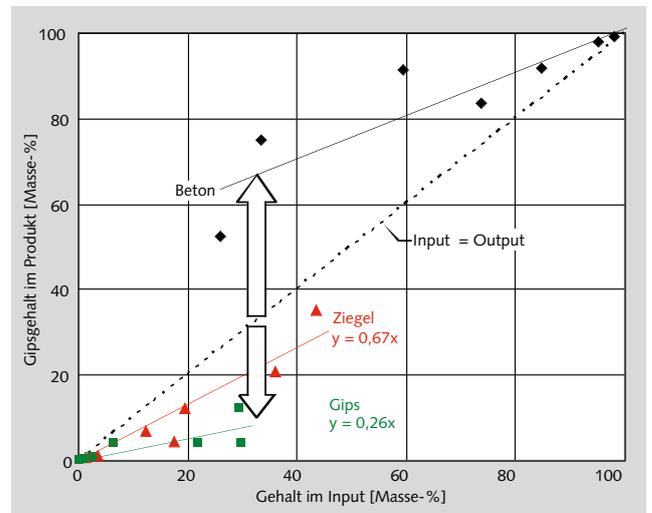
16 Veränderungen der Gipsgehalte im Produkt in Abhängigkeit vom Gipsgehalt im Aufgabematerial
Changes in the levels of gypsum in the product as a function of the gypsum content in the feed material

During an examination of the mass balance calculated for each test run and of the levels of concrete and gypsum measured in the heavy and light materials it became apparent that the concrete content in the product was higher than in the feed material but was hardly affected by the mass yield. The concrete content in the light material is reduced. It decreased significantly with increasing mass yield (Fig. 14).

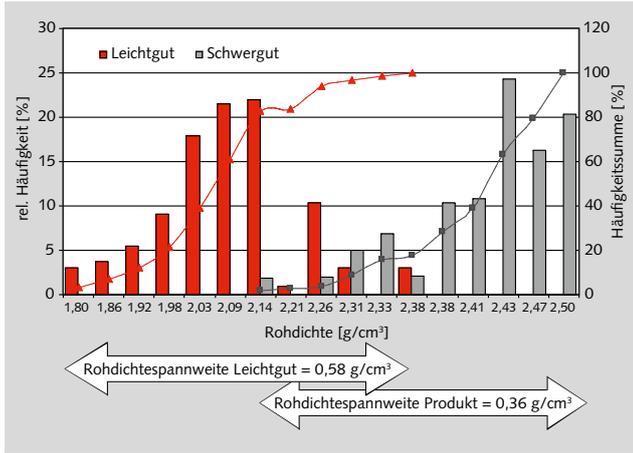
The gypsum content in the product was lower than in the feed material. Here again no dependence on the mass yield could be detected. For a product yield of 0.61 to 0.65 kg/kg the gypsum content varied between 5.5 and 1.3 mass %. On average the gypsum content in the product was reduced to about a quarter of the initial content. The gypsum content in the light material was higher than the input content and increased significantly with increasing mass yield (Fig. 15).



17 Abnahme der erzeugten Produktmenge und Reduzierung des Gipsgehaltes beim Mehrfachdurchlauf
Decrease in the amount of product generated and reduction of the gypsum content during multiple passes



18 Veränderungen der Gips- und Ziegelgehalte im Produkt in Abhängigkeit vom Gipsgehalt beim Mehrfachdurchlauf
Changes in the levels of gypsum and brick in the product as a function of gypsum content during multiple passes

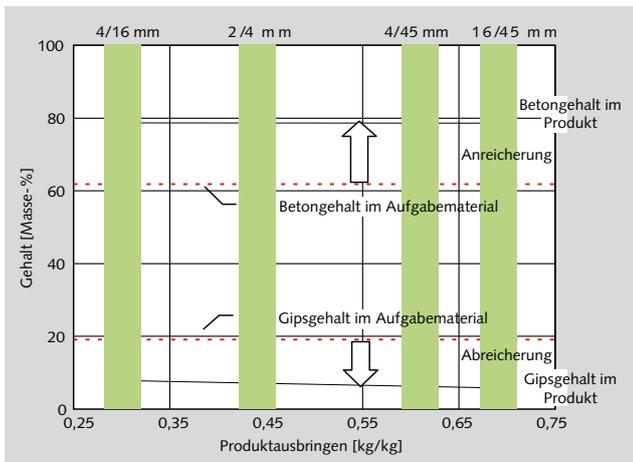


19 Masseverteilung der Rohdichte von Leicht- und Schwergut, dargestellt als relative Häufigkeit und Häufigkeitssumme
 Mass distribution of the bulk densities of the light and heavy materials, shown as relative frequency and cumulative frequency

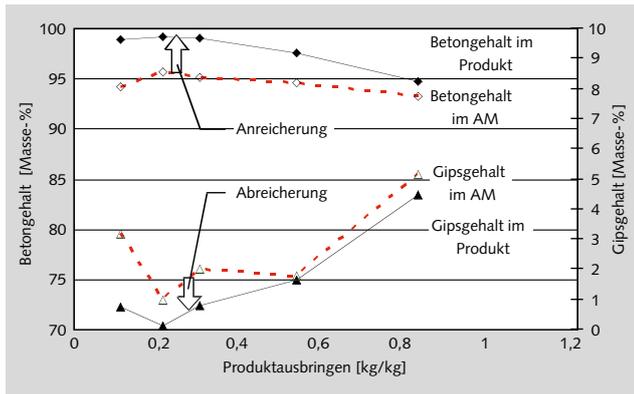
As far as the machine settings were concerned it was found that the mechanically adjustable parameters, such as the dimensions of the feed and outlet openings and the position of the float weight, had little effect on the jigging result. The influence of the stroke frequency and the layer thickness of the jig bed, which could be adjusted at the control system, was more significant. Good separation results were achieved with average stroke frequencies of 70 to 80 strokes per minute and layer thicknesses that remained less than 95 mm.

4.3.2 Influence of the gypsum content

The investigations into the separation of binary mixtures of concrete and gypsum containing graduated levels of gypsum showed a division of the feed material into about 75 % product and 25 % light material. The concrete content in the



20 Veränderungen der Beton- und Gipsgehalte durch den Setzprozess in Abhängigkeit vom Produktausbringen bei verschiedenen Kornfraktionen
 Changes in the levels of concrete and gypsum due to the jigging process as a function of the product yield for different particle size fractions



21 Veränderungen der Beton- und Gipsgehalte durch den Setzprozess in Abhängigkeit vom Produktausbringen bei den Praxisgemischen

Changes in the levels of concrete and gypsum due to the jiggling process as a function of the product yield for the practical mixtures

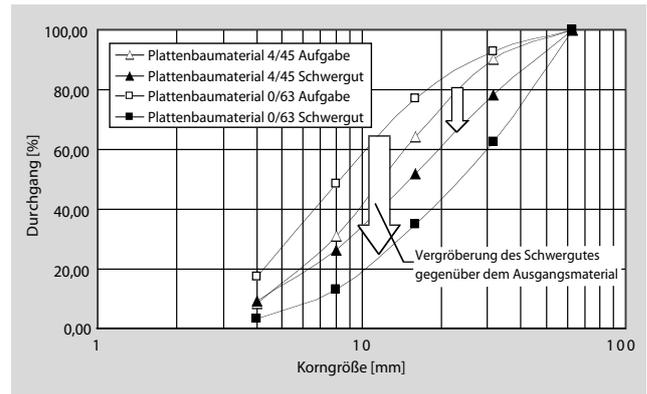
Bezüglich der Maschineneinstellungen ergab sich, dass die mechanisch verstellbaren Parameter wie Abmessungen der Aufgabeöffnung bzw. der Auslassöffnung und Position des Schwimmergewichtes wenig Einfluss auf das Setzergebnis haben. Deutlicher sind die Einflüsse der Hubfrequenz und der an der Steuerung einstellbaren Schichtdicke des Setzbettes. Bei mittleren Hubfrequenzen von 70 bis 80 Hübe pro Minute und bei Schichtdicken, welche unter 95 mm bleiben, werden günstige Trennergebnisse erzielt.

4.3.2 Einfluss der Gipsgehalte

Die Untersuchungen zur Trennung binärer Beton-Gips-Gemische mit abgestuften Gipsgehalten ergaben eine Aufteilung des Aufgabematerials in ca. 75 % Produkt und 25 % Leichtgut. Der Betongehalt im Produkt lag zwischen 94,3 Masse-% und 99,7 Masse-% und ist damit gegenüber dem Ausgangsmaterial, welches einen mittleren Betongehalt von 88,39 Masse-% aufwies, deutlich angereichert. Der Gipsgehalt des Produkts ist gegenüber dem Ausgangsmaterial verringert, wobei eine näherungsweise lineare Abhängigkeit zwischen dem Gipsgehalt im Input und dem Gipsgehalt im Produkt festgestellt werden konnte (Bild 16). Im Mittel wird eine Abreicherung des Gipsgehaltes des Produktes auf ein Drittel des Gehaltes im Aufgabematerial erreicht.

Wie ausgeführt, nimmt der erreichte Trenneffekt mit abnehmendem Dichteunterschied zwischen den zu trennenden Komponenten ab. Das spiegelt sich bei einem Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Gipsbaustoffarten aus Badzellen und Estrichen, die unterschiedliche Dichten aufweisen (vgl. Tabelle 4), wider. Der Estrich hat die höhere Dichte. Die Abreicherung aus dem Beton-Gips-Gemisch ist deshalb erwartungsgemäß geringer im Vergleich zum Gips aus der Badzelle.

Die Grenze für den Gehalt an Gipspartikeln in rezyklierten Zuschlägen, die laut DIN 4226-100 0,2 bzw. 0,5 Masse-% beträgt, kann bis zu einem Gipsgehalt im Ausgangsmaterial von ca. 0,7 Masse-% bzw. 1,6 Masse-% eingehalten werden. Bei höheren Gipsgehalten im Input müsste das Produkt die Setzmaschine mehrfach nacheinander durchlaufen. In den



22 Veränderungen der Partikelgrößenverteilungen der Aufgabematerialien gegenüber den als Produkt ausgetragenen Schwergütern bei den Praxisgemischen

Changes in the particle size distributions of the feed materials compared with the heavy materials discharged as product – for the practical mixtures

product lay between 94.3 mass % and 99.7 mass % and therefore increased significantly from the feed material, which had an average concrete content of 88.39 mass %. The gypsum content was reduced when compared with the starting material, and an approximately linear relationship was found between the gypsum content in the input and the gypsum content in the product (Fig. 16). On average, the gypsum content in the product was reduced to a third of the content in the feed material.

As mentioned, the separating effect achieved falls with decreasing difference in densities between the materials to be separated. This is reflected in a comparison of the results for the types of gypsum investigated from bath cubicles and floor screeds, which have different densities (cf. Table 4). The floor screed has the greater density. The removal from the mixture of concrete and gypsum is therefore, as expected, less than for the gypsum from bath cubicles.

The limits for the content of gypsum particles in recycled aggregates, which according to DIN 4226-100 are 0.2 and 0.5 mass %, can be met for gypsum levels in the starting material of up to about 0.7 mass % and 1.6 mass % respectively. For higher levels of gypsum in the input the product had to be passed through the jiggling machine several times in succession. In the trials carried out for this purpose on ternary mixtures of concrete, brick and gypsum from bath cubicles the initial gypsum content of 22.19 mass % was reduced to 3.96 mass % in the first pass. After passing through the jiggling machine again the gypsum content was only 0.57 mass % and was therefore only slightly above the permissible value given in DIN 4227-100. The third pass resulted in a product containing 0.17 mass % gypsum. However, the quantity of product obtained decreased continuously with the number of passes. After three passes the quantity of product obtained corresponded to about 30 % of the starting material (Fig. 17).

During the investigations with the ternary mixtures a reduction of the brick content in the heavy material when com-

dazu durchgeführten Versuchen an ternären Mischungen aus Beton, Ziegel und Gips aus Badzellen konnte der Ausgangsgipsgehalt von 22,19 Masse-% im ersten Durchlauf auf 3,96 Masse-% gesenkt werden. Nach nochmaligem Durchlaufen der Setzmaschine betrug der Gipsgehalt nur noch 0,57 Masse-% und lag damit nur wenig über dem nach DIN 4227-100 zulässigen Wert. Im dritten Durchlauf wurde ein Produkt mit 0,17 Masse-% Gips erzeugt. Allerdings nimmt die erzeugte Produktmenge mit der Anzahl der Durchläufe stetig ab. Nach drei Durchläufen beträgt die erzeugte Produktmenge ca. 30 % des Ausgangsmaterials (**Bild 17**).

Parallel zur Abtrennung des Gipses konnte bei den Untersuchungen der ternären Mischungen auch eine Senkung des Ziegelgehaltes im Schwergut gegenüber dem Ausgangsmaterial nachgewiesen werden (**Bild 18**). Diese fällt geringer aus als die Gipsabreicherung, was aufgrund der höheren Dichte der Ziegel plausibel ist.

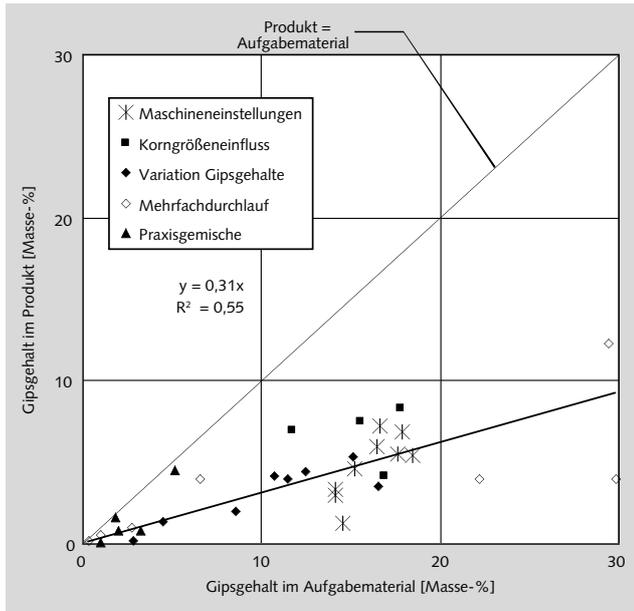
Von den Leicht- und Schwergütern, die aus den Untersuchungen an den binären Mischungen hervorgingen, wurden die Rohdichteverteilungen ermittelt. Dazu wurde eine Probe der erzeugten Produkte von ca. 2000 g in Teilproben von je 30-50 g zerlegt. Die Rohdichten dieser Teilproben wurden in einem Pulverpyknometer gemessen. Wie der Ergebnisdarstellung im **Bild 19** entnommen werden kann, liegt die mittlere Dichte des Leichtgutes mit $2,09 \text{ g/cm}^3$ eindeutig unter der des Schwergutes, welche $2,42 \text{ g/cm}^3$ beträgt. Hervorzuheben ist, dass die Spannweite der Rohdichteverteilung verändert wird. Die Spannweite der Rohdichte des Schwergutes ist deutlich geringer als die des Leichtgutes. Diese Tatsache stellt einen Vorteil dar, wenn das Produkt beispielsweise zur Betonherstellung eingesetzt werden sollte.

4.3.3 Korngrößeneinfluss

Die Untersuchungen zum Korngrößeneinfluss wurden für alle Fraktionen mit Korngrößen oberhalb 4 mm bei den zuvor ermittelten Maschineneinstellungen durchgeführt. Für die Sortierung der Fraktion 2/4 mm mussten die Einstellungen geändert werden. Für alle untersuchten Fraktionen konnte eine Abreicherung des Gipses im Produkt gegenüber dem Aufgabematerial nachgewiesen werden (**Bild 20**). Mit dem eingesetzten Setzmaschinentyp kann also auch die Fraktion 2/4 mm sortiert werden, wenn die Maschineneinstellungen entsprechend angepasst werden.

4.3.4 Trennbarkeit von Praxisgemischen

An RC-Baustoffen, die hauptsächlich aus Abbruchmaterial aus Plattenbauten ohne Materialtrennung beim Abbruch hergestellt worden waren, wurde nachgewiesen, dass auch aus diesen Praxisgemischen die Gipskörner abgetrennt werden können (**Bild 21**). Große Schwankungen in der Effektivität der Abtrennung gehen zum einen auf Qualitätsschwankungen des Eingangsmaterials zurück. Zum anderen hatten die Praxisgemische deutlich breitere Korngrößenverteilungen als die anderen untersuchten Ausgangsmaterialien (vgl. Bild 10). Dadurch wird der Setzprozess durch einen Klassierprozess überlagert, weil neben groben Partikeln mit niedrigerer Rohdichte auch feine Partikel mit höherer Dichte in das Leichtgut gelangen, was das vergleichsweise geringe Produktausbringen verursacht.

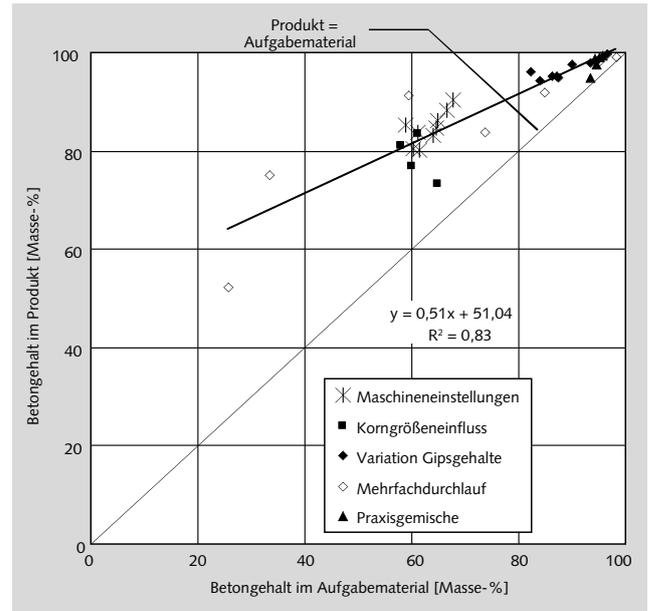


23 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Gipsgehalte der Produkte mit den Gipsgehalten der Ausgangsmaterialien
Summarized comparison of the levels of gypsum in the product with the levels of gypsum in the starting materials

Die Überlagerung des Setzvorgangs durch eine Klassierung führt zu einer deutlichen Differenzierung zwischen den Korngrößenverteilungen von Produkt und Aufgabematerial, die bei den anderen Untersuchungen kaum auftrat. Die Vergrößerung des Produktes gegenüber dem Aufgabematerial ist im **Bild 22** dargestellt. Parallel zu der Veränderung der Materialzusammensetzung und der Korngrößenverteilung konnte, wie bereits an den gipsdotierten Mischungen dargestellt, eine Zunahme der Rohdichte des Schwergutes gegenüber dem Leichtgut festgestellt werden. So beträgt die Dichte des Leichtgutes im Mittel 2,30 g/cm³, während die Dichte des Schwergutes im Mittel bei 2,52 g/cm³ liegt.

4.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse der Versuchsserien

Die Ergebnisse aller Versuchsserien zur Gipsabtrennung mittels Setzmaschinenteknik sind in **Bild 23** und **Bild 24** dargestellt. Danach kann in dem untersuchten Bereich von 0 bis 30 Masse-%, in welchem die Gipsgehalte des Aufgabematerials variiert wurden, eine Verminderung des Gipsgehaltes im



24 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Betongehalte der Produkte mit den Betongehalten der Ausgangsmaterialien
Summarized comparison of the levels of concrete in the product with the levels of concrete in the starting materials

pared with the starting material was also detected at the same time as the removal of the gypsum (**Fig. 18**). This was less than the depletion of gypsum, which is plausible due to the greater density of the brick.

The bulk density distributions of the light and heavy materials obtained from the investigations with the binary mixtures were measured. For this purpose a sample of the product weighing about 2000 g was broken down into sub-samples, each of 30-50 g. The bulk densities of the sub-samples were measured in a powder pycnometer. From the results shown in **Fig. 19** it can be deduced that the average density of the light material of 2.09 g/cm³ is significantly lower than that of the heavy material of 2.42 g/cm³. It should be emphasized that the range of the bulk density distributions changed. The range of the bulk densities of the heavy material is significantly smaller than that of the light material. This is an advantage if, for example, the product is to be used for producing concrete.

Tabelle 6: Veränderungen der Zusammensetzung von Plattenbaumaterial durch die Setzsartierung und erreichbares Produktausbringen
Table 6: Changes in the composition of prefabricated building material through jig sorting and the achievable product yields

	Mittel / Mean value	Min.	Max.
Gips / Gypsum [M.- / Mass%]			
Gehalt im Ausgangsmaterial / Content in starting material	2,7	1,8	5,4
Gehalt nach einmaligen Durchlauf / Content after one pass	0,8	0,6	1,7
Gehalt nach zweimaligen Durchlauf / Content after two passes	0,3	0,2	0,5
Beton / Concrete [M.- / Mass%]			
Gehalt im Ausgangsmaterial / Content in starting material	93,8	90,5	95,4
Gehalt nach einmaligem Durchlauf / Content after one pass	98,9	97,2	99,7
Gehalt nach zweimaligem Durchlauf / Content after two passes	100	100	100
Ausbringen / Yield [-]			
Nach einmaligem Durchlauf / After one pass	0,78	0,78	0,75
Nach zweimaligem Durchlauf / After two passes	0,61	0,62	0,59

4.3.3 Influence of particle size

The investigations into the influence of particle size were carried out for all fractions with particle sizes above 4 mm at the machine settings that had been determined beforehand. The settings had to be changed for sorting the 2/4 mm fraction. Depletion of the gypsum in the product as compared with the starting material was detected for all the fractions investigated (Fig. 20). This means that the 2/4 mm fraction can also be sorted with the type of jigging machine used if the machine settings are appropriately adjusted.

4.3.4 Separability of practical mixtures

With recycled building materials that had been produced mainly from demolition material from prefabricated buildings without any material separation during the demolition it was established that the gypsum particles can also be removed from these practical mixtures (Fig. 21). Large fluctuations in the effectiveness of the removal can be partly attributed to fluctuations in the quality of the input material. The practical mixtures also had significantly wider particle size distributions than the other starting materials investigated (cf. Fig. 10). This meant that a classifying process was superimposed on the jigging process because not only coarse particles of low bulk density but also fine particles with higher densities passed into the light material, resulting in comparatively low product yields.

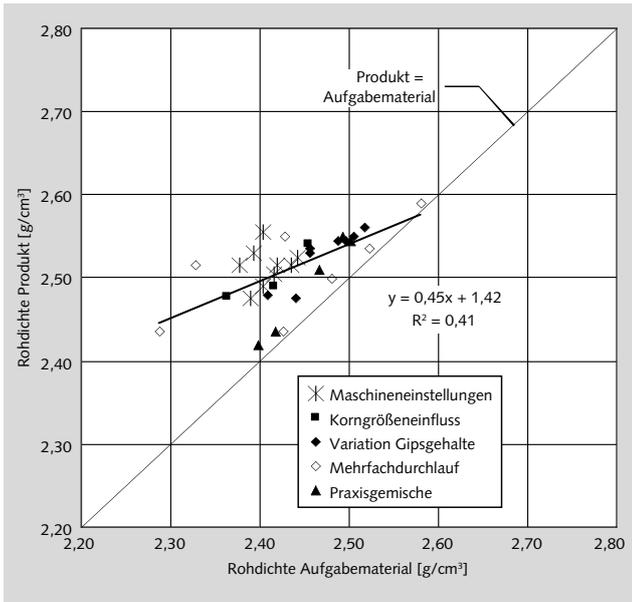
Superimposition of classification on top of the jigging process led to significant differentiation between the particle size distributions of the product and the feed material that scarcely occurred in the other investigations. The coarsening of the product relative to the feed material is shown in Fig. 22. At the same time as the change in material composition and in the particle size composition it was possible to detect an increase in the bulk density of the heavy material compared with the light material, as had already been demonstrated with mixtures with added gypsum. The average density of the light material was 2.30 g/cm³ while the average density of the heavy material was 2.52 g/cm³.

4.3.5 Summary of the results of the test series

The results of all the test series for removing gypsum with jigging machines are shown in Fig. 23 and Fig. 24. These show that a reduction of the gypsum content in the product to about one quarter was achieved in the range of 0 to 30 mass % in which the levels of gypsum in the feed material were varied. The concrete content in the product increased compared with the starting material. A content ≥ 90 mass % was achieved when the starting material contained at least 75 mass % concrete (Fig. 24).

As a secondary effect the jig sorting resulted in removal of brick particles and an increase in the bulk density of the product compared with the starting material (Fig. 25). Both effects led to an improvement in quality of the product. Coarsening of the product also occurred, which can be seen from the increase in the average particle size (Fig. 26).

The product yield, i. e. the percentage of the feed material that is discharged as heavy material, reached a maximum value of 80 % at low gypsum levels in the input (Fig. 27). The



25 Zusammenfassende Gegenüberstellung der Produktrohdichten mit den Rohdichten der Ausgangsmaterialien
Summarized comparison of the product bulk densities with the bulk densities of the starting materials

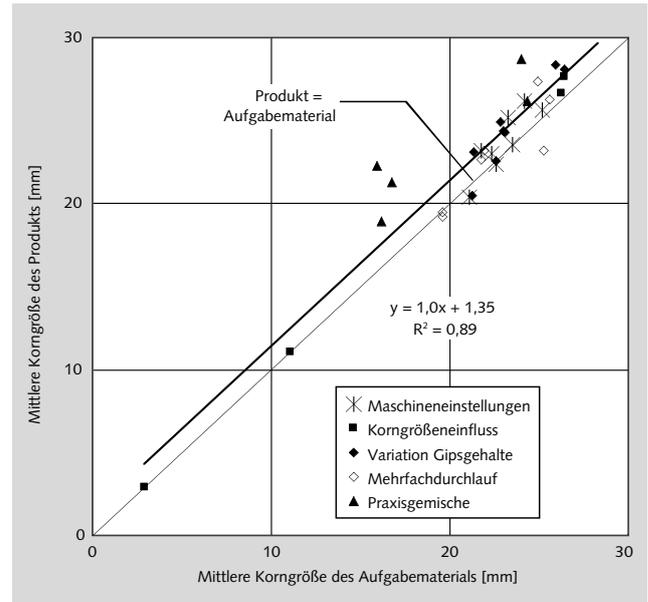
Produkt auf etwa ein Viertel erreicht werden. Der Betongehalt im Produkt nimmt gegenüber dem Ausgangsmaterial zu. Ein Gehalt von ≥ 90 Masse-% wird erreicht, wenn das Ausgangsmaterial mindestens 75 Masse-% Beton enthält (Bild 24).

Als Nebeneffekte bewirkt die Setsortierung die Abtrennung von Ziegelpartikeln und die Zunahme der Rohdichte des Produktes gegenüber dem Ausgangsmaterial (Bild 25). Beide Effekte führen zu einer Qualitätsverbesserung des Produktes. Darüber hinaus tritt eine Vergrößerung des Produktes auf, was an dem Anstieg der mittleren Korngröße abgelesen werden kann (Bild 26).

Das Produktausbringen, d. h. der Anteil des Aufgabematerials der als Schwergut ausgetragen wird, erreicht bei geringen Gipsgehalten im Input einen Maximalwert von 80 %. Es geht mit steigendem Gipsgehalt im Input zurück (Bild 27). Das Leichtgut enthält neben Gips noch andere leichte Bestandteile des Bauschutts. Dadurch geht zwar ein Teil des aufgegebenen Baustoffgemisches verloren, allerdings handelt es sich dabei um Partikel mit geringer Dichte, welche der Qualität des Produktes eher abträglich sind.

Für die Praxisgemische ergibt sich bei den Experimenten ein ungünstiges Trennverhalten, was durch deren hohe Gehalte der Fraktion 0/4 verursacht sein dürfte. Für die Anwendung des Verfahrens folgt daraus, dass zunächst unbedingt ein Aufgabematerial der Korngruppe 4/32 oder 4/45 mittels einer konventionellen Aufbereitung durch Brechen und Klassieren hergestellt werden muss, welches dann der Setzmaschine aufgegeben werden kann.

Anhand der zusammengefassten Ergebnisse kann gefolgert werden, welche Qualitätsverbesserungen des Plattenbaumaterials erwartet werden können, wenn dieses einen



26 Zusammenfassende Gegenüberstellung der mittleren Korngrößen der Produkte mit den mittleren Korngrößen der Ausgangsmaterialien
Summarized comparison of the average particle size of the product with the average particle size of the starting material

light material contained other lightweight constituents of the building rubble in addition to gypsum. This did in fact mean the loss of part of the feed of mixed building materials but it involved particles of low density that tend to have a negative effect on the quality of the product.

An unfavourable separating behaviour was obtained in the experiments with the practical mixture, which may have been caused by the high content of the 0/4 fraction. For application of the process it therefore follows that it is essential first to produce a feed material in the size range 4/32 or 4/45 by conventional processing using crushing and screening, and then to feed it to the jiggging machine.

From the combined results it is possible to deduce the quality improvements that can be expected with prefabricated building materials when they pass through a jiggging process. Starting from the levels of gypsum and concrete given in Table 2 for the prefabricated building material the levels that can be achieved with one and two passes through the jiggging machine have been calculated with the aid of the given regression relationships (Table 6).

With medium and high levels of gypsum in the input two passes through the jiggging machine are needed to comply with the requirements specified in DIN 4226-100. This can be achieved either by intermediate stockpiling of the material and feeding it through the machine again or by two jiggging machines connected in series. Even after a single pass the concrete content reached values close to 100 %. The product yield was 80 % for a single pass of the material through the jiggging machine.

A significant reduction in the gypsum content of the processed crushed concrete can therefore be achieved by jig sort-

Setzprozess durchläuft. Ausgehend von den, in Tabelle 2 angegebenen Gehalten an Gips und Beton in Plattenbaumaterial werden die erreichbaren Gehalte bei einmaligem bzw. zweimaligem Durchlauf durch die Setzmaschine mit Hilfe der angegebenen Regressionsbeziehungen berechnet (Tabelle 6). Um bei mittleren und hohen Gipsgehalten im Input die Anforderungen nach DIN 4226–100 einzuhalten, ist ein zweimaliger Durchlauf durch die Setzmaschine erforderlich. Letzteres kann entweder durch Zwischenaufhaltung und nochmalige Aufgabe oder durch zwei nacheinander geschaltete Setzmaschinen realisiert werden. Der Betongehalt erreicht bereits nach einmaligem Durchlauf Werte nahe 100 %. Das Produktausbringen beträgt 80 % bei einmaligem Durchlauf des Materials durch die Setzmaschine.

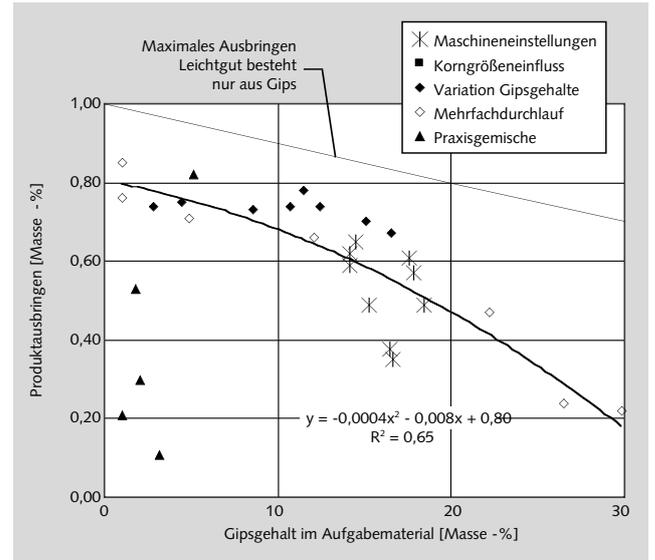
Durch die Setzsartierung ist also eine deutliche Absenkung des Gipsgehaltes des aufbereiteten Betonbruchs möglich, so dass die bautechnischen Anforderungen auch bei gipshaltigem Inputmaterial erfüllbar werden. Eine der Ursachen für Treibreaktionen infolge sekundärer Ettringitbildung, die in ungebundenen Tragschichten festgestellt wurden, wird damit eliminiert. Durch die zusätzlichen Effekte der Setzsartierung – insbesondere die Zunahme der Rohdichte und die Abnahme des Gehaltes an feinen Bestandteilen – scheint das erzeugte Schwergut prädestiniert für den anschließenden Einsatz als grobe rezyklierte Gesteinskörnung für die Betonherstellung zu sein.

5 Fazit

Eine Möglichkeit der Abtrennung von Gipspartikeln besteht darin, die durch Zerkleinerung und Siebung erzeugten Recyclingkörnungen in einer Setzmaschine zu behandeln. In den experimentellen Untersuchungen, die mit der Setzmaschine Triple A durchgeführt wurden, konnte nachgewiesen werden, dass damit der Gipsgehalt im Produkt deutlich gegenüber dem im Aufgabematerial verringert werden kann. Betonabbruch aus Plattenbauten, welcher herkunftsabhängig hohe Gipsgehalte aufweisen kann, kann so von Gipspartikeln befreit und damit einsatzfähig gemacht werden.

Danksagung

Die vorgestellten Ergebnisse wurden im Rahmen eines von der AiF geförderten Pro Inno II-Projektes (KF 0497501KF7) erarbeitet. Als Industriepartner waren daran die Firma AGS Anlagen und Verfahren GmbH Selent und die SWE Stadtwirtschaft GmbH Erfurt beteiligt. Forschungspartner waren das Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e.V. und die Bauhaus-Universität Weimar, Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung.



27 Zusammenfassende Darstellung des Produktausbringens in Abhängigkeit von den Gipsgehalten der Ausgangsmaterialien
Summarized representation of the product yield as a function of the levels of gypsum in the starting materials

ing, with the result that the construction engineering requirements can be fulfilled even with input material that contains gypsum. This eliminates one of the causes of expansion reactions due to secondary ettringite formation, which has been detected in unbound base courses. The additional effects of jig sorting – especially the increase in bulk density and the decrease in the content of fine constituents – means that the heavy material generated is ideal for subsequent use as coarse recycled aggregate for producing concrete.

5 Conclusion

One possible way of removing gypsum particles is to use a jiggging machine to process the recycled particulate material produced by comminution and screening. In the experimental investigations carried out with the Triple A jiggging machine it was shown that the gypsum content in the product can be reduced significantly when compared with the feed material. Concrete from the demolition of prefabricated buildings, which, depending on its origin, may contain high levels of gypsum, can be freed from gypsum particles in this way and made useable.

Acknowledgements

The results described here were obtained as part of the Pro Inno II project (KF 0497501KF7) sponsored by the AiF (Federation of Industrial Research Associations). AGS Anlagen und Verfahren GmbH Selent and SWE Stadtwirtschaft GmbH Erfurt were involved as industrial partners. The research partners were the Institut für Fertigteiletechnik und Fertigbau Weimar e.V. and the Bauhaus University Weimar, faculty of Building Materials Processing and Re-use.