

BauCycle – Verwertungsstrategie für feinkörnigen Bauschutt

Sebastian Dittrich
Volker Thome
Jochen Nühlen
Robin Gruna
Joseph Dörmann

*Univ.-Prof. (em.) Dr.-Ing. habil. Dr. h.c. mult. Dr. E.h. mult. Karl Gertis
zum 80. Geburtstag gewidmet*



BauCycle – Verwertungsstrategie für feinkörnigen Bauschutt

Das Fraunhofer-interne Projekt „BauCycle“ entwickelt eine ganzheitliche Verwertungsstrategie für feinkörnigen Bauschutt, welcher bisher meist ungenutzt auf Deponien verbracht wird. In einem ersten Schritt wurde eine Methodik zur „chemischen“ Sortierung von Bauschutt kleiner 2 mm entwickelt um Störstoffe wie Gips selektiv aus Beton oder Kalksandstein austragen zu können. Basierend auf den Sortiermöglichkeiten fand die Entwicklung von Bauprodukten mit einem signifikanten Anteil an Bauschutt statt. Es konnte ein Porenbetonstein hergestellt werden bei dem der Primärrohstoff Sand zu 30 Ma.-Prozent durch feinkörniges Bauschuttmaterial ersetzt werden konnte. Zudem wurde ein Akustikputz für Innenanwendungen entwickelt, welcher absolut vergleichbar zu marktüblichen Produkten ist. Neben der Entwicklung neuer Produkte steht auch die Betrachtung geltender Richtlinien im Hinblick auf den Einsatz von neuentwickelten Baustoffen sowie deren ökologische Wirkung im Fokus. Dazu wurden relevante Indikatoren wie Rohstoffqualität und -verfügbarkeit definiert und für eine Modellregion dargestellt. Dies geschah nicht zuletzt unter Berücksichtigung logistischer Parameter. Der finale Schritt im Projekt ist die Implementierung einer Handelsplattform über welche Bauschuttfraktionen bedarfsgerecht angeboten bzw. nachgefragt werden können.

Stichworte: Bauschuttrecycling, Sortierung, Materialentwicklung, feinkörniger Bauschutt

1 Hintergrund

Seit Jahren verzeichnet die deutsche Bauwirtschaft steigende Auftragszahlen. Vor allem der Wohnungsbau in Städten trägt maßgeblich zum aktuellen Bauboom bei. Dabei werden allein in Deutschland pro Jahr 549 Millionen Tonnen an mineralischen Rohstoffen verwendet [1]. Für die jährliche Produktion von rund 50 Millionen m³ Transportbeton werden etwa 32 Millionen Tonnen Sand benötigt [2]. Allein der Bau von 1 Kilometer Autobahn benötigt 30.000 Tonnen Sand. Zwar besitzt Deutschland noch komfortable Vorkommen an Sand, jedoch liegt der weltweite Verbrauch an Sand mit ca. 40 Milliarden Tonnen circa doppelt so hoch wie die Menge an natürlich nachgeliefertem Sand [5]. Ein nachhaltiges Wachstum der Bauindustrie kann auf Dauer daher nur gelingen, wenn Recyclingkonzepte bereitstehen, die natürliche Rohstoffvorkommen schonen und alternative Rohstoffquellen für die Bauindustrie nutzbar machen. Das oft diskutierte „Urban Mining“ wäre für die Bauwirtschaft ein möglicher Ansatz hin zum

BauCycle – a holistic approach to reuse fine construction and demolition waste

The goal of the Fraunhofer-internal research project „BauCycle“ is to develop a holistic approach for the reuse of fine construction and demolition waste (C&DW). In a first step a procedure was implemented to enable a selective separation of C&DW according to the chemical composition of the individual particles. For instance this enables to separate gypsum from the bulk material. Based on the possibilities of separation several products for the building sector were developed. For autoclaved aerated concrete (AAC) we achieved a replacement of 30 wt.-percent of the primary sand by C&DW material. Furthermore, a sound absorbing plaster was developed possessing the same functional properties than commercially available products. Besides the development of new building products the usage of C&DW as a raw material according to applicable regulations and its ecological effectiveness was considered. Parameters like “quality of raw materials” and “availability of raw materials” were predefined and depicted for a model region in Germany. Also logistics were included in this simulation. As a final step a marketing platform is planned to enable a tailor-made trade of C&DW according to a costumers need.

Keywords: Recycling of construction & demolition waste, sorting of fine material, material development

nachhaltigen Umgang mit Rohstoffen. Der aktuelle Bestand an Gebäuden und Infrastruktur in Deutschland stellt mit 28 Milliarden Tonnen verbauten Materials ein enormes anthropogenes Rohstofflager dar [4]. Jährlich werden ca. 54 Millionen Tonnen Bauabbruch generiert und zum Großteil technisch wenig anspruchsvollen Anwendungen insbesondere im Straßen- oder Deponiebau zugeführt. Selbst grobes Material (größer 2 mm) wird selten zur Herstellung hochwertiger Betonwaren genutzt, da das Material fast vollständig als Schotter im Straßenbau eingesetzt wird. Da die neue Ersatzbaustoffverordnung [3] deutlich schärfere Auflagen für den Einbau von Recyclingmaterial enthält als bislang gültige Verordnungen, sind die Mengen von Recyclingschotter im Straßenbau jedoch rückläufig. Der Anteil von feinkörnigem Bauschutt kleiner 2 mm macht jährlich eine Menge von ca. 5 Millionen Tonnen aus (Bild 1) und wird aufgrund seiner inhomogenen Zusammensetzung fast ausnahmslos auf Bauschuttdeponien entsorgt. Auf diese Weise trägt das Material zusätzlich zur Verknappung von Deponiekapazitäten bei. Aus den ge-

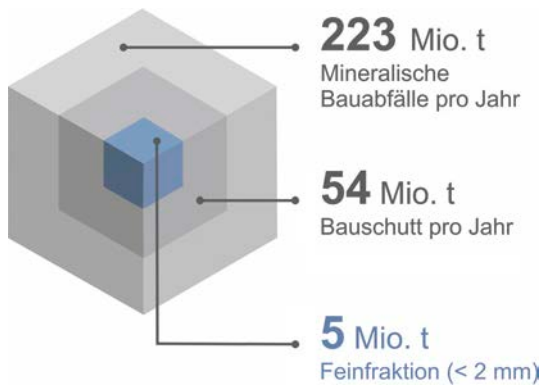


Bild 1. Bauabbruchaufkommen 2016 in Deutschland
Fig. 1. Amount of construction waste in Germany in 2016

nannten Gründen ist es umso wichtiger, nachhaltige Verwertungsansätze zu entwickeln, durch welche Bauschutt als Rohstoff in der Herstellung hochwertiger Bauprodukte Verwendung finden kann.

2 Projektansatz

Dieses Ziel verfolgt das interne Projekt „BauCycle“ der Fraunhofer-Gesellschaft, in dem vier Institute ihre Kompetenzen bündeln und gemeinsam eine nachhaltige Nutzung von feinkörnigem Bauschutt erarbeiten. Das Projekt soll eine ganzheitlich technologische und logistische Lösung für die Kreislaufwirtschaft im Bauwesen entwickeln. Es lässt sich in die vier folgenden Säulen aufteilen: „Aufbereitung“, „Herstellung“, „Analyse“ und „Vertrieb“. Neben den Fraunhofer-Instituten für Materialfluss und Logistik (IML), für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung (IOSB) und für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik (UMSICHT) ist das Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP maßgeblich für die Entwicklung neuer Bauprodukte verantwortlich.

3 Ergebnisse

In vorliegendem Artikel werden die bisherigen Ergebnisse des Projektes vorgestellt, wobei der Fokus auf die Entwicklung von Baustoffen aus feinkörnigem Bauschutt liegt.

3.1 Aufbereitung

Um die Entwicklung von Verfahren zur Aufbereitung, insbesondere der Sortierung des Bauschutts zielorientiert ge-

stalten zu können, wurden die ersten Versuche zunächst an „idealem“ Bauschutt durchgeführt. Dieser Bauschutt konnte im Labor durch Mischen von Einzelkomponenten (Gips, Ziegel, Beton und Kalksandstein) in verschiedener Zusammensetzung hergestellt werden. Im weiteren Verlauf des Projektes erfolgte eine Verifizierung der vielversprechendsten Verfahren mit realem Bauschutt. Der reale Bauschutt wurde direkt von Abbruchbaustellen sowie von Aufbereitungsanlagen bezogen. Die Datenlage zur mittleren Zusammensetzung für Bauschutt konnte dahingehend verbessert werden, als dass Analyseprotokolle aus der Fremdüberwachung einer Aufbereitungsanlage über einen Zeitraum von drei Jahren ausgewertet und in die Betrachtungen während des Projektes einbezogen wurden.

Erste Vorversuche verdeutlichten sehr schnell, dass eine Sortierung von Körnern kleiner 1 mm in den gegebenen Projektgrenzen (Zeit, Budget, Personal) technisch nicht ohne erheblichen Aufwand zu lösen ist. Auch erscheint eine großtechnische Umsetzung für die Sortierung von Material kleiner 1 mm nicht wirtschaftlich realisierbar. Daher wurde der zu sortierende Bauschutt auf ein Kornband von 1 bis 2 mm eingegrenzt. Im ersten Ansatz fanden verschiedene Kamerasysteme für die optische Erfassung der einzelnen Bauschutfractionen Verwendung. Mit Farbkameras können Partikel aufgrund von Farbe oder Kornform voneinander unterschieden werden. Auf diese Weise kann die Fraktion „Ziegel“ anhand der rötlichen Färbung selektiv erfasst und vom restlichen Stoffstrom unterschieden werden (Bild 2).

Eine zuverlässige Unterscheidung der Materialien Gips, Beton und Kalksandstein scheint aufgrund deren ähnlicher Farbe nur mittels Reflektanzspektren, welche im SWIR-Spektralbereich (short wave infrared) aufgenommen werden, möglich. Die Auswertung dieser Reflektanzspektren erfolgt mittels Hauptkomponenten-Analyse (PCA, Principal Component Analysis) und liefert eine lineare und niedrigdimensionale Projektion der Daten. Zur Visualisierung werden die ersten beiden Hauptkomponenten, welche den höchsten Informationsgehalt aufweisen, in einem sogenannten Score-Plot dargestellt. Aus den Analysen bestätigt sich, dass die relevanten Bauschutfractionen geballt und abgegrenzt voneinander vorliegen und somit unterscheidbar sind (Bild 3). Dies ist eine wichtige Voraussetzung für die technische Umsetzung des Sortiervorhabens auf Basis einer Optical-Computing-Methode. Eine Analyse der Versuchsdaten legte nahe, dass eine optische Materialerkennung bereits durch eine Bildaufnahme in zwei Spektralkanälen (beispielsweise mittels zweier spek-

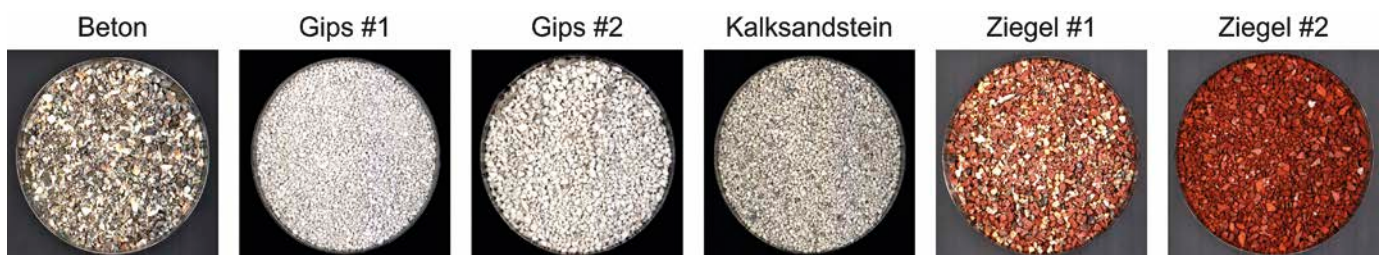


Bild 2. Auflichtaufnahmen verschiedener Bauschutfractionen, aufgenommen mit einer Farbkamera, die jeweiligen Fraktionen wurden zur Bildaufnahme in Glaspetrischalen mit einem Durchmesser von 10 cm gefüllt
Fig. 2. Different samples of construction waste, for taking the pictures the samples were put into glass petri dishes with a diameter of 10 cm

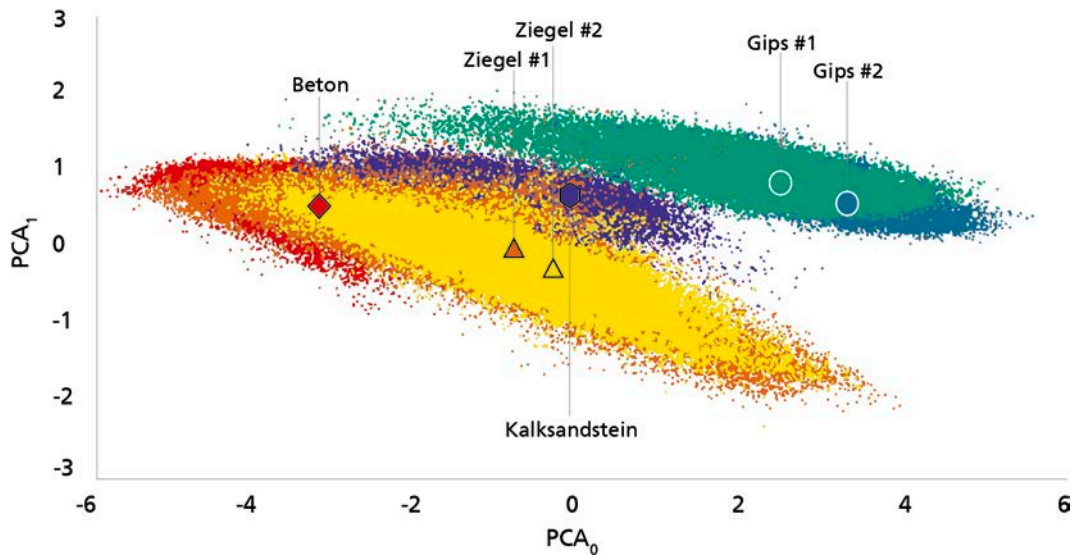


Bild 3. Score Plot aus der PCA-Analyse für die Bauschuttfraktionen Beton, Gips, Kalksandstein und Ziegel. Die Symbole geben den jeweiligen Bereich mit der höchsten Datenpunktdichte des jeweiligen Materials an.

Fig. 3. Score plot from the corresponding PCA analysis for the samples concrete, gypsum, sand-lime brick and clay brick. The symbols account for the spot with the highest density of data points for the given material.

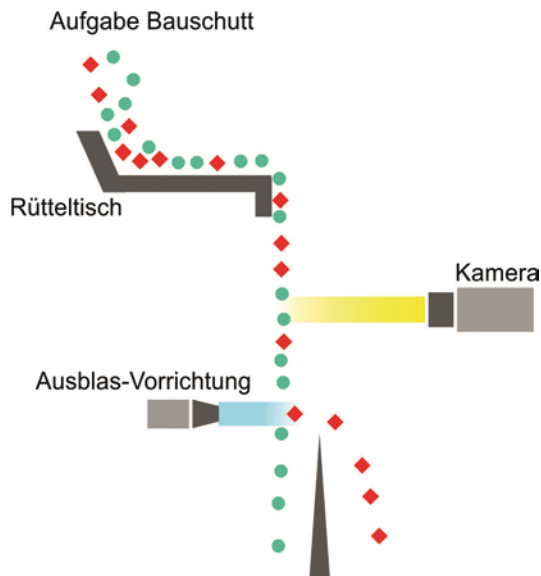


Bild 4. Versuchsaufbau zur Freifall-Sortierung mit Zeilenkamera.

Fig. 4. Experimental setup for the free fall sorting using a line scan camera

traler Bandpassfilter) zufriedenstellend gelöst werden kann. Die einzelnen Bauschuttbestandteile können somit mittels angepasster Bandfilter selektiv erfasst werden. Um eine fehlerfreie Erfassung der Partikel zu ermöglichen, sollte der Bauschutt idealerweise in einer Einzellschicht („Monolayer“) an der Kamera vorbeigeführt werden. Von den bisher getesteten Aufbauten erwies sich der Materialtransport per „freiem Fall“ am besten geeignet (Bild 4). Durch einen Rütteltisch wird der zu sortierende Bauschutt vorvereinzelnt. An der Abwurfkante des Rütteltisches fallen die Objekte senkrecht in einen Fallschacht entlang der Falllinie und werden dabei durch die Erdgravitation beschleunigt und weiter vereinzelnt. In einem frei wählbaren Abstand zur Abwurfposition wird dann das Material von

der waagrecht ausgerichteten Zeilenkamera (Farbe oder bispektral) aufgenommen und von darunter angebrachten Druckluftdüsen ausgeblasen. Der Aufbau zur Sortierung im Labormaßstab ist bereits realisiert, eine Technikumsanlage befindet sich derzeit im Aufbau.

3.2 Herstellung

Im Rahmen der Produktentwicklung wurden bisher drei Produkte entwickelt: ein Porenbetonmauerstein, ein Akustikputz und ein zementfreies Bindemittel auf Basis von alkalisch aktiviertem Aluminosilikaten. Von den drei Produkten sind hier die zwei Produkte näher beschrieben, die in der Entwicklung schon so weit fortgeschritten sind, dass eine Markteinführung innerhalb kurzer Zeit denkbar erscheint.

3.2.1 Porenbeton

Im Rahmen einer projektbegleitenden Masterarbeit am IBP [6] konnte ein Porenbetonmauerstein entwickelt werden, in dem der Primärrohstoff Sand zu einem Anteil von bis zu 30 Prozent durch neun verschiedene Bauschuttmischungen ersetzt werden konnte. Bei dem Ersatzmaterial handelte es sich entweder um synthetischen Kalksandstein, Beton mit quarzitischer (BQz) bzw. kalzitische (BCc) Gesteinskörnung oder um Mischungen aus diesen Komponenten in unterschiedlichen Verhältnissen (Bild 5). Um die Auswirkungen des Ersatzmaterials auf die Eigenschaften des Porenbetons zu untersuchen, wurden einaxiale Druckversuche nach DIN EN 772-1 durchgeführt und die chemische als auch die mineralogische Zusammensetzung der hergestellten Porenbetonsteine bestimmt. Nach der Herstellung der Betone BQz und BCc und einer Lagerung von 28 Tagen wurden diese, ebenso wie der handelsübliche Kalksandstein, separat mit einem Hammer vorzerkleinert, in einem Backenbrecher gebrochen und im Anschluss mit einem Siebschnitt von 1 mm gesiebt. An-

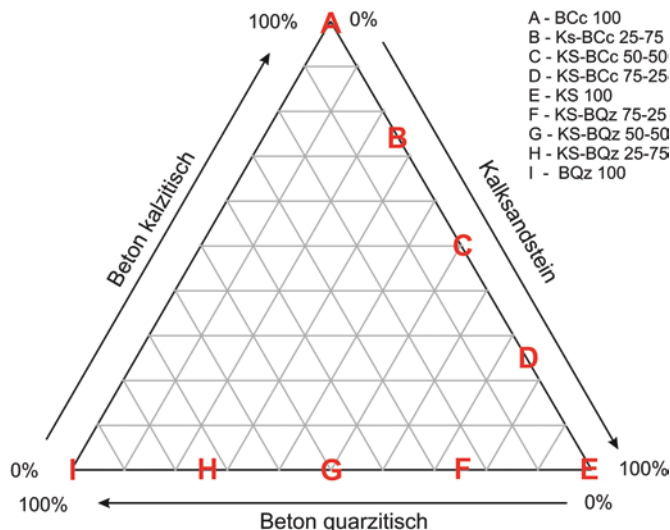


Bild 5. Zusammensetzung der neun verschiedenen Bauschuttmischungen als Ersatzrohstoff für die Herstellung von Porenbeton

Fig. 5. Composition of the nine different construction waste samples being used as a substitute for primary raw material for the production of autoclave aerated concrete (AAC)

schließlich erfolgte mit dem Material die Herstellung der neun Mischungen gemäß Bild 5.

In Abhängigkeit von Druckfestigkeitsklasse und Rohdichte wurden Mischrezepturen für die Porenbetonproduktion verwendet wobei für alle Rezepturen die handelsübliche Druckfestigkeitsklasse P4 mit einer Rohdichteklasse 0,55 angestrebt war. Während bei der Referenzprobe 44 Ma.-Prozent Sand aus primärer Rohstoffquelle verwendet wurde, konnte bei den Proben mit Ersatzmaterial 30 Ma.-Prozent des primären Sandes durch die unterschiedlichen Bauschuttmischungen ersetzt werden.

Bereits der Mischvorgang entscheidet über die Qualität des resultierenden Steines. Zunächst wurden Quarzmehl, Porenbetonsplitt und die Ersatzfraktion dem Wasser zugegeben und eine Minute lang vermischt. Im Anschluss erfolgte die Zugabe von Zement, Kalk und Anhydrit während des Mischvorgangs, bevor auch die Alususpension in den Mischer gegeben wurde. Unmittelbar nach Beendi-



Bild 6. Satteldampfautoklav am Fraunhofer IBP mit etwa 3 m³ Fassungsvermögen

Fig. 6. Steam autoclave in the laboratory of the Fraunhofer institute for Building Physics with a capacity of approximately 3 m³

gung des Mischvorgangs musste die fließfähige Masse in eine Styroporform (25 × 25 × 31 cm) gegossen werden um einen möglichst homogenen Schäumungsprozess in der gewünschten Schalungsform zu erreichen. Nach dem Schäumungsprozess und dem Erreichen des „Grünzustands“ wurden die Probekörper in einem Autoklaven (Bild 6) bei p = 12 bar und T = 190 °C sechs Stunden lang hydrothermal behandelt und ausgehärtet. Nach der Aushärtung fand die Untersuchung der Proben auf ihren mineralogischen Phasenbestand und die mechanischen Eigenschaften statt.

Phasenanalyse

Die gesamte mineralogische Zusammensetzung der hergestellten Porenbetonproben wurde mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) ermittelt; sie ist in Tabelle 1 dargestellt. Das vorherrschende Mineral in allen Proben ist Tobermorit, welches maßgeblich für die Festigkeit des Porenbetonsteines verantwortlich ist. Daneben treten die Mineralphasen Quarz und Hydroxyllestadit auf. Beide Minerale ge-

Tabelle 1. Zusammenfassung der unter Berücksichtigung der amorphen Phasen normierten Mineralphasenanteile

Table 1. Mineralogical phase composition for the different samples taking the amorphous phase content into account

	Tobermorit	Quarz	Hydroxyllestadit	Calcit	Vaterit	Anhydrit	Bassanit	Hydrogranat	Amorpher Anteil
PB Referenz	56,7	20,1	4,5	2,9	1,8	3,4	1,9	0,8	8,0
PB KS 100	52,0	14,4	6,3	6,1	2,0	2,8	1,6	0,8	14,0
PB BQz 100	55,1	15,2	10,6	3,8	2,2	3,3	1,1	0,8	7,8
PB BCc 100	47,6	11,4	11,1	9,4	2,9	2,0	0,9	1,1	13,6
PB KS-BQz 75-25	54,7	14,8	8,3	3,9	2,3	3,0	1,8	0,8	10,5
PB KS-BQz 50-50	56,4	16,9	7,8	4,1	4,5	3,6	1,9	1,0	3,8
PB KS-BQz 25-75	53,8	15,6	9,5	3,8	2,8	3,0	1,5	1,0	9,0
PB KS-BCc 75-25	48,7	15,9	14,5	4,3	1,6	1,4	1,2	1,2	11,2
PB KS-BCc 50-50	45,6	12,9	15,4	5,0	2,4	1,2	1,0	1,4	15,1
PB KS-BCc 25-75	48,6	16,1	15,5	6,3	1,6	0,9	1,0	1,2	8,8

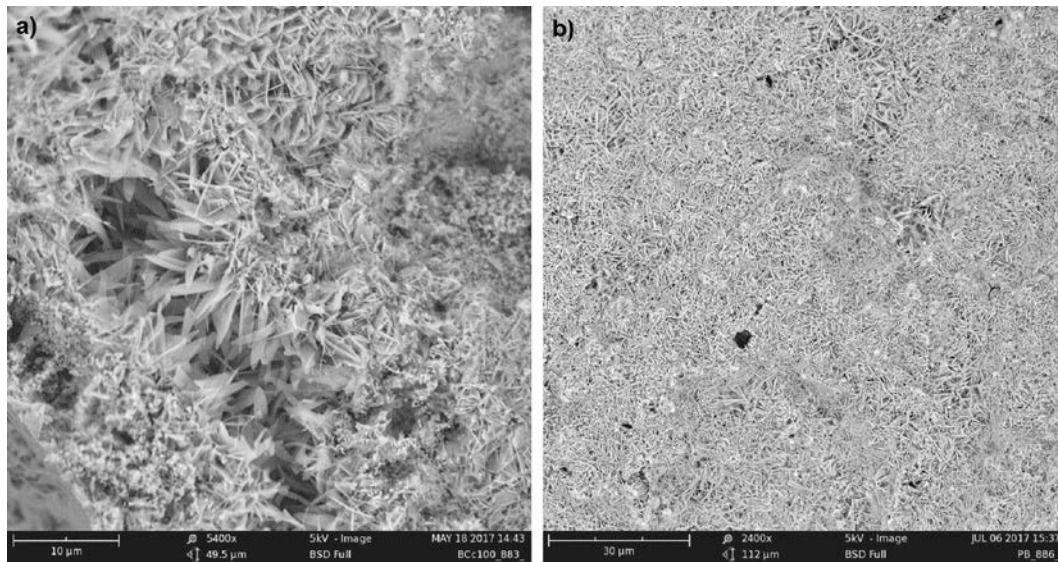


Bild 7. Stark verzahnte, ineinander verwachsene Tobermoritplättchen
 Fig. 7. Clearly teathed and intergrown pads of tobermorite crystals

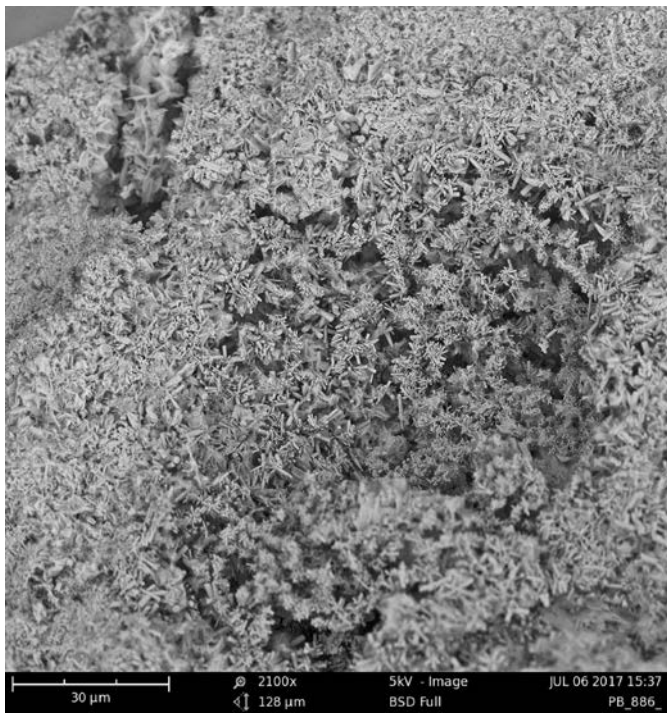


Bild 8. Hydroxylestaditkristalle in einem löchrig und schwammartig erscheinenden Bereich auf einem Porensteg
 Fig. 8. Crystals of hydroxylestadite grown within a spongy area of a rack between pores

ben Aufschluss darüber, dass die Herstellungsparameter noch nicht optimal getroffen wurden. Hydroxylestadit ist ein Zwischenprodukt der Reaktion, bei der sich während dem Autoklavieren Tobermorit bildet. Dabei bleibt das Mineral Hydroxylestadit erhalten, wenn keine reaktive Kieselsäure mehr als Reaktionspartner zu Verfügung steht. Die Kieselsäure entsteht normalerweise während der Autoklavierung aus den zugemischten Quarzanteilen. Sind diese jedoch zu grobkörnig oder sind die Bedingungen des Autoklavierprozesses nicht optimal an die Rezeptur angepasst, werden die Quarzkörner nicht vollständig aufgelöst,

und es steht zu wenig reaktive Kieselsäure zu Verfügung. Neben diesen Phasen finden sich übliche Nebenphasen wie Calcit, Vaterit, Anhydrit, Bassanit und Hydrogranat.

Von der festigkeitsbestimmenden Phase Tobermorit weist die Referenzprobe mit 56,7 Ma.-Prozent den höchsten Gehalt auf. Alle Proben mit BQz-Bestandteilen liegen mit 54 bis 56 Ma.-Prozent knapp unter der Referenzprobe, gefolgt von PB KS 100 mit 52 Ma.-Prozent. Die Proben mit BCc-Bestandteilen erreichen die geringsten Werte von 46 bis 49 Ma.-Prozent.

Zusätzlich zu den XRD-Analysen wurden Aufnahmen der Mikrostruktur mittels Rasterelektronenmikroskop (REM) angefertigt. Die Poren und die Verbindungstege bestehen hauptsächlich aus Tobermorit, der meist in Form spitztafeliger, ineinander verzahnter Kristalle ausgebildet vorliegt (Bild 7a). Die einzelnen Kristalle bilden ein großflächiges, dicht verwachsenes Gefüge aus (Bild 7b).

Hydroxylestadit bildet langstängelige, prismenförmige Kristalle mit hexagonalem Querschnitt aus, die in löchrig und schwammartig erscheinenden Bereichen der Porenstege auftreten. Bild 8 zeigt einen solchen Bereich mit strahlenförmig verwachsenen Hydroxylestaditkristallen. Diese können ohne direkten Kontakt zu anderen Mineralen erscheinen, aber auch mit Tobermorit oder Anhydrit verwachsen sein (Bild 9).

Quarzkörner lassen sich mit unterschiedlichen Größen und unterschiedlich stark ausgeprägten Auflösungserscheinungen finden. Bild 10 zeigt ein Quarzkorn, das von Tobermoritkristallen umgeben ist. Im linken unteren Bereich haben sich Teile vom Quarzkorn abgetrennt, was in Folge einer mechanischen Einwirkung oder durch die Auflösung des Kornes entstanden sein kann. An den freien Stellen zwischen den Quarzabtrennungen sind Tobermoritkristalle gewachsen. Zudem sind auf der Oberfläche des Quarzkorns Ätzgruben als Hinweis auf ablaufende Lösungsreaktionen zu erkennen (Bild 11).

Mechanische Eigenschaften

Tabelle 2 zeigt die Mittelwerte aus mehreren Messungen für die einzelnen Porenbetonproben. Die Trockenrohichte

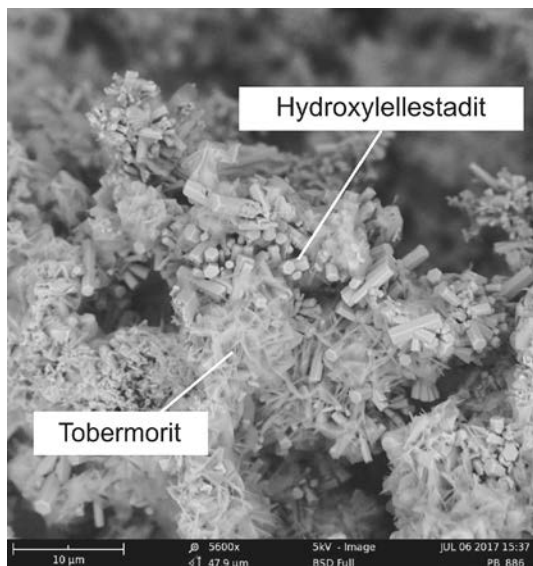


Bild 9. Mit Tobermorit verwachsene Hydroxylellestaditkristalle

Fig. 9. Crystals of hydroxylellestadite intergrown with crystals of tobermorite

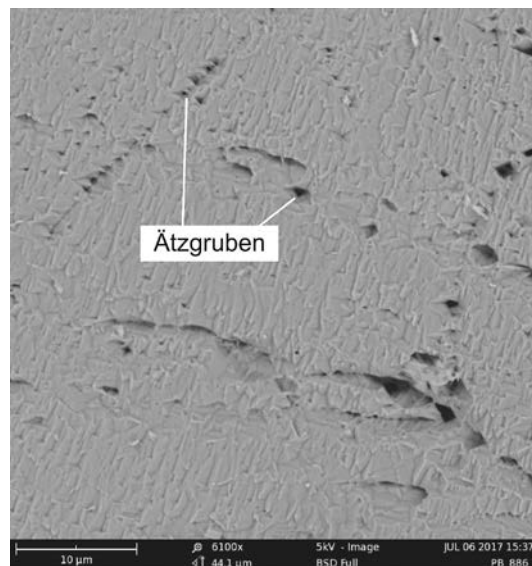


Bild 11. Oberflächenstruktur eines Quarzkornes mit Ätzgruben

Fig. 11. Surface structure of a quartz particle with clearly visible etch pits

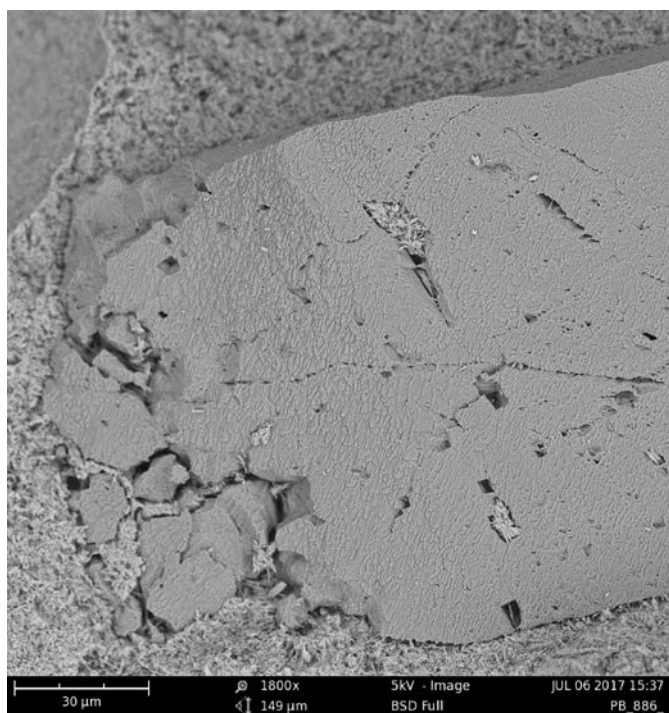


Bild 10. Von Tobermoritkristallen umgebenes Quarzkorn mit Ätzgruben auf der Kornoberfläche

Fig. 10. Quartz particle with etch pits on its surface, embedded by crystals of tobermorite

der Referenzprobe liegt mit 556 kg/m^3 etwas höher als die Trockenrohddichten der Proben mit Ersatzmaterial, die sich im Bereich 520 bis 539 kg/m^3 befinden. Betrachtet man zunächst die Proben mit den reinen Ersatzstoffen KS, BQz und BCc, so weist die Probe mit Kalksandstein die höchste Druckfestigkeit auf, gefolgt von der Probe mit quarzitischem Beton und kalzitischem Beton. Zieht man nun die Proben mit den gemischten Ersatzstoffen hinzu, fällt auf, dass die Proben mit KS-BQz-Mischungen erheblich höhere

Druckfestigkeiten besitzen als die Proben mit KS-BCc-Mischungen, die mit Werten von $3,5$ bis $3,8 \text{ N/mm}^2$ insgesamt am schlechtesten abschneiden. Dagegen erreichen die Proben mit den KS-BQz-Mischungen Werte von $4,6$ bis $4,9 \text{ N/mm}^2$ und liegen damit nah am Druckfestigkeitswert der PB Referenz ($5,2 \text{ N/mm}^2$). Um die Korrelation von Druckfestigkeit und Rohdichte für die einzelnen Proben zu ermitteln, wurde die dimensionslose A-Zahl ermittelt. Diese branchenübliche Kenngröße korreliert die Rohdichte mit der Druckfestigkeit. Die Proben in Tabelle 1 sind nach sinkenden Werten für die A-Zahl sortiert.

Wie Tabelle 2 entnommen werden kann, folgt die A-Zahl dem Trend, dass die Porenbetonsteine mit KS-BQz-Mischungen höhere Werte erreichen als Steine, die mit Mischungen aus KS-BCc hergestellt wurden. Generell liefern Proben, die mit einer Bauschuttmischung aus Kalksandstein (KS) und Beton mit Kieszuschlag (BQz) hergestellt wurden, vergleichbare Werte für die A-Zahl wie die aus Primärrohstoffen hergestellten Referenzproben. Nach weiteren Optimierungsschritten im Projekt soll für die vielversprechendsten Porenbetone noch die Wärmeleitfähigkeit ermittelt werden.

3.2.2 Akustikputz

Neben den Porenbetonsteinen ist ein Akustikputz für die Innenanwendung mit schallabsorbierenden Eigenschaften das zweite, in diesem Beitrag vorgestellte Produkt. Zunächst wurden Putzrezepturen aus geschäumten Zementpartikeln auf Basis der idealen Bauschuttproben erstellt. Im Folgenden fanden Untersuchungen im Hinblick auf die bauphysikalischen Eigenschaften statt um die neuentwickelten Putze gegenüber marktverfügbaren, primärrohstoffbasierten Bauprodukten einordnen zu können. Die im ersten Schritt positiv charakterisierten Putzproben wurden im Anschluss mit realem Bauschutt erneut hergestellt, auf Mineralfaserplatten appliziert und insbesondere im Hinblick auf ihre schallabsorbierenden Eigenschaften konkre-

Tabelle 2. Materialeigenschaften der hergestellten Porenbetone.
Table 2. Properties of the produced AAC samples.

Probe*	Trockenroh- dichte [kg/m ³]	Druckfestig- keit [N/mm ²]	A-Zahl	Probe*	Trockenroh- dichte [kg/m ³]	Druckfestig- keit [N/mm ²]	A-Zahl
PB Referenz	556	5,2	1069	PB BQz 100	526	4,3	979
PB KS-BQz 75-25	538	4,9	1061	PB BCc 100	522	3,8	863
PB KS-BQz 50-50	538	4,7	1018	PB KS-BCc 50-50	525	3,8	861
PB KS-BQz 25-75	533	4,6	1016	PB KS-BCc 25-75	520	3,5	826
PB KS 100	539	4,6	991	PB KS-BCc 75-25	524	3,5	802

*PB = Porenbeton, KS = Kalksandstein, BQz = Beton mit Kieszuschlag, BCc = Beton mit Kalksteinzuschlag

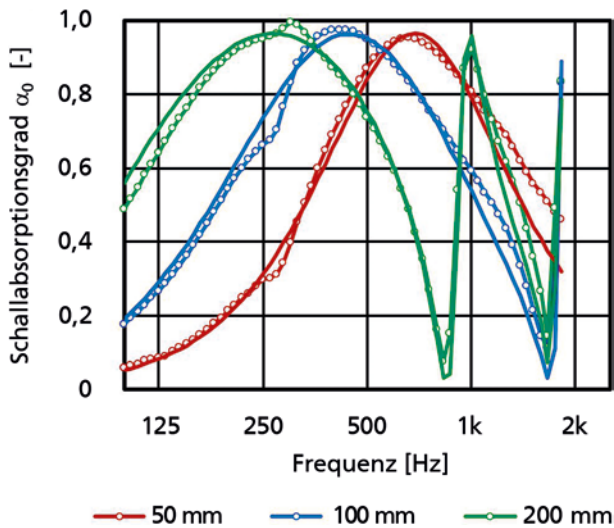


Bild 12. Gemessene (○) und berechnete (–) Schallabsorptionsgrade bei senkrechtem Schalleinfall einer ca. 6,8 mm dicken Putzschicht vor unterschiedlich dicken Luftschichten
Fig. 12. Measured (○) and simulated (–) sound absorption coefficients at normal sound incidence on a plaster with 6,8 mm thickness at varied thickness of backing air layer

ter untersucht. Bei der Wahl der Mineralfaserplatte wurde darauf geachtet, dass diese ein ähnliches Saugverhalten gegenüber dem frisch aufgetragenen Putz zeigt, wie eine sich derzeit in Entwicklung befindliche, bauschutthaltige Platte.

Für die akustische Charakterisierung der Platten erfolgten die Vermessung der Putze im Impedanzrohr bei senkrechtem Schalleinfall und ein anschließender Vergleich mit zwei marktüblichen Produkten. Für die Messung wurden die Putzschichten nach dem Aushärten jeweils von den Mineralfaserplatten gelöst und separat vor unterschiedlichen Luftschichten eingebaut. Die in Bild 12 gezeigten Schallabsorptionskurven verdeutlichen, dass die rückseitigen Luftschichten jeweils voll wirksam sind und der neu entwickelte Putz ausreichende Durchlässigkeit besitzt. Anhand dieser Spektren konnten die Eingangsdaten für die rechnerische Modellierung der Schallausbreitung in der Putzschicht bestimmt werden. In Bild 13 ist die Schallabsorptionskurve des neuentwickelten Putzes mit einem Bauschuttanteil von 58 Prozent im Vergleich zu zwei marktüblichen Produkten gezeigt. Die Messung wurde vor einer Luftschicht der Dicke 100 mm durchgeführt. Aus den Kurven ist ersichtlich, dass das Produkt mit Bauschutt-

anteilen absolut vergleichbar mit herkömmlichen Produkten ist.

Für das Absorptionsvermögen ist insbesondere eine ausreichende offenzellige Porosität von hoher Bedeutung, damit das Gesamtsystem aus Akustikputz und dahinterliegender Trägerplatte unter realen Einsatzbedingungen voll wirksam bleibt. In Bild 14 ist die berechnete Schallabsorptionskurve für ein Putzsystem mit Bauschuttanteilen gezeigt. Die Berechnung wurde für einen zweischichtigen Putzaufbau auf einer Unterdeckenplatte aus 25 mm gesintertem Glasschaum bei diffusem Schalleinfall durchgeführt. Der Putzaufbau besteht aus zwei verschiedenen im Projekt entwickelten Putzen:

- Deckputz 1,5 mm
- Grundputz 4 mm.

Bei 100 mm Abhängöhe ergibt sich bei der Rechnung für eine unendlich ausgedehnte Fläche ein bewerteter Schallabsorptionsgrad von $\alpha_w = 0,70$ (L) und ein NRC-Wert (Noise Reduction Coefficient) von 0,75. Bei der maßgeblichen Hallraum-Messung an endlichen Proben sind höhere Werte zu erwarten. Diese Werte bestätigen, dass das Putzsystem akustisch bereits konkurrenzfähig ist.

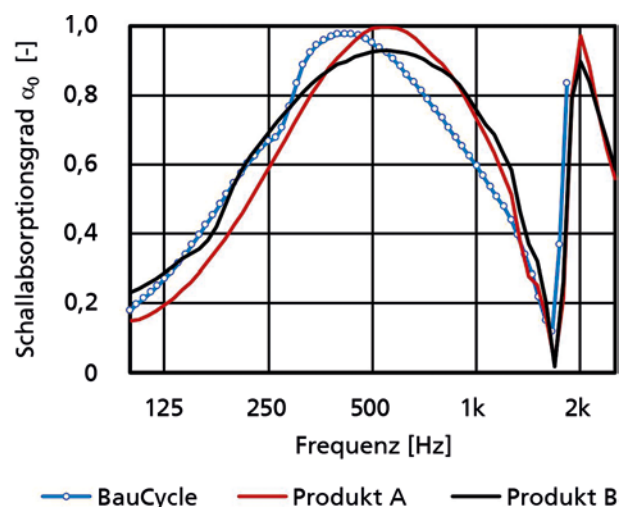


Bild 13. Schallabsorptionsgrad bei senkrechtem Schalleinfall des neuentwickelten Akustikputzes im Vergleich zu zwei marktüblichen Produkten
Fig. 13. Sound absorbing coefficient for the developed sound absorbing plaster at normal sound incidence compared to two commercially available products

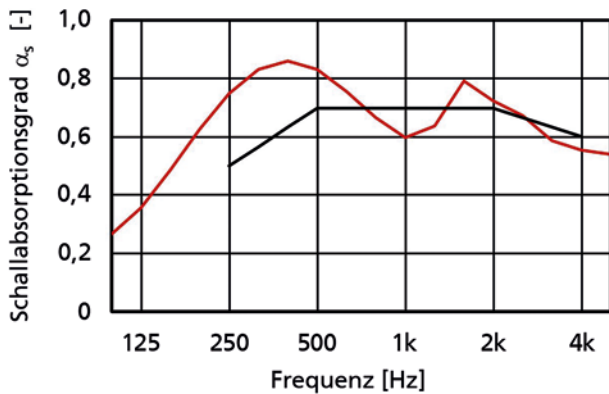


Bild 14. Berechnete Schallabsorptionsgrade bei diffusem Schalleinfall eines zweischichtigen Putzaufbaus auf einer 25 mm dicken Trägerplatte aus gesintertem Glasschaum bei 100 mm Abhängehöhe. In schwarz ist die Bezugskurve für den bewerteten Schallabsorptionsgrad eingetragen
 Fig. 14. Calculated sound absorbing coefficient of a two layer plaster application on a carrier plate (25 mm thickness) made of sintered glass foam. The black line is the reference curve of the weighted sound absorption coefficient.

Bis Projektende stehen weitere Arbeiten an den bisher entwickelten Bauprodukten an, unter anderem um deren Dauerhaftigkeit zu bewerten. Insbesondere für den Akustikputz soll noch eine Trägerplatte aus bauschutthaltem Material entwickelt werden.

3.3 Analyse

Die Analyse sichert die Einhaltung geltender Normen und Richtlinien für die neuentwickelten Bauprodukte. Dies betrifft unter anderem den Verwendungszweck, die Herstellung, die Zusammensetzung sowie die Eigenschaften der Baustoffe. Bei der Analyse wird insbesondere die Nachhaltigkeit der im Projekt BauCycle entwickelten Produkte berücksichtigt. Ziel ist es, die Produkte hinsichtlich ihrer Zirkularität und ihrer ökologischen Wirkungen zu bewerten und mit konventionellen Produkten, die durch die neuen Produkte substituiert werden könnten, zu vergleichen. Als Zielindikatoren wurden definiert:

- Flächeninanspruchnahme
- Recyclinganteil oder Material Circularity Indikator
- Carbon Footprint
- Kumulierter Energieaufwand (KEA).

Diese Indikatoren müssen sich auf eine Referenzgröße beziehen, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Dazu wurde eine sogenannte funktionelle Einheit (FE) definiert, auf die sich alle betrachteten Umweltauswirkungen beziehen: „Verwertung einer Tonne feinkörnigem Bauabbruch“. Die notwendigen Systemgrenzen der Analyse schließen folgende Prozesse ein:

- Erzeugung von feinkörnigem Bauabbruch
- Transporte
- Stoffliche Verwertungsverfahren
- Substitution von Baumaterialien.

Zusätzlich werden im Zuge der Analyse Daten erhoben, um den Materialfluss im Bereich Baustoffe besser zu erfassen, eine Informationsbasis zu schaffen und mögliche neue

Wege des Materials aufzuzeigen. Dies wurde explizit für eine Modellregion in Nordrhein-Westfalen durchgeführt. Baustoffproduzenten (z. B. Zementwerke), Aufbereitungsanlagen, Deponien und Baustofflager wurden unter Zuhilfenahme von Geoinformationssystemen mit wichtigen Verkehrslinien (z. B. Autobahn, Bahnlinien) korreliert, um Materialquellen und -senken darstellbar zu machen. In Bild 15 ist die Modellregion beispielhaft dargestellt. Diese Daten wurden um weitere Informationen zu Kosten, verfügbaren Produktionskapazitäten sowie Qualitätsanforderungen an zu verwendende Rohstoffe ergänzt und bilden eine funktionsfähige Basis für die Simulation und Modellierung der Materialströme. Bis zum Ende des Projektes soll diese Datenbank erweitert werden und eine methodische Blaupause für ganz Deutschland darstellen.

3.4 Vertrieb

Für den Vertrieb bzw. den zielgerichteten Einkauf von Bauschutt und Verkauf von innovativen Bauprodukten soll eine digitale Marktplattform entstehen. Dazu wurden auf Basis der in der Analyse erhobenen Daten zunächst für einzelne Materialien Prozessketten visualisiert, um daraus spezifische Geschäftsmodelle für Kunden ableiten zu können. Ziel ist es, diese Prozessketten auch mit im Projekt „BauCycle“ entwickelten Produkten zu simulieren, um reale Datenwerte für die Verwertungswege der einzelnen Komponenten zu generieren. Bei der Simulation eines bestimmten Szenarios innerhalb der Plattform werden verschiedene Material-Erzeuger und -Verbraucher sowie Sortieranlagen gebündelt. Zu jedem dieser Standorte können zudem Informationen über die jeweilige geografische Position, Kapazitäten und Materialbedarf und Verkehrsanbindung hinterlegt werden, sofern diese verfügbar sind. Nach Abschluss einer Berechnung bietet die Oberfläche Zugang zu den Simulationsergebnissen: Hierbei werden alle durchgeführten Materialtransporte zwischen den Standorten im zeitlichen Rahmen visualisiert. Zusätzlich sind die entsprechenden End-Füllstände der Sortieranlagen einzusehen. Die entsprechenden Tabellen sind in gängige Formate exportierbar. Die Simulationsschritte können iterativ angepasst werden. Im regulären Betrieb mit einer öffentlich zugänglichen Marktplattform gibt die BauCycle-Simulation nur die Transporte für die eingegebenen Bedarfe des Nutzers aus, der die Simulation angefordert hat.

Parallel wurden Geschäftsmodelle für den wirtschaftlich rentablen Betrieb der Vertriebsplattform erstellt. Die Plattform wird dabei so konzipiert, dass sie im Bedarfsfall auch in Branchen abseits der Bauindustrie angewendet werden kann. Übergeordnetes Ziel der Plattform ist, die benötigte Quantität und Qualität der Sekundärrohstoffe für den industriellen Anwender sicherzustellen.

4 Zusammenfassung

Das Thema Bauschuttrecycling wird im Projekt BauCycle aus verschiedenen Blickwinkeln ganzheitlich betrachtet. Eine selektive Aufbereitung des feinkörnigen Materials ist durch den entwickelten Sortieransatz bis zu einer Feinheit von 1 mm technisch möglich. Die bisherigen Ergebnisse lassen eine Umsetzung der Sortierung im industrienahen Maßstab als realistisch erscheinen. Aus den sortierten Ma-

- [2] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR): Sand auch in Deutschland bald knapp?. *Commodity Top-News* 56, Hannover Erscheinungsdatum online 15.2.2018.
- [3] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU): Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. Verordnung der Bundesregierung. https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/mantelv_entwurf_bf.pdf, (Stand 7.8.2018).
- [4] Umweltbundesamt (UBA): Bauabfälle. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#textpart-1> (Stand 21.6.2018).
- [5] *Wille, J.*: Sand-Mangel könnte Bauen teurer machen. *Frankfurter Rundschau*, 28.2.2018
- [6] *Wolfram, D.*: Eignung der Feinfraktion aus Bauschuttrecycling als Produktionsrohstoff für Porenbeton. MasterThesis am Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der Technischen Universität München (TUM) und Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, 1.8.2018.

Autoren diese Beitrages:

Dr. Sebastian Dittrich, sebastian.dittrich@ibp.fraunhofer.de
Gruppenleiter „Aufbereitung und Verwertung“, Abteilung Mineralische Werkstoffe und Baustoffrecycling (MWB)
Volker Thome, volker.thome@ibp.fraunhofer.de

Beide:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP, Mineralische Werkstoffe und Baustoffrecycling, Holzkirchen, Fraunhoferstr. 10, 83626 Valley

Jochen Nühlen, jochen.nuehlen@umsicht.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Umwelt-, Sicherheits- und Energietechnik UMSICHT, Nachhaltigkeits- und Ressourcenmanagement, Raumanalyse und Rohstoffsysteme, Osterfelder Str. 3, 46047 Oberhausen

Dr.-Ing. Robin Gruna, robin.gruna@iosb.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Optronik, Systemtechnik und Bildauswertung IOSB, Fraunhoferstr. 1, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Joseph Dörmann, joseph.doermann@iml.fraunhofer.de
Fraunhofer-Institut für Materialfluss und Logistik IML, Umwelt- und Ressourcenlogistik, Joseph-von-Fraunhofer-Str. 2–4, 44227 Dortmund



Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Stuttgart

Postfach 80 04 69 – 70504 Stuttgart
Nobelstraße 12 – 70569 Stuttgart

Holzkirchen

Postfach 11 52 – 83601 Holzkirchen
Fraunhoferstraße 10 – 83626 Valley

www.ibp.fraunhofer.de