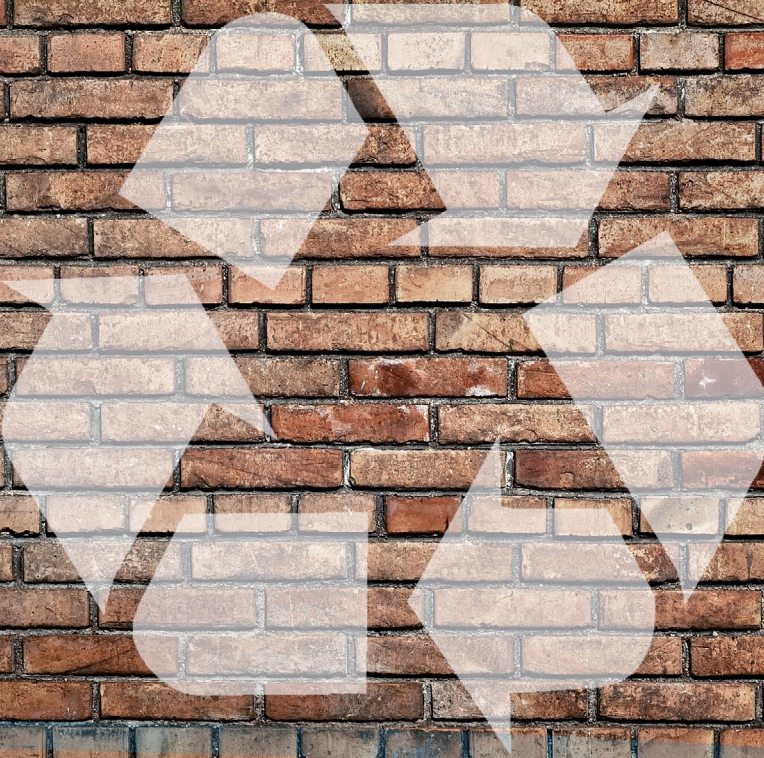


VDI

Zentrum
Ressourceneffizienz

VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 8



Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich

Juni 2014

Kurzanalyse Nr. 8: Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich

Autoren:

Dr. Oliver Krauß, VDI Technologiezentrum GmbH

Thomas Werner, VDI Technologiezentrum GmbH

Fachlicher Ansprechpartner:

Dr.-Ing. Nicole Becker, VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH

Wir bedanken uns bei Herrn Frank Jansen, Technisch-Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Fachbereich Bautechnik und Technische Gebäudeausrüstung der VDI-Gesellschaft Bauen und Gebäudetechnik (VDI GBG) für seine fachliche Unterstützung bei der Entstehung dieser Kurzanalyse.

Redaktion:

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)

Johannisstr. 5 - 6

10117 Berlin

Tel. +49 30-27 59 506-0

Fax +49 30-27 59 506-30

info@vdi-zre.de

www.ressource-deutschland.de

Satz und Gestaltung: Sebastian Kanzler

Titelbild: fotolia @ giuseppe blasioli

Gedruckt auf umweltfreundlichem Recyclingpapier

Potenziale eines hochwertigen Recyclings im Baubereich

Kurzanalyse Nr. 8

Inhaltsverzeichnis

1. Anfall und Verbleib von Bauabfällen in Deutschland	6
2. Generelle Trends bei Abbruchmaterialien und -volumen	9
3. Ausgangssituation, Technologien und Potenziale für ein hochwertiges Recycling	11
3.1 Beton	11
3.2 Ziegel	16
3.3 Fliesen und Keramik	16
3.4 Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte	17
3.5 Boden und Steine	19
3.6 Gips	25
3.7 Holz	27
3.8 Glas	29
3.9 Kunststoffe	32
3.10 Metalle	37
3.11 Dämmmaterial	39
4. Übergeordnete Ansätze für ein hochwertiges Recycling	44
5. Abbildungsverzeichnis	48
6. Fußnotenverzeichnis	48

1. ANFALL UND VERBLEIB VON BAUABFÄLLEN IN DEUTSCHLAND

Der Bausektor zählt weltweit zu den ressourcenintensivsten Wirtschaftssektoren. Für den Bau von Gebäuden und Infrastrukturen werden große Mengen mineralischer Rohstoffe wie Steine, Ziegel, Zement und Asphalt benötigt. Feldspat, Tonminerale und Silikate sind für die Glas- und Keramikindustrie unverzichtbar. Die meisten der vom Bausektor verwendeten Materialien werden in der Natur abgebaut und wachsen nicht nach. So waren um die Jahrtausendwende in Deutschland im gesamten Bauwerksbestand des Hoch- und Tiefbaus, also in Wohn- und Bürogebäuden, Industrieanlagen, Tunneln und Brücken, Straßen und anderen Infrastrukturbauwerken, geschätzte 50 Milliarden Tonnen mineralische Rohstoffe verbaut.¹

Recycling ist ein wichtiger Schritt, um die Ressourcenentnahme und die damit verbundenen Umweltfolgen nachhaltig zu reduzieren. Besonders im rohstoffarmen Deutschland findet sich in Bauabfällen ein enormes Potenzial an hochwertigen Rohstoffen, die schon heute kostengünstig zurückgewonnen und so veredelt werden können, dass sie hinsichtlich der Qualität mit dem Ausgangsmaterial vergleichbar sind. Ein hochwertiges Recycling achtet nicht mehr nur auf Margen und Mengen, sondern stellt die Qualität in den Vordergrund.

Im Jahr 2008 wurden im Bauwesen etwa 580 Millionen Tonnen Kies, Sand, gebrochene Natursteine und industrielle Nebenprodukte wie zum Beispiel Bitumen verwendet.³ Hinzu kommen circa 67 Millionen Tonnen an mineralischen Recyclingbaustoffen, etwa 28 Millionen Tonnen an Zement und große Metallmengen. Rund ein Viertel dieses Volumens der mineralischen Baustoffe wird jährlich für Erneuerungs- und Sanierungsmaßnahmen von Infrastruktursystemen einge-

Recycelte Bauabfälle sind qualitativ mit dem Ausgangsmaterial vergleichbar.

¹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Mai 2012. URL: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/progress_bf.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

³ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2008 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008, S. 10. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_7.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

setzt. Beim Abbruch oder Rückbau am Ende des Lebenszyklus von Gebäuden und Infrastrukturen fallen zudem große Abfallmassen an, ein Großteil des Bauschutts enthält potenzielle Sekundärrohstoffe. Somit stellt der Bauwerksbestand auch ein bedeutendes sogenanntes anthropogenes Lager und die Quelle dieser Sekundärrohstoffe dar.

Anfall mineralischer Bauabfälle

Die bei weitem größte Abfallfraktion umfasst mineralische Baustoffe. Ausnahmen bilden Holz und erdölbasierte Stoffe, die als Dämm- und Kunststoffe zum Einsatz kommen. 2010 entfielen in Deutschland circa 50 Prozent des gesamten deutschen Abfallaufkommens auf Bau- und Abbruchabfälle. 187 Millionen Tonnen mineralischer Bauabfälle wurden vom Bausektor erzeugt. Davon entfielen beispielsweise circa 106 Millionen Tonnen auf Bodenaushub, Steine und Baggergut, 53 Millionen Tonnen auf Bauschutt und etwa 14 Millionen Tonnen auf Straßenaufbruch.⁴ Bauabfälle, die aufgrund der enthaltenen gefährlichen Stoffe gesondert deponiert werden müssen, sind nicht Bestandteil der hier aufgezeigten Recyclingpotenziale und werden daher nicht in den beschriebenen Zahlen berücksichtigt.

2010 entfielen in Deutschland circa 50 Prozent des gesamten deutschen Abfallaufkommens auf Bau- und Abbruchabfälle.

Verbleib mineralischer Bauabfälle

Von den angefallenen 186,5 Millionen Tonnen Bau- und Abbruchabfälle konnten circa 171 Millionen Tonnen, also über 90 Prozent, wiederverwertet werden. Eine Verwertung entspricht dabei zum Beispiel dem Recycling von Straßenaufbruch, der Verfüllung von Abgrabungen oder der Herstellung von Recycling-Baustoffen. Der verbleibende Rest wird auf Deponien beseitigt.⁵ Der Umfang und die Art der Wiederverwertung hängen stark vom jeweiligen Material ab.

Beispiele aus der Praxis und Forschung zeigen, wie hochwer-

⁴ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, S. 6. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁵ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010, S. 14, URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Anfall insgesamt 186,5 Mio. Tonnen

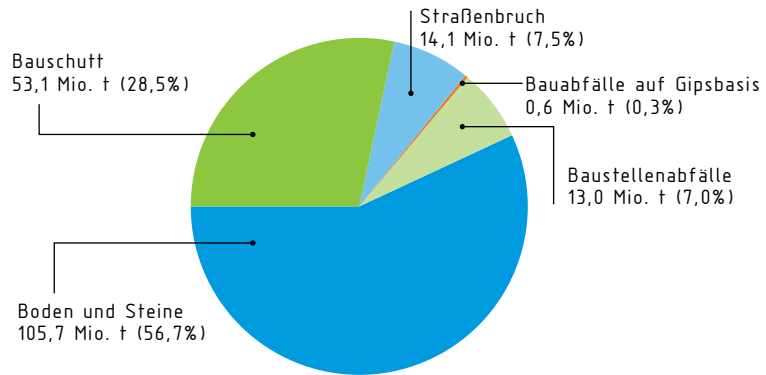


Abb. 1: Anfall mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010
(© Kreislaufwirtschaft-Bau.de)⁶

tiges Recycling in Abhängigkeit verschiedener Baumaterialien und -stoffe im Baubereich im Sinne der Ressourceneffizienz, der Ressourcenschonung und der Kreislaufwirtschaft funktionieren kann und wo weitere Bedarfe und Recycling-Potenziale für die Zukunft liegen.

⁶ Ebenda

2. GENERELLE TRENDS BEI ABBRUCHMATERIALIEN UND -VOLUMEN

Das Aufkommen von Bau- und Abbruchabfällen hängt maßgeblich von der wirtschaftlichen Entwicklung im Baugewerbe ab. Die seit 2002 nachlassende Bautätigkeit in Deutschland führt daher auch zu leicht rückläufigen Abfallmengen in diesem Sektor. Gleichzeitig nehmen aber die Verwertungsmöglichkeiten im Baubereich ab. Insbesondere im Straßen- und Tiefbau ist in Deutschland auch mittel- bis langfristig kein großes Wachstum mehr zu erwarten.

Allerdings wird sich die Zusammensetzung von Bau- und Abbruchabfällen aufgrund von Veränderungen bei den eingesetzten Baustoffen verändern. Wichtige Trends sind hier etwa die verstärkte Nutzung kunststoffbasierter Baumaterialien etwa bei Fenstern (siehe Abb. 2), Türen oder auch Dämmstoffen, die wachsende Bedeutung von Verbundwerkstoffen und die generell zunehmende Vielfalt der eingesetzten Materialien. Daraus ergeben sich immer höhere Anforderungen an die entsprechenden Aufbereitungs- und Recyclingverfahren, was wiederum zu einem Forschungs- und Entwicklungsbedarf in diesem Bereich führt.

Die politischen bzw. rechtlichen Rahmenbedingungen für das Recycling von Bauabfällen werden, wie für andere Abfälle auch, maßgeblich durch die Neufassung der EU-Abfallrahmenrichtlinie aus dem Jahr 2008 bestimmt. Ein wesentliches Element ergibt dort die folgende fünfstufige Hierarchie für Maßnahmen im Umgang mit Abfällen: Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung, Recycling, sonstige Verwertung, zum Beispiel energetische Verwertung, Beseitigung. Damit wird das Recycling erstmals höherwertig eingestuft als die energetische Verwertung. Außerdem enthält die Rahmenrichtlinie

Bis zum Jahr 2020 sollen mindestens 70 Gewichtsprozent der nicht gefährlichen Abfälle aus Bau- und Abbrucharbeiten der Wiederverwendung oder stofflichen Verwertung zugeführt werden.

konkrete Recyclingziele für das Bauwesen: Bis zum Jahr 2020 sollen mindestens 70 Gewichtsprozent der nicht gefährlichen Abfälle aus Bau- und Abbrucharbeiten der Wiederverwendung oder stofflichen Verwertung zugeführt werden.⁷

Einen erheblichen Einfluss auf den praktischen Umgang mit Recycling-Baustoffen sowie mit Boden und bodenähnlichem Material wird die neue Mantelverordnung Grundwasser, Ersatzbaustoffe, Bodenschutz des Bundesumweltministeriums ausüben, die derzeit im zweiten Arbeitsentwurf vorliegt.⁸ Ein wesentlicher Bestandteil dieser Mantelverordnung ist die Ersatzbaustoffverordnung, mit der eine bundeseinheitliche, rechtsverbindliche Regelung für die Verwendung mineralischer Ersatzbaustoffe in technischen Bauwerken geschaffen werden soll.

Recycling kann die Ökobilanz über den Lebenszyklus maßgeblich verbessern.

Neben den rechtlichen Rahmenbedingungen ist die Frage der Wirtschaftlichkeit für den Umgang mit Abbruchmaterialien entscheidend. Recyclingbaustoffe müssen sich gegen aus Primärrohstoffen hergestellte Baustoffe am Markt durchsetzen. Der generelle Trend steigender Rohstoffpreise wirkt sich dabei positiv auf die Konkurrenzfähigkeit von Recyclingbaustoffen aus.

Auch die vielfältigen Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz von Gebäuden während ihrer Nutzung erhöhen den wirtschaftlichen und ökologischen Druck zur Verwertung von Abbruchmaterialien. Denn der immer geringere Energiebedarf von Gebäuden hat zur Folge, dass der Energie- und Ressourceneinsatz für die eingesetzten Materialien einschließlich Entsorgung in der Gesamtköbilanz eines Gebäudes stärker ins Gewicht fällt. Ein möglichst hochwertiges Recycling am Ende der Nutzungsphase kann die Ökobilanz über den Lebenszyklus maßgeblich verbessern.

⁷ Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:DE:PDF>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material vom 31.10.2012. URL: http://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/entw_mantelverordnung.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

3. AUSGANGSSITUATION, TECHNOLOGIEN UND POTENZIALE FÜR EIN HOCHWERTIGES RECYCLING

Unter Bauabfällen lassen sich verschiedene Abfallarten zusammenfassen. Im Nachfolgenden werden die Technologien und Potenziale für ein hochwertiges Recycling getrennt nach Abfallarten betrachtet, wobei die Untergliederung an die Abfallverzeichnisverordnung angelehnt ist. Die Hauptfraktionen sind gegeben durch:

- Bauschutt, wie Beton, Ziegel oder Keramik,
- Straßenaufbruch, bestehend aus Bitumengemischen, ggf. Teer und teerhaltigen Produkten,
- Boden und Steine, zu denen Bodenaushub, Baggergut und Gleisschotter zählen,
- Bauabfälle auf Gipsbasis sowie
- Baustellenabfälle, wie Holz, Glas, Kunststoffe, Metalle und Dämmmaterialien.

Der weit überwiegende Teil dieser Abfälle ist mineralisch, nur geringe Mengen sind fossilen oder nachwachsenden Ursprungs.

3.1 Beton

Beton besteht aus Zement, Gesteinskörnung und Wasser und gilt als der Baustoff des 20. und 21. Jahrhunderts. Jährlich werden in Deutschland 250 Millionen Tonnen Beton verbaut.⁹ 2010 betrug die daraus resultierende Abfallmenge circa 130 Millionen Tonnen, jedoch existieren bislang noch keine effizienten bzw. wirtschaftlichen Recyclingmethoden, so dass der Betonschutt bisher bestenfalls zerschreddert als Belag unter der Straße wiederverwertet wurde. Dieser Prozess entspricht der Wiederverwertung von Rohstoffen, deren Qualität sich von Vorgang zu Vorgang verschlechtert, und wird als Downcycling bezeichnet.¹⁰ Während Frischbe-

⁹ Forschung Kompakt: Baumaterialien wiederverwerten: Betonrecycling, 01.10.2012. URL: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹⁰ Ebenda

ton in Betonwerken durch angeschlossene Recyclinganlagen wieder in seine Ausgangsstoffe zerlegt und erneut dem Stoffkreislauf zugeführt werden kann, verläuft das Recycling von Altbeton ungleich aufwändiger.

Beton-Recycling

Herkömmliche Verfahren ermöglichen ein Recycling der Gesteinskörnung, um den Kies wieder im Frischbeton einsetzen zu können, sofern ausschließlich Betonabbruch vorliegt. Forscher vom Fraunhofer-Institut für Bauphysik arbeiten an einem neuen Recycling-Verfahren, bei dem der Beton wieder effizient in seine Bestandteile zerlegt bzw. die hochwertigen Zuschläge und Rohstoffe aus Altbeton rückgewonnen werden können. Eine effiziente Trennung der Gesteinskörnung von der eigentlichen Zementsteinmasse bildet einen wichtigen Schritt, der die Recyclingquote auf bis zu 80 Prozent steigern kann.

Das von den Fraunhofer-Forschern eingesetzte Verfahren basiert auf der elektrodynamischen Fragmentierung. Kern des Verfahrens ist die Beobachtung, dass verschiedene Materialien gegenüber elektrischen Spannungen in Abhängigkeit von Pulslängen unterschiedliche Durchschlagsfestigkeiten aufweisen. Wird Beton elektrischen Impulsen mit bestimmter Pulslänge ausgesetzt, sucht sich der Blitz naturgemäß den Weg des geringsten Widerstands. Bei Beton liegt dieser Weg entlang den Grenzen zwischen den Bestandteilen, also zwischen der Zementsteinmasse, dem Kies und anderen Bestandteilen wie zum Beispiel Stahlfasern im Stahlbeton. Die elektrodynamische Fragmentierung stellt eine effektive Methode dar, um Verbundwerkstoffe nahezu sortenrein wieder aufzutrennen und hochwertige Sekundärrohstoffe aus Abfallmaterial zurückzugewinnen. In einer Laboranlage können bereits mehrere Tonnen Altbeton pro Stunde aufbereitet werden. Eine marktreife Anlage mit einem Durchsatz von über 20 Tonnen pro Stunde wird für 2014 erwartet.¹¹

Verbundwerkstoffe können mittels elektrodynamischer Fragmentierung nahezu sortenrein aufgetrennt werden.

¹¹ Fraunhofer Gesellschaft: Blitz, schlag' ein!, Oktober 2012.
URL: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Recycling-Beton

Bei Recycling-Beton (oder RC-Beton) wird Kies oder Naturstein durch Recycling-Gesteinskörnungen aus mineralischen Abbruchmaterialien bzw. aufbereitetem Bauschutt teilweise ersetzt. Das Potenzial für die Produktion größerer Mengen RC-Betons ist aufgrund der enormen Mengen an Bauschutt vorhanden und bietet sich aus mehreren umweltpolitischen Gründen an:

- Die Zweitnutzung von Material verringert die Rohstoffentnahme, zum Beispiel bei Kiesreserven.
- Vor allem in Siedlungsschwerpunkten ist eine Reduzierung des Flächenverbrauchs bei der Entnahme von Rohstoffen und der Deponierung von Abbruch anzustreben.
- Fällt der Bauschutt in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem Bauvorhaben an, können Transporte von Baumaterial und damit verbundene Emissionen erheblich eingespart werden.

Die Güte von RC-Beton wird maßgeblich durch die Qualität der RC-Gesteinskörnungen bestimmt.¹² Die Vorgaben der DIN 4226-100 „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel“ legen bestimmte chemische und mechanische Eigenschaften fest, unter denen eine RC-Gesteinskörnung als ein vollwertiges Substitut betrachtet werden kann. Auch die deutschen Beton-Normen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 liefern Rahmenbedingungen¹³ für verschiedene Anwendungsbereiche und Expositionsklassen, in denen RC-Beton in seinen Eigenschaften dem konventionellen Beton gleichzusetzen ist. Das von der Brandenburgischen Technischen Universität durchgeführte Forschungsprojekt „Einsatz von Recycling-Material aus mineralischen Baustoffen – Zuschlag in der Betonherstellung“¹⁴, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, unter-

Die Qualität der RC-Gesteinskörnungen hat maßgeblichen Einfluss auf die Güte des RC-Betons.

¹² InformationsZentrum Beton: Recycling-Beton – Wiederaufbereitung von Bauteilen und Abbruchmaterialien. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Beton-Recycling-Beton_930267.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹³ Breit, Wolfgang: RC-Beton und die Anforderungen an die RC-Gesteinskörnung, Technische Universität Kaiserslautern, Oktober 2010. URL: <http://www.ifeu.de/abfallwirtschaft/pdf/Breit.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹⁴ Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus: Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), November 2011. URL: http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/fileadmin/uploads/altlasten/files/bauliches_recycling/RC-Beton-Stofffluss-Energieaufwand-101102.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

suchte in der Zeit 2009 bis 2011 verschiedene RC-Gesteinskörnungen und RC-Betonrezepturen hinsichtlich bautechnischer Eigenschaften und Umweltverträglichkeit. Das Projekt konnte die Vergleichbarkeit der untersuchten RC-Betone mit Normalbeton nachweisen und attestierte hervorragende Verarbeitungseigenschaften bei gleichzeitig fünf Prozent niedrigeren Herstellungskosten gegenüber konventionellem Beton.

Trotz vorhandener DIN-Normen und positiver Praxisbeispiele hat sich dieser Baustoff in Deutschland bisher nicht auf dem Markt etablieren können. Als Hauptgrund nennt beispielsweise das Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr in Baden-Württemberg eine mangelnde Wahrnehmung des RC-Betons bei Architekten und Bauingenieuren.¹⁵

CO₂-Einsparung bei Zementherstellung

Die Herstellung der meisten Massenbaustoffe (Beton, Stahl, Klinker) ist mit einem hohen Energieaufwand und CO₂-Ausstoß verbunden. Jährlich emittieren Zementwerke mit mehr als zwei Milliarden Tonnen des Treibhausgases CO₂ circa fünf Prozent der weltweiten CO₂-Emissionen. Damit setzt die Zementherstellung etwa dreimal so viel CO₂ frei wie der globale Flugverkehr.¹⁶ Gelänge es beispielsweise, neben der Gesteinskörnung auch einen Zementersatzstoff aus Altbeton zu gewinnen, ließen sich die CO₂-Emissionen der Zementindustrie deutlich senken. So werden zunehmend bei der Betonherstellung Nebenprodukte aus anderen Industrien aufgrund ihrer zementähnlichen Eigenschaften als Zementersatz oder -zusatzstoff verwendet. Beispielsweise können Flugaschen aus Kohlekraftwerken und Silikastaub oder Hüttensande aus der Stahlindustrie als Zusatzstoff und Bindemittel im Beton herangezogen werden.¹⁷ Darüber hinaus verbessern weitere Betonzusatzmittel oder Fließmittel die Eigenschaften des Betons, sei

Die Zementherstellung setzt jährlich dreimal so viel CO₂ frei wie der globale Flugverkehr

¹⁵ Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg: RC-Beton im Baubereich – Informationen für Bauherren, Planer und Unternehmen. URL: http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103603/Broschuere_RC-Beton.pdf?command=downloadContent&filename=Broschuere_RC-Beton.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹⁶ Reuscher, Günter et al.: Mehr Wohlstand – weniger Ressourcen, aus Zukünftige Technologien Consulting Nr. 94, Düsseldorf, 2012

¹⁷ InformationsZentrum Beton GmbH: Das grüne Buch vom Beton – Gute Argumente für nachhaltiges Bauen, 2009

es durch eine höhere Qualität oder eine verbesserte Nachhaltigkeit. Der Energieeinsatz bei Herstellung, Verarbeitung und Recycling kann reduziert werden und die Leistung des Materials wird gleichzeitig erhöht.¹⁸

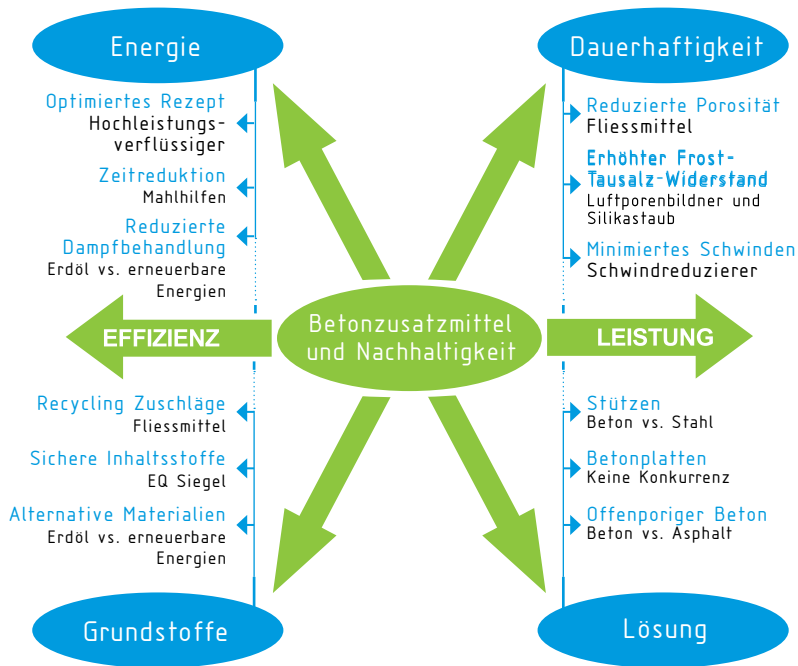


Abb. 2: Einflüsse von Betonzusatzmitteln auf die Nachhaltigkeit von Beton¹⁹

¹⁸ Sika Service AG: Sika Beton Handbuch, Mai 2013, S. 16 – 21

¹⁹ Sika Services AG (Hrsg.), 2013, Sika Beton Handbuch (Deutsche Version Sika Schweiz AG, Ausgabe 05/2013). URL: http://che.sika.com/de/solutions_products/informationen_ch/beton.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

3.2 Ziegel

In Deutschland werden jährlich knapp neun Millionen Kubikmeter Mauerziegel hergestellt, die Produktion von Dachziegeln beträgt etwa 850 Millionen Stück.

Mauer- und Dachziegel wie Beton- oder Tonpfannen sind wiederverwendbar und werden häufig wegen bestimmter Formen gesucht und im Rückbau erneut eingesetzt, insbesondere Hohlziegel, Falzziegel oder Krempziegel. Jedoch ist die Reinigung der Ziegel von Putz- und Mörtelstoffen – zeitaufwändig, schwierig und mechanisch durchgeführt – selten erfolgreich. In Fällen, in denen Ziegel und Mörtel getrennt wurden, konnte durch Versuche nachgewiesen werden, dass der ganze Ziegel noch immer den technischen Bauanforderungen entspricht.²⁰

Ist eine Wiederverwertung als ganzer Ziegel nicht möglich, können Abbruchziegel als Zuschlagstoff für Mörtel und Putze genutzt werden oder als natürliches Schütt- oder Unterbaumaterial im Straßen-, Wege- und Landschaftsbau sowie als Grundstoff für Lärmschutzwälle zum Einsatz kommen. Zudem ist Ziegelsplitt als Leichtzuschlag nach DIN 4226-2 für Beton genormt und wird zum Beispiel als Zuschlag beim Bau von Mantelsteinen von Keramik-Schornsteinen eingesetzt. Weitere Einsatzgebiete für rezyklierte Ziegel beinhalten die Verwendung als Tennissand, Pflanzensubstrate oder als Zuschlagstoff für Kalksandsteine.

Ziegel können als Ganzes, aber auch in Form von Abbruchziegeln als Zuschlagstoff, Grundstoff oder Unterbaumaterial wiederverwendet werden.

3.3 Fliesen und Keramik

Der Hauptwerkstoff von Keramik ist Ton. Darüber hinaus zählen Quarze und verschiedene Minerale zu den häufigen Zuschlagstoffen, die sämtlich als natürliche und heimische Rohstoffe zur Verfügung stehen.

Für die Betrachtung der Recyclingmöglichkeiten wird die Unterteilung in Grob- und Feinkeramik vorgeschlagen.²¹ Diese bezieht sich auf die Reinheit und die Korngrößen der verarbeiteten

²⁰ Abbruch und Recycling – Einsatzmöglichkeiten für recycelten Mauerwerksbruch. URL: <http://www.tbe-euro.com/de/clc-recycling/recycling-other.asp>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

²¹ Martens, Hans: Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis, 2011, Spektrum Akademischer Verlag

teten Rohstoffe. Zur Grobkeramik (0,2 bis 2 Millimeter) zählen Baukeramik, Steinzeug und Feuerfeststeine. Die Feinkeramik (< 0,2 Millimeter) wird komplettiert durch Steingut, Porzellan und technische Keramik.

Grundsätzlich ergeben sich, wie bei den meisten anderen Baustoffen auch, zwei Möglichkeiten des Recyclings:

1. Altmaterial kann durch Recyclingprozesse in Materialien der gleichen Wertigkeit zurückverwandelt werden und als Zuschlag für neue Materialmischungen dienen.
2. Keramikabfälle können als mineralischer Sekundärbau-
stoff einer andersartigen Verwertung zugeführt werden, beispielsweise im Straßen-, Wege- und Sportplatzbau als Vegetationssubstrat oder als Verfüllmaterial.

Aufgrund der hohen Qualitätsansprüche an die verwendeten Werkstoffe bei der Herstellung von Feinkeramik scheidet die Wiederverwendung gesinterten Recyclingmaterials im Anwendungsbereich der Feinkeramik grundsätzlich aus. Für das Recycling gebrauchter Grobkeramik ist der Rückbau der Materialien nach Stoffarten erforderlich, wodurch in vielen Fällen die nachfolgende Aufbereitung zu qualitätsgerechten Recyclingstoffen erst ermöglicht wird.

Bei speziellen Keramiken werden Edelmetalle als Beschichtung aufgebracht. Ebenso werden bei der Herstellung von Keramik-Kondensatoren oder als Stabilisator bestimmter Keramik Seltene Erden wie Yttrium, Lanthan, Cer, Praseodym oder Neodym eingebracht. Aufgrund des ständig steigenden Bedarfs an Seltenen Erden haben die EU und andere Institutionen diese als kritische Ressourcen eingestuft. Derzeit ist die Wirtschaftlichkeit des Recyclings aufgrund der geringen Mengen an Seltenen Erden in Keramik noch fraglich.

3.4. Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte

Bitumen kommt als Gemisch in der Natur vor, wird jedoch hauptsächlich mit Hilfe der Vakuumdestillation aus Erdöl gewonnen. Mit seiner klebrigen, hydrophoben Eigenschaft und seiner Widerstandsfähigkeit gegenüber Luft, Wasser und

Chemikalien wird er vor allem eingesetzt, um Bauteile gegen Wasser zu schützen. Die bekannteste Bitumenmischung ist Asphalt, eine Mischung aus dem Bindemittel Bitumen und Gesteinskörnungen, die zum Beispiel im Straßenbau für Fahrbahnbefestigungen, im Hochbau für Bodenbeläge oder im Wasser- und Deichbau zur Abdichtung eingesetzt wird.

Bitumengemische, die kein Teer enthalten, wie beispielsweise Asphalt, können nach dem Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz wiederverwendet werden. Grundsätzlich gilt Asphalt aufgrund seiner thermoplastischen Eigenschaften als ein Baustoff mit hohem Wiederverwendungsgrad. Zur Wiederverwertung wird der Asphalt dabei entweder durch Abfräsen (Fräsasphalt) oder durch Aufbrechen (Aufbruchasphalt) gewonnen.

Allgemein wird mit dem Begriff Ausbausphalt der aus Straßen- und Verkehrsflächen zurückgewonnene Asphalt bezeichnet. Dabei werden zwei Verfahren für den Wiedereinsatz von Ausbausphalt unterschieden: Beim „Recycle in Plant“ wird der Asphalt im Mischwerk wiederverwertet und gezielt mit zusätzlichem Mischgut verarbeitet, wodurch Asphalt mit hoher Qualität hergestellt wird. Beim Verfahren „Recycle in Place“, also der Asphalt-Wiederherstellung an Ort und Stelle, wird der Ausbausphalt ohne oder mit zusätzlichem Mischgut verarbeitet, wobei die mögliche Qualitätsverbesserung begrenzt sein kann. Während 2010 in Deutschland rund 50 Millionen Tonnen Asphalt produziert worden sind, fielen circa 14 Millionen Tonnen Ausbausphalt an, von denen circa 85 Prozent wieder in der Asphaltherstellung verwertet worden sind.²² In vielen Ländern wird eine Recycling-Quote für ausgebaute Asphaltbefestigungen von annähernd 100 Prozent erreicht.²³

2010 konnten 85 Prozent des Ausbausphalts wiederverwendet werden.

²² Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V.: Asphaltproduktion in Deutschland, Juni 2012. URL: <http://www.asphalt.de/media/exe/198/c49b8c0d0ee9ee0d747e210a117ec79a/asphaltp-2011.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

²³ Mollenhauer, Konrad: Wohin mit unseren verbrauchten Straßen? Asphalt-Recycling im Europäischen Kontext, 2010. URL: https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/isbs/01_04_mollenhauer.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

3.5 Boden und Steine

Laut Kreislaufwirtschaft Bau sind alleine im Jahr 2010 über 100 Millionen Tonnen Bodenaushub, Baggergut und Gleisschotter angefallen, von denen insgesamt 93 Millionen Tonnen, also circa 88 Prozent, wiederverwertet worden sind. Davon wurden circa 74 Millionen Tonnen bergbaufremdes Bodenmaterial in übertägigen Abgrabungen verwertet und circa neun Millionen Tonnen entfielen auf die sonstige Verwertung im Deponiebau sowie im Straßen- und Wegebau, beispielsweise als Lärmschutzwälle oder Dämme. Darüber hinaus wurden im Rahmen

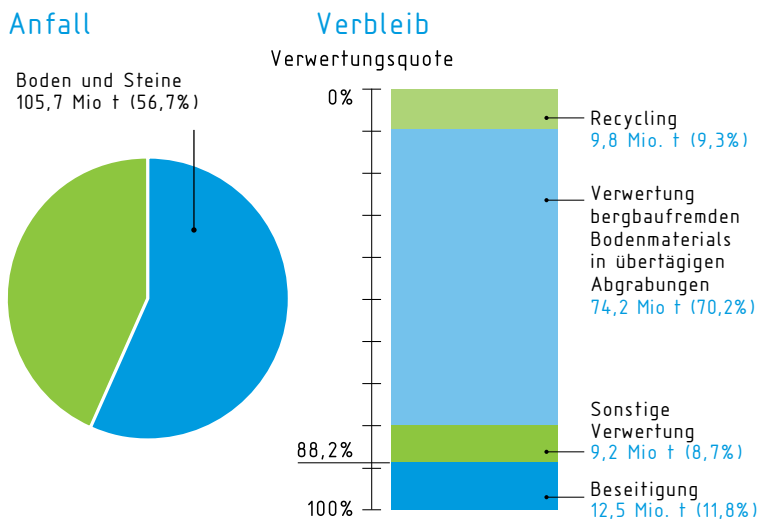


Abb. 3: Anfall und Verbleib der mineralischen Bauabfallfraktion Boden und Steine im Jahr 2010 (© Kreislaufwirtschaft-Bau.de)²⁴

der Wiederverwertung des Bodenmaterials circa zehn Millionen Tonnen Recycling-Baustoffe hergestellt, die verbleibenden knappen zwölf Prozent wurden auf Deponien beseitigt.²⁵

Ein Potenzial zur Erhöhung des Recyclinganteils von Boden und Steinen kann zum Beispiel im Straßenbau erkannt wer-

²⁴ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, S. 6. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

²⁵ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, S. 6. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

den. Wird Bauschutt höherwertig zur Herstellung von RC-Materialien wiederverwertet, so steht dieser nicht mehr für eine niederwertige Verwertung beispielsweise im Straßenbau zur Verfügung. Die hierdurch entstehende Fehlmenge kann durch ein Recycling der Fraktion Boden und Steine, die bisher allenfalls verwertet wird, geschlossen werden. Aus ökologischer und ressourcenbezogener Sicht ist deren Verwertung in Abgrabungen nicht erforderlich, sodass hierfür kein Material zur Verfügung stehen muss.²⁶

Bodenaushub

Bodenaushub ist ein natürlich anstehendes oder umgelagertes Locker- und Festgestein, das im Rahmen von Unterhaltungs-, Neu- und Ausbaumaßnahmen im terrestrischen Bereich ausgehoben oder abgetragen wird. Erdaushub fällt zum Beispiel in großen Mengen beim Bau von Wohngebieten sowie bei Straßen- und Bergbauarbeiten an. Boden stellt in seiner Funktion als Lebensgrundlage für Menschen, Tiere und Pflanzen, als Bestandteil des Naturhaushaltes und in seinen Puffer- und Stoffumwandlungseigenschaften (zum Beispiel zum Schutz des Grundwassers) eines der wichtigsten Schutzgüter neben Luft und Wasser dar. Boden ist naturgemäß nicht vermehrbar und kann sich nur eingeschränkt erneuern.

Damit die Verwendung von Boden- beziehungsweise Erdaushub nicht als Beseitigung, sondern als Wiederverwertung gilt, muss der Einsatz des Aushubmaterials einem vorab definierten Zweck dienen. Wird das Material in erster Linie beseitigt, so handelt es sich um eine Deponierung.

Typische Verwertungsarten sind:

- Die Bodenverbesserung zur nachhaltigen Verbesserung einer natürlichen Bodenfunktion.
- Die Rekultivierung, um natürliche Bodenfunktionen wiederherzustellen, beispielsweise an Rohstoffabbaustätten oder Deponien nach deren Verfüllung oder beim Rückbau von Infrastrukturen.

²⁶ Keßler, Hermann: Auswertung der Studie: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und Erdenindustrie bis 2030 in Deutschland, 2013, Umweltbundesamt

- Bei Baumaßnahmen wie dem Landschafts- oder Straßenbau, der Errichtung von Hochwasser- und Lärmschutzdämmen oder bei Verfüllungen von Baugruben kann Boden als Rohstoff wiederverwertet werden.

Grundsätzlich soll nur Bodenmaterial mit vergleichbarer stofflicher und physikalischer Beschaffenheit kombiniert werden und das einzubauende Bodenmaterial muss qualitativ hochwertiger als die vorhandene Auftragsfläche sein. Es gilt, dass mindestens eine der natürlichen Funktionen des vorhandenen Bodens verbessert werden muss, wobei die anderen natürlichen Funktionen nicht beeinträchtigt werden dürfen.

Belasteter Bodenaushub, der nicht verwertet werden kann, ist entweder durch eine Behandlung einer Wiederverwertung zuzuführen oder zu deponieren. So können erhöhte Schadstoffwerte im Bodenmaterial zum Beispiel in folgenden Bereichen entstehen:

- in Industrie- und Gewerbegebieten,
- im Straßenrandbereich,
- im Oberboden von Wein- oder Hopfenanbauflächen,
- in landwirtschaftlich genutzten Böden oder
- im Sediment von Gewässern oder Rückhaltebecken (siehe Baggergut).

Baggergut

Im Bereich der Wasserwirtschaft und im Verkehrswasserbau beschreibt der Begriff Baggergut das bei Arbeiten im und am Gewässer anfallende Boden- und Sedimentmaterial. Insofern grenzt sich der Begriff von Baggararbeiten an Land ab, wo die Begriffe Boden- oder Erdaushub genutzt werden. Im Bereich der Nord- und Ostsee werden jährlich über 40 Millionen Kubikmeter Baggergut ausgehoben. Mit geschätzten fünf Millionen Kubikmeter fällt Baggergut im Binnenbereich mit vergleichsweise kleinen Mengen an.²⁷

Die physikalischen und chemischen Eigenschaften des Baggerguts hängen von der Zusammensetzung des gebaggerten Materials ab, grundsätzlich handelt es sich um ein Gemisch verschiedener anorganischer und organischer Bestandteile bestehend aus:

- Mineralien und kleinen Bruchstücken aus der Verwitterung von Gestein,
- Tonmineralien,
- Ausfällungen und Überzügen,
- organischen Materialien (Pflanzenmaterial, Mikroorganismen, größeren Organismen usw.),
- anthropogenen Materialien einschließlich Abfällen.

Da die Zusammensetzungen von Aushubmaterial je nach Örtlichkeit schwanken, zum Beispiel hinsichtlich des Anteils an organischen Bestandteilen, kann nicht jedes Baggergut einer Nutzung zugeführt werden. Teilweise ist Baggergut so stark belastet, dass es nur noch deponiert werden kann. Die große Menge des kaum beziehungsweise unbelasteten Materials kann dagegen als natürlicher Boden zur Ressourcenschonung beitragen, indem hier das Material so aufbereitet wird, dass ein Teil der Sedimente, wie beispielsweise der Sand, als Baustoff weiterverwendet werden kann. Eine andere Verwendung von Baggergut kann bei den Rostocker Spülfeldern beobachtet werden. Dort betreibt die Hansestadt

²⁷ Hafentechnische Gesellschaft: Umgang mit Baggergut. URL: http://www.htg-baggergut.de/Downloads/BG_Position_HTG.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Rostock Anlagen, in denen jährlich circa 100.000 Kubikmeter Baggergut aufbereitet werden. Getrocknet eignet sich das feinkörnige Bodenmaterial aus Baggergut mit seinem Humusanteil unter anderem auch für den Landschaftsbau oder zur Rekultivierung von Deponiestandorten.²⁸

Für Deichbauten entlang der Ostseeküste könnte künftig auch Baggergut aus Flüssen und Boden verwendet werden und zu enormen Kosteneinsparungen führen. Derzeit untersuchen Forscher der Universität Rostock, inwiefern Baggergut als Ersatzmaterial für den Deichbau geeignet ist. In Markgrafeneheide soll in dem von der EU geförderten Forschungsprojekt „DredgDikes“ in großmaßstäblichen Versuchen nachgewiesen werden, unter welchen Bedingungen ein Langzeiteinsatz von Baggergut im Deichbau erfolgen kann und in welchen Fällen sich eine Eignung herbeiführen lässt, indem beispielsweise Geokunststoffe als Erosionsschutz oder als Bewehrungsschicht verbaut werden.²⁹

Gleisschotter

Gleisschotter besteht aus hochwertigen Gesteinsarten wie Basalt, Quarzporphyr oder Grauwacke und weist aufgrund seiner kubischen Kornform eine hohe Scharfkantigkeit auf, wodurch er einen stabilen und stützenden Unterbau für das Gleisbett gewährleistet. Die Belastung des Gleisschotters durch eine hohe Dichte im Schienenverkehr reduziert mit der Zeit die ursprüngliche Scharfkantigkeit des Gleisschotters, und er verliert seine stützende Wirkung. Ebenso kommt es zu Anreicherungen von Verunreinigungen wie Abrieb von Rädern und Absplitterungen, Ladungsrückständen, Kohlenwasserstoffen aus Schmiermitteln oder aufgestiegenem Unterbaumaterial.

Um den Gleisschotter wieder gebrauchsfähig zu machen, werden die Steine gereinigt (gewaschen oder gesiebt) und in einer Prallmühle (oder einem Prallbrecher) den Anforde-

²⁸ Baggergutmanagement der Hansestadt Rostock, 2004. URL: http://www2.auf.uni-rostock.de/ll/baggergut/pdf/BM_HRO.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

²⁹ DredgDikes: Baggergut im Deich. URL: http://www.dredgdikes.eu/wp-content/uploads/DredgDikes_flyer_German.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

rungen entsprechenden wieder regeneriert, also kantig gemacht. Nach DIN-Norm EN 13450 liegt das Kornspektrum zwischen 31,5 bis 63 Millimetern.³⁰ Werden Korngrößen abriebbedingt unterschritten, ist eine Verwertung zu RC-Sand (0 bis 8 Millimeter), RC-Splitt (8 bis 22,4 Millimeter) oder als Unter-, Damm- und Wegebaumaterial möglich. Ein üblicher Verwendungszweck besteht in dem Verfüllen von Leitungsgräben, in der Bauwerkshinterfüllung sowie dem Einsatz als Abdeck- oder Füllsand im Garten- und Landschaftsbau. Ebenso wird nicht regenerierbarer Gleisschotter zu Edelsplitten weiterverarbeitet.



Abb. 4: Scharfkantiger Gleisschotter ³¹

³⁰ Bayerisches Landesamt für Umwelt: Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Gleisschotter, August 2010. URL: <http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/infoblaetter/gleisschotter.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

³¹ Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt

3.6 Gips

Gips ist ein Calciumsulfat und kommt in der Natur häufig in Form von Gipsstein vor. Ebenso fällt es bei verschiedenen chemischen Industrieverfahren als Nebenprodukt an. Den größten Gipsbedarf in Deutschland weist die Baubranche auf. Durchschnittlich werden sieben Millionen Tonnen Gipsprodukte hergestellt. Im Baubereich kommt Gips als Putz, Estrich oder in Form von Gipsplatten zum Einsatz. Die Eigenschaften von Gips, wie zum Beispiel die einfache Verarbeitbarkeit, ideale bautechnische Eigenschaften sowie gleichzeitig die geringen energetischen Kosten für die Herstellung, tragen dazu bei, dass die Anwendung von Gipsbauprodukten im Neubau und bei der Sanierung von Gebäuden zugenommen hat.

Einfache Verarbeitbarkeit, ideale bautechnische Eigenschaften sowie geringe energetische Kosten bei der Herstellung machen Gips zu einem beliebten Baumaterial.

Die erhöhte Popularität von Gips im Bau steigert in der Folge seinen Anteil im Bauschutt (derzeit wird von bis zu zehn Prozent Gipsanteil in den Baumassen ausgegangen)³², doch die Deponierung von Gips wird zunehmend erschwert. So heißt es in der geplanten Novellierung der Deponieverordnung zum Beispiel, dass „Gips ein wasserlösliches Material sei, welches bei kurzfristigem Wasserzutritt angelöst wird, bei hohem Anteil im Abfall die Reibungseigenschaften des Gemisches verändern kann und bei andauerndem periodischen Wasserzufluss, zum Beispiel aus Niederschlägen, langfristig vollständig aufgelöst wird.“

Insofern sei gipshaltiger Abfall, grundsätzlich weder funktional noch bautechnisch als Deponieersatzbaustoff geeignet.³³ Laut der Deutschen Gesellschaft für Abfallwirtschaft e. V. sind bei der Novellierung der rechtlichen Rahmenbedingungen zur Verwertung mineralischer Abfälle sowohl für diverse Schwermetalle als auch für Sulfat (Gips gehört zur Klasse der Sulfate) strengere Grenzwerte vorgesehen.³⁴

³² URL: http://www.abw-recycling.de/art/publik/Veroeffentlichungen_2012/Bauschutt%20ohne%20Gips.pdf, zuletzt abgerufen am 23.1.2014

³³ EUWID: Deponie-Novelle: Bundesrats-Umweltausschuss bringt Gips-Frage wieder ins Spiel, Januar 2013. URL: <http://www.euwid-recycling.de/news/politik/einzelansicht/Artikel/deponie-novelle-bundesrats-umweltausschuss-bringt-gips-frage-wieder-ins-spiel.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

³⁴ Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e. V.: Rohstoffe aus Abfällen – Rückgewinnung von Gips aus Gipsabfällen und synthetischen Gipsen. URL: http://www.dgaw.de/files/uploaded/100421_dgaw-arbeitspapier-rueckgewinnung-von-gips_1287067519.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Der Gips in einem Bauschuttgemisch zeigt tatsächlich mehrere negative Wirkungen. Zum einen kann er gelöst werden und Sulfat-Ionen in das Grundwasser abgeben, zum anderen kann der Gips als leicht wasserlöslicher, reaktiver Bestandteil mit Stoffen des Bauschutts oder mit Zement bei der Beton-Verarbeitung reagieren.³⁵ Die dadurch entstehenden Schäden im Bauwerk ziehen häufig den vollständigen Ausbau des Recyclingbaustoffs nach sich.

Trotzdem kann Gips grundsätzlich ohne Beeinträchtigung der Materialeigenschaften und der Qualität beliebig oft recycelt werden,³⁶ da das Ausgangsmaterial, aus dem Gipsbaustoffe hergestellt werden, und das Erhärtungsprodukt chemisch gesehen identisch sind. Der sortenreine Zustand des Materials bildet allerdings die Voraussetzung für einen funktionierenden Gipskreislauf und die damit verbundene Aufbereitung zur optimalen Wiederverwertung. Diese optimalen Bedingungen sind nur selten anzutreffen. So lassen sich in Gipsprodukten in der Regel Zusätze finden, in Gipsabfällen aus Abriss sind Verunreinigungen enthalten und in Bauschutt ist der Gips Teil des Gesamtgemisches.

In Skandinavien wurde ein Verfahren entwickelt, welches es erlaubt, Gips technisch und wirtschaftlich sehr effizient zu recyceln,³⁷ auch wenn der Prozess derzeit, je nach Region, immer noch doppelt so teuer ist wie die Deponierung von Gipsabfällen.³⁸ Das von der dänischen Firma „Gypsum Recycling International A/S“ entwickelte System befindet sich in vielen Ländern bereits erfolgreich im Einsatz und seit 2012 ist auch in Deutschland eine Pilot-Anlage in Kooperation mit den Dänen entstanden.

Voraussetzung für eine optimale Wiederverwertung von Gips ist der sortenreine Zustand, der leider nur selten anzutreffen ist.

³⁵ Müller, Anette: Das Sulfatproblem, aus: RECYCLING magazin 22, 2012, S. 26 – 29

³⁶ Meier, Rolf H.: Gips-Recycling senkt Abfallkosten, aus: Applica 13 – 14, 2007, S. 14 – 16

³⁷ Ebenda

³⁸ Schlupeck, Bernd: Weg von der Deponie, aus: RECYCLING magazin 22, 2012, S. 30

3.7 Holz

Zwar ist der nachwachsende Rohstoff Holz selbst hinsichtlich Entsorgung und Recycling unkritisch, jedoch stellen die vielfach eingesetzten Mittel zur Behandlung, zum Schutz und zur Farbgebung von Bauholz erhebliche Hürden für das werkstoffliche Recycling von Altholz aus dem Baubereich dar. Altholz wird daher entsprechend der Altholzverordnung in Deutschland in unterschiedliche Kategorien eingeteilt: unbehandeltes Holz, Holz, das verleimt, gestrichen, lackiert oder beschichtet ist, und Holz, das mit Holzschutzmittel behandelt wurde. Besonders problematisch für das Recycling ist dabei vor allem die Verwendung halogenorganischer Verbindungen in Beschichtungen oder Holzschutzmitteln.³⁹

Mittel zur Behandlung, zum Schutz und zur Farbgebung stellen erhebliche Hürden für das stoffliche Recycling dar. Besonders halogenorganische Verbindungen sind problematisch.

Altholz wird unmittelbar nach der Sammlung nach diesen Kategorien vorsortiert. Ebenso wird das Altholz von Rückständen anderer Materialien wie Glas, Beton, Mörtel, Dichtungen, Metallbeschlägen, Nägeln, Schrauben usw. befreit. Von den geschätzten sechs bis zehn Millionen Tonnen Altholz, die jährlich in Deutschland anfallen, werden derzeit fast ausschließlich naturbelassene oder nur mechanisch behandelte Althölzer einer stofflichen Verwertung zugeführt.

Da bei allen anderen Althölzern ohne eine aufwendige Untersuchung nicht festgestellt werden kann, ob dort halogenorganische Substanzen enthalten sind, werden diese unsortiert der thermischen Verwertung übergeben. Dies führt dazu, dass in Deutschland nicht mehr als ein Viertel des anfallenden Altholzes stofflich verwertet und der Rest in Biomasseanlagen und privaten Haushalten verbrannt wird. Die stoffliche Verwertung erfolgt in der Holzwerkstoffindustrie vor allem bei der Herstellung von Pressholzformteilen und Spanplatten.

Da die Nachfrage nach Holz sowohl als Bau- und Werkstoff als auch als Brennstoff weiter zunimmt, werden verschiedene Ansätze verfolgt, die Kaskadennutzung von Altholz, die zunächst ein stoffliches Recycling vorsieht, bevor das Material

³⁹ URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/index.html#BJNR330210002BJNE000201310>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

schließlich zur Energiegewinnung verbrannt wird, zu stärken.

In dem Demonstrator-Projekt „Altholzkaskade“ wird am Fraunhofer Institut für Holzforschung, und zwar am Wilhelm-Klauditz-Institut, WKI, in Zusammenarbeit mit weiteren Fraunhofer-Instituten an Verfahren und Technologien gearbeitet, die eine deutliche Steigerung der für stoffliche Verwertung nutzbaren Altholzmenge und gleichzeitig die Rückgewinnung der am Holz anhaftenden Kontaminationen ermöglichen. Um die Sortenreinheit der Rezyklate zu erhöhen, werden geeignete Detektionsmethoden sowie Verfahren zur Zerkleinerung, Trennung, Sortierung und Aufbereitung entwickelt. Ein Schwerpunkt liegt dabei auf Techniken zum Ablösen von Deckschichten, die den überwiegenden Teil der Kontaminationen enthalten. Ebenso wird der Einsatz von Online-Detektionsverfahren wie beispielsweise Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR), Ionen-Mobilitätsspektroskopie, laserinduzierter Spektroskopie und Massenspektrometrie erforscht, um kontaminierte Althölzer zu erkennen und zu separieren.

Mit diesen Verfahren können beispielsweise mineralische Kontaminierungen, Holzschutzmittel oder auch Metalle wie Mangan, Kupfer, Chrom oder Zinn erkannt werden. Altholz mit organischen Holzschutzmitteln kann nach erfolgreicher Detektion beispielsweise mit überkritischen Fluiden gereinigt werden. Schwermetalle können durch Verbrennungsprozesse oder Pyrolyseverfahren abgetrennt werden. Generell sollen die unterschiedlich behandelten Althölzer so aufbereitet und gereinigt werden, dass daraus zukünftig Kunststoffe, Klebstoffe, Cellulose, Basischemikalien und andere neue Produkte gewonnen werden können, auch wenn die entwickelten Verfahren und Technologien aktuell noch nicht wirtschaftlich nutzbar sind.^{40 41}

Forschung und Entwicklung zur Steigerung des hochwertigen Recyclings von Altholz werden auch im Rahmen internationaler Kooperationen betrieben. So arbeitet bei-

⁴⁰ Fraunhofer-Gesellschaft: Molecular Sorting – Szenarien für die Welt von Übermorgen, 2012, S. 5

⁴¹ Fraunhofer WKI: Jahresbericht 2011, 2012, S. 66

spielsweise Deutschland im Rahmen des europäischen WoodWisdom-Projekts „Demowood“ mit Frankreich und Finnland zusammen daran, die Mengen und Qualitäten von Altholz aus unterschiedlichen Quellen zu erfassen, um anschließend ermitteln zu können, welche dieser Kontingente so gereinigt werden können, dass sie in der Papier- oder Holzwerkstoffindustrie stofflich verwertet werden können.⁴²

Gemeinsam mit Partnern aus Forschung und Industrie in Polen und Deutschland arbeitet das Fraunhofer WKI im Rahmen des Kooperationsprojektes „ReGaP - Recycling of used Wood in Germany and Poland“ an Lösungen für eine bessere Trennung, Sortierung und Reinigung von Altholz, um die Quote der stofflichen Verwertung in beiden Ländern zu erhöhen.⁴³

3.8 Glas

Während beim Recycling von Hohlglas aus der Sammlung von Glasflaschen in entsprechenden Sammelcontainern in Deutschland hohe Recyclingquoten (85 Prozent im Jahr 2011) erzielt werden, gestaltet sich das Recycling von Flach- oder Floatglas aus Alt-Fenstern und demontierten Glasfassaden als schwieriger. Dies liegt zum einen daran, dass Fensterglas mittlerweile ein komplexer Hightechwerkstoff mit hohen Anforderungen an Reinheit, farbliche Kontrollierbarkeit und andere Eigenschaften darstellt, die Produkte aus dem Recycling genauso erfüllen müssen, wie primär produziertes Flachglas.

Zum anderen kann gebrauchtes Flachglas je nach ursprünglicher Anwendung im Bau gefärbt, beschichtet, bedruckt, emailliert oder mit Gasen gefüllt sein, was einen hohen Reinigungsaufwand bedeutet, um die genannten Anforderungen für die werkstoffliche Wiederverwertung in Fenstern oder Fassaden zu ermöglichen. Dieser verfahrenstechnische Aufwand ist derzeit kaum wirtschaftlich umzusetzen, so dass

⁴² Fraunhofer WKI: Jahresbericht 2011, 2012, S. 64

⁴³ Fraunhofer WKI: ReGap- Recycling of used wood in Germany and Poland. URL: <http://www.wki.fraunhofer.de/de/projekte/netzwerkprojekte/regap.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

recyceltes Flachglas für andere Anwendungen, aber nicht wieder für Fensterglas genutzt wird.⁴⁴ Weil Flachglas mit etwa 1.500 °C eine deutlich höhere Schmelztemperatur als Hohlglas aufweist, muss es getrennt davon gesammelt und verwertet werden.

Prinzipiell kann Altglas unter Einsatz moderner Sortier- und Aufbereitungstechniken beliebig oft eingeschmolzen und für die Herstellung neuer Glasprodukte eingesetzt werden. Neben der Einsparung von Rohstoffen wird durch den Einsatz von recyceltem Glas vor allem ein geringerer Energiebedarf bei der Glasschmelze erreicht. Je zehn Prozentpunkte eingesetzter Altscherben reduziert sich der Energieaufwand um circa 2,5 Prozent.⁴⁵ Dies trifft ebenso für die Flachglasproduktion zu. Auch dort ist ein Anteil von 20 bis 30 Prozent Flachglasscherben aus technischen und energetischen Gründen sinnvoll. Aufgrund der hohen Reinheitsanforderungen kommen hier aber fast ausschließlich Scherben aus der Produktion, die von den Glasherstellern und der glasverarbeitenden Industrie selbst in besonders sauberen Behältern sortenrein gesammelt werden, zum Einsatz. Dagegen wird Altglas aus demontierten Altfenstern für andere Recycling-Produkte wie Hohlglas, Glaswolle, Gasperlen oder auch Glasbausteine und Dämmstoffe verwendet. Allerdings arbeiten Recycler und Hersteller von Floatglas an Verfahren, mit denen der Anteil von gesammeltem und sortiertem Altflachglas auch bei der Flachglasherstellung erhöht werden kann.^{46, 47}

Durch den Einsatz von recyceltem Glas können neben Rohstoffen auch je 10 Prozentpunkten eingesetzter Altscherben 2,5 Prozent Energie eingespart werden.

Eine Möglichkeit der Nutzung von recyceltem Glas im Baubereich liegt in der Herstellung von Glasschaum-Granulat zur Wärmedämmung. Dazu wird Altglas zu einem Glasmehl vermahlen und mit einem natürlichen Blähmittel zu einem geschlossenporigen Granulat aufgebacken. Die circa

⁴⁴ Recycling von Glas. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fenster-und-Tueren_Recycling-von-Glas_155383.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁴⁵ Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse) e. V.: Deutschland steigert Glasrecyclingquote auf 85 Prozent. URL: <http://www.bvse.de/13/6310/Deutschland%20steigert%20Glasrecyclingquote%20auf%2085%20Prozent>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁴⁶ Zweckverband Abfallverwertung Reutlingen Tübingen (ZAV): Flachglas. URL: <http://www.zav-rt-tue.de/index.php?id=98>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁴⁷ Fachverband Glasrecycling (bvse): 9. Flachglasrecycling. URL: http://www.bvse.de/342/498/9_Flachglasrecycling, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

fünf Zentimeter großen Stücke bieten eine hohe Tragfähigkeit, gute Dämmeigenschaften und sind beständig gegen Alterung, Frost sowie chemische und biologische Einflüsse. Das Granulat kann beispielsweise zur Dämmung unter der Bodenplatte eingesetzt werden. Dabei übernimmt das Recyclingmaterial gleich mehrere Funktionen, die sonst mit einem mehrlagigen Aufbau mit Sauberkeitsschicht, Drainageschicht und Frostriegel mit unterschiedlichen Baustoffen realisiert werden.⁴⁸

Durch den zunehmenden Ausbau von Photovoltaikanlagen zur umweltschonenden Energiegewinnung ergibt sich ein neues und stark wachsendes Anwendungsfeld für qualitativ hochwertiges Flachglas. Je nach eingesetzter Technologie verfügen Photovoltaik-Module über einen Glasanteil von 75 bis 90 Prozent (bezogen auf das Gewicht). Prinzipiell kann dieses Glas bei der Demontage gebrauchter Module gesammelt und dem Flachglasrecycling zugeführt werden. Umgekehrt sind die Anforderungen an recyceltes Glas für die Verwendung in Photovoltaikanlagen noch höher als für gewöhnliches Bauglas. Dies betrifft insbesondere die hohen Transmissionseigenschaften, die beim Einsatz in Solarmodulen erfüllt werden müssen. Problematisch sind dabei häufig Verunreinigungen von Eisen, das schon in sehr geringen Mengen die Lichttransmission erheblich beeinträchtigt. Forscher am Fraunhofer Institut für Silicatforschung ISC in Würzburg arbeiten gemeinsam mit Partnern der Fraunhofer Projektgruppe für Wertstoffkreisläufe und Ressourcenstrategie IWKS an Verfahren, die es ermöglichen, bei der Aufbereitung in der Glasschmelze Eisen auf molekularer Ebene vom Glas zu trennen bzw. in eine Form umzuwandeln, die die Lichtdurchlässigkeit nicht mehr negativ beeinflusst.⁴⁹

Bei der Verwendung in Photovoltaikanlagen sind die Anforderungen an recyceltes Glas noch höher als bei gewöhnlichem Bauglas.

⁴⁸ Dämmstoff aus Recycling-Glas. URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2007/1677.php4>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁴⁹ Fraunhofer-Gesellschaft: Molecular Sorting – Szenarien für die Welt von Übermorgen, 2012, S. 5

3.9 Kunststoffe

Der mit Abstand wichtigste Kunststoff für die Bauindustrie ist Polyvinylchlorid (PVC). Etwa 60 Prozent der jährlichen PVC-Produktion gehen in Produkte für Bauanwendungen, vor allem Fensterrahmen, Rohre, Kabelisolierungen, Bodenbeläge und Dachbahnen. Die europäische PVC-Industrie hat im Rahmen der freiwilligen Selbstverpflichtungsinitiative „Vinyl 2010“ eine europaweite Infrastruktur für die Sammlung und das Recycling von PVC aufgebaut und die Recyclingkapazitäten kontinuierlich gesteigert. Seit Juni 2011 werden die Nachhaltigkeits- und Recyclingziele der europäischen PVC-Hersteller in der Initiative „VinylPlus“ weiterverfolgt. Die eingesetzten Verfahren in den verschiedenen Verwertungsanlagen sind sich grundsätzlich ähnlich und basieren auf der Zerkleinerung, Vermahlung und Sortierung des Ausgangsmaterials zu einem PVC-Pulver, das dann als Granulat wieder für die Herstellung unterschiedlicher PVC-Produkte verwendet werden kann.^{50,51}

Nach Angaben im aktuellen Jahresbericht von „VinylPlus“ wurden im Jahr 2012 in Europa gut 362.000 Tonnen PVC recycelt. Die jährliche Recyclingmenge soll weiter kontinuierlich gesteigert werden und im Jahr 2020 800.000 Tonnen erreichen. Davon sollen 100.000 Tonnen durch neuartige Technologien verarbeitet werden, mit denen auch PVC-Anwendungen für die Rückgewinnung erschlossen werden können, für die es bislang noch keine Recyclinglösungen gibt.⁵²

Ein solches neues Verfahren ist beispielsweise VinyLoop[®], das von dem gleichnamigen Unternehmen, einer Kooperation des PVC-Produzenten SolVin und Serge Ferrari, dem führenden Produzenten von PVC-Mischmembranen in Frankreich, entwickelt und eingesetzt wird. Dabei wird das Abfallmaterial (zum Beispiel Kabelisolierungen) in ein

2012 wurden 362.000
Tonnen PVC recycelt.
Bis 2020 soll die
Menge auf 800.000
Tonnen gesteigert
werden.

⁵⁰ Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (AGPU) e. V: PVC-Recycling- Die Erfolgsgeschichte. URL: <http://www.agpu.com/recycling.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁵¹ Europäische PVC-Industrie startet neue Nachhaltigkeits-Selbstverpflichtung. URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/0982.php4>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁵² VinylPlus: Progress Report 2013. URL: http://www.vinylplus.eu/uploads/Progress%20report%202013/VinylPlus_-_AR2012_-_LONG_-_V17.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

spezielles Lösemittel gegeben, das das PVC selektiv löst, so dass alle Verunreinigungen herausgefiltert werden können. Anschließend wird das PVC wieder chemisch ausgefällt und getrocknet. Auch das Lösemittel wird zurückgewonnen und für den Prozess wiedergenutzt. Mit diesem Verfahren wird ein PVC-Rezyklat erhalten, dessen Reinheitsgrad und Qualität mit denen von primär produziertem PVC vergleichbar sind.⁵³

Voraussetzung für das werkstoffliche Recycling von PVC-Produkten im Bauwesen ist der getrennte Rückbau der betreffenden Fenster, Bodenbeläge usw. im Rahmen von Abbruch oder Sanierungen sowie deren Transport zu geeigneten Recyclinganlagen.

PVC-Fensterrahmen

Kunststofffenster aus PVC-Profilen können nicht nur bei Modernisierungsmaßnahmen, sondern auch vor Abrissen ausgebaut, gesammelt und dem werkstofflichen Recycling zugeführt werden. 2002 haben sich die führenden Kunststoffprofilhersteller in Deutschland zur Rewindo zusammengeschlossen, mit dem Ziel, die Rücklaufmenge ausgebauter PVC-Fenster, -Türen und -Rollläden zu steigern, ein bundesweit organisiertes Sammelsystem aufzubauen und das Material so aufzubereiten, dass daraus neue Profile hergestellt werden können.⁵⁴

Für 2011 hat die Consultic Marketing & Industrieberatung im Auftrag von Rewindo ein Bruttopotenzial von PVC aus Alt-Fenstern und -Rollläden von 35.400 Tonnen in Deutschland ermittelt. Wird berücksichtigt, dass nicht alle Fenster vor dem Abriss demontiert werden und dass die Fenster in einigen Fällen direkt als Recycling-Produkt (zum Beispiel in Garagen) genutzt werden oder der Transport aufgrund der weiten Entfernung nicht wirtschaftlich verläuft, ergibt sich daraus eine erfassbare verfügbare Menge von 24.780 Tonnen.

⁵³ The VinyLoop: Benchmarking of the environmental impact of PVC compound recycled in the VinyLoop process with PVC compound produced in conventional route (virgin PVC compound and incineration). URL: <http://pieweb.plasteurope.com/members/pdf/p221881b.PDF>. zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁵⁴ <http://www.rewindo.de/>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Daraus wurden von den Rewindo-Recyclingpartnern Tönsmeier Kunststoffe und VEKA Umwelttechnik 19.100 Tonnen PVC-Recyclat hergestellt, was einer Recyclingquote von 76 Prozent entspricht, bezogen auf die erfassbare verfügbare Menge, beziehungsweise 54 Prozent, bezogen auf das Brutpotenzial.⁵⁵

Ausgebaute Fenster werden in den Recyclinganlagen zunächst vollständig geschreddert. Glas, Metalle und Mörtelreste werden dann in speziellen Abscheidern aus dem Materialstrom abgetrennt. Das PVC-Grobmahlgut wird in einer Schneidmühle auf Korngrößen von wenigen Millimetern zerkleinert und durchläuft anschließend verschiedene Trenn- und Aufbereitungsprozesse. Zum Schluss wird das so gereinigte PVC-Pulver erhitzt und durch ein Sieb gepresst, so dass ein sortenreines PVC-Granulat entsteht, das wieder für den Einsatz in Fensterprofilen genutzt werden kann. Dabei wird das wiedergewonnene PVC als Rezyklatkern in das Profil eingebracht, der außen mit neu produziertem PVC ummantelt wird. Solche Fensterrahmen mit Recyclatkern werden mittlerweile von allen großen Kunststofffensterherstellern angeboten.⁵⁶



Abb. 5: Kunststoff-Fensterprofile mit Recyclat ⁵⁷

⁵⁵ Rewindo: Kunststofffenster-Recycling in Zahlen 2011

⁵⁶ Rewindo GmbH: Neue Werte aus alten Fenstern. URL: <http://www.rewindo.de/rewindo-recycling-ziele/index.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁵⁷ Quelle: Rewindo GmbH

PVC-Bodenbeläge

Gebrauchte PVC-Bodenbeläge können ausgebaut, gesammelt und zu einem Rezyklat verarbeitet werden, das wieder in die Produktion von Fußbodenbelägen einfließt. Die Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (AgPR) betreibt dazu ein bundesweites Netz von Annahmestellen und eine Recyclinganlage in Troisdorf. Das Recyclingverfahren stellt hohe Anforderungen an die Sortierung des Eingangsmaterials. So können nur homogene PVC-Beläge sowie solche, die aus einer PVC-Nutzschicht und einer PVC-Trägerschicht oder PVC-Schaum bestehen, verarbeitet werden. PVC-Beläge, die mit anderen Schaummaterialien, Fasern oder Filzen verbunden sind oder Metalle enthalten, sind nicht geeignet. Das Material darf auch nicht verpresst sein, anhaftende Estrich- und Klebstoffrückstände stellen hingegen kein Problem dar, sie werden im Prozess abgetrennt. Die sortierten PVC-Bodenbeläge werden zunächst zu etwa 30 Millimeter großen Chips zerkleinert, von Verunreinigungen befreit und schließlich zu einem Pulver mit Korngrößen kleiner 400 umgemahlen. Das Rezyklat besteht nicht aus reinem PVC, sondern enthält auch noch Weichmacher und Füllstoffe, so dass es in erster Linie bei der Produktion neuer PVC-Bodenbeläge eingesetzt werden kann.⁵⁸

Häufig sind weiche PVC-Materialien, wie sie in Fußbodenbelägen verwendet werden, mit anderen Kunststofffolien oder Geweben verbunden, deren Abtrennung eine zusätzliche Herausforderung für das werkstoffliche Recycling von PVC darstellt. So befasst sich etwa die HEMAWE Fertigungstechnik GmbH in ihrem Technikum vorwiegend mit der Untersuchung und Verarbeitung von PVC-Folien mit Gewebeeinlage. Dazu wird das Material zunächst in einem Schredder und nachfolgend in einer Schneidmühle auf eine Körnung von vier bis zehn Millimeter zerkleinert. In einem mehrstufigen Prozess mit Siebmaschinen mit verschiedenen Lochungen, Sichern und Trenntischen wird das PVC

⁵⁸ Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (AgPR). URL: <http://www.agpr.de/cms/website.php.zuletzt> abgerufen am 23.01.2014

vom Fasergewebe getrennt. Derzeit kann das Unternehmen mit seinen Anlagen im Monat etwa 100 Tonnen an Fußbodenbelägen, Dachbahnen oder auch Schwimmbadfolien und Lkw-Planen verarbeiten und trennen. Der Trennungsgrad hängt dabei von der Zusammensetzung des jeweiligen Materials ab.⁵⁹

Faserverstärkte Kunststoffe

Verbundwerkstoffe mit Kunststoffmatrix und eingebetteten Glas- oder Kohlenstofffasern (GFK bzw. CFK) werden auch für Anwendungen in Architektur und Bauwesen immer interessanter. Neben den hohen mechanischen Festigkeiten bei niedrigem Gewicht und der guten Beständigkeit gegen Korrosion und Ermüdung spielen dabei ebenso die vielfältigen architektonischen Gestaltungsmöglichkeiten dieser modernen Leichtbauwerkstoffe eine Rolle. Aus GFK-Bauteilen können Fassaden oder auch Brücken einschließlich Fahrbahn gebaut werden, CFK können beispielsweise als Zug- und Spannglieder im Brückenbau zum Einsatz kommen.⁶⁰

Ein hochwertiges werkstoffliches Recycling von Faserverbundwerkstoffen ist technologisch sehr anspruchsvoll und erst in Ansätzen realisiert. Insbesondere die Trennung der mit hohem Energieaufwand hergestellten Fasern vom Matrixmaterial stellt dabei eine große technologische Herausforderung dar. 2011 hat die CFK Valley Stade Recycling GmbH & Co. KG in Wischhafen die erste industrielle Recyclinganlage in Betrieb genommen, mit der aus CFK-Abfällen durch ein pyrolysebasiertes Verfahren Sekundärfasern für die Wiederverwertung in Faserverbundwerkstoffen gewonnen werden.⁶¹ Chemische Verfahren, die diese Trennung von Fasern und Matrixmaterial durch den Einsatz spezieller Lösemittel erreichen, befinden sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Da die Nutzung von GFK und CFK

Technologisch ist das werkstoffliche Recycling von Faserverbundstoffen sehr anspruchsvoll, vor allem die Trennung der Fasern vom Matrixmaterial stellt eine große Herausforderung dar.

⁵⁹ HEMAWE-Technikum: Technikum /PVC-Verbundstofftrennung. URL: <http://www.hemawe.de/html/technikum.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁶⁰ Knippers, Jan et al.: Faserverbundwerkstoffe in Architektur und Bauwesen, aus: Themenheft Forschung Nr. 3: Leichtbau, 2007, S. 58 – 69

⁶¹ K Zeitung online: Startschuss für neue CFK-Recyclinganlage, 02.04.2012. URL: www.kzeitung.de/Startschuss+fuer+neue+CFK-Recyclinganlage/150/1085/35048/, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

im Bauwesen noch nicht sehr verbreitet ist und die Verweildauern in Bauanwendungen länger sind als zum Beispiel in Autos, wird die Entwicklung von Recyclingtechnologien für faserverstärkte Kunststoffe wohl eher durch andere Anwendungsbranchen vorangetrieben.

3.10 Metalle

Das Recycling von Metallen ist in vielen Fällen technisch gut realisierbar und meist mit deutlichen Einsparungen bei den Kosten und dem Energiebedarf verbunden. So wird beispielsweise Baustahl zu 99 Prozent recycelt beziehungsweise wiederverwendet.⁶² Dies gilt sowohl für Stahlträger, -bleche und -rohre aus dem Stahlbau als auch für den Bewehrungsstahl im Stahlbeton. Mit Hilfe von Magneten kann Stahl gut aus der Abbruchmasse von Gebäuden und anderen Bauwerken getrennt und gesammelt werden.

Besonders ressourceneffizient fällt die direkte Wiederverwendung demontierter Stahlbauteile nach der Nutzung in neuen Bauwerken aus. Etwa elf Prozent der gesammelten Baustähle werden heute bereits direkt an anderer Stelle wiederverwendet.⁶³ Dies wird vor allem bei Parkhäusern und teilweise auch bei Brückenkonstruktionen umgesetzt. Um die Reaktivierung von Stahlbauteilen auch auf den Hallen- und Geschossbau auszudehnen, besteht noch Bedarf an einer stärkeren Typisierung der verwendeten Träger, damit sie gezielt einem neuen Einsatzbereich zugeführt werden können. Der Rest wird als Sekundärrohstoff für die Herstellung neuer Stahlprodukte eingesetzt. Dabei kann der neu hergestellte Stahl auch eine höhere Festigkeit aufweisen als das recycelte Material.⁶⁴ Die Energie- und Ressourceneffizienz der entsprechenden Recyclingprozesse wird immer weiter verbessert. So hat etwa Siemens ein neues Verfahren zur Herstellung von Rohstahl aus Stahlschrott im Elektro-Lichtbogenofen entwickelt. Dabei wird die entstehende

⁶² Bauformstahl: Umwelt-Produktdeklaration Baustähle Erläuterungen, S. 11

⁶³ Ebenda

⁶⁴ Bauformstahl: Nachhaltiges Bauen. URL: <http://www.bauformstahl.de/nachhaltigkeit>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Schlacke aufgeschäumt und sorgt so für eine thermische Isolierung zwischen der Stahlschmelze und der Ofenwand. Eine automatische Steuerung gewährleistet, dass Stahlbad und Lichtbogen immer gleichmäßig mit der Schaumslagge bedeckt sind und so am wenigsten Energie verloren wird.⁶⁵

Am Beispiel von Kupfer wird deutlich, welche Rolle das hochwertige Recycling im Baubereich als Rohstoffquelle zukünftig spielen wird. Etwa 39 Prozent der weltweit produzierten Kupfermenge kommen im Bauwesen zum Einsatz.⁶⁶ Dabei ist zu bedenken, dass schätzungsweise 90 Prozent des vom Menschen gewonnenen Kupfers heute noch in Gebrauch sind.⁶⁷ Somit hat sich in Infrastruktur und Bauwerken bereits ein erheblicher anthropogener Bestand an Kupfer angesammelt, der im Sinne des „Urban Minings“ als „Lagerstätten“ angesehen werden kann.

Da kupferhaltige Abfälle eine ähnliche Kupferkonzentration wie Kupfererze aufweisen, kann daraus geschlossen werden, dass auch für die Wiedergewinnung von Sekundärkupfer ein ähnlich hoher Aufwand wie für die Gewinnung des primären Rohstoffs erforderlich ist.⁶⁸ Um zu entscheiden, mit welchen Technologien diese Rückgewinnung möglichst effizient und umfassend durchgeführt werden kann, ist eine detaillierte Kenntnis der Zusammensetzung solcher anthropogener Lager durch eine Kombination unterschiedlicher Ansätze und Informationsquellen erforderlich. Diese neue Form der Lagerforschung befindet sich noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Eine wichtige Rolle spielt dabei zum Beispiel die wissenschaftliche Begleitung von Gebäuderückbauprojekten. So wurde etwa im Projekt „EnBa“ von Wissenschaftlern der TU Wien für einige exemplarische Gebäude die stoffliche Zusammensetzung auf Bauteilebene bestimmt. Aus solchen Daten soll

Etwa 90 Prozent des von Menschen gewonnenen Kupfers ist heute noch in Gebrauch.

⁶⁵ Siemens: Recycling von Stahl wird umweltfreundlicher. URL: <http://www.siemens.com/innovation/de/news/2010/recycling-von-stahl-wird-umweltfreundlicher.htm>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁶⁶ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven, 2008, S. 5

⁶⁷ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven, 2008, S. 7

⁶⁸ Rechberger, Helmut/Clement, David: Urban Mining – städtebauliche Rohstoff-Potenziale aus: Zukunftspotential Bauwirtschaft, Schach, R. (Hrsg.): Reprogress GmbH, Dresden, 2011, S. 212

dann auf den Bestand zurückgerechnet werden. Dabei werden auch potenzielle Schadstoffbelastungen von Bauteilen erfasst.⁶⁹

3.11 Dämmmaterial

Aufgrund stetig wachsender Energiekosten und angetrieben durch öffentliche Förderprogramme werden nicht nur Neubauten, sondern auch immer mehr Altimmobilien mit Wärmedämmung ausgerüstet. Laut Gesamtverband der Dämmstoffindustrie wurden im Jahr 2005 über 24 Millionen Kubikmeter Dämmstoffe in Deutschland verkauft. Davon entfielen 54,6 Prozent auf Mineralwolle-Dämmstoffe und 30,5 Prozent auf Hartschaumdämmstoffe aus expandiertem Polystyrol (EPS), auch bekannt unter dem Produktnamen Styropor. Andere Dämmstoffe wie Vakuumisulationspaneele oder Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen spielen am Markt bislang nur eine untergeordnete Rolle.⁷⁰

Mineralwolle

Unter der Bezeichnung Mineralwolle werden Dämmstoffe aus Stein- und aus Glaswolle zusammengefasst. Seit dem Jahr 2000 sind Herstellung, Vertrieb und Verwendung von Mineralwolle-Dämmstoffen, die krebserregende Fasern freisetzen können, verboten. Da die genaue Zusammensetzung älterer Dämmungen in der Regel unklar ist, müssen bei deren Rückbau und Entsorgung entsprechende Sicherheitsmaßnahmen eingehalten werden.⁷¹

Neuere Mineralwolle-Dämmungen sind prinzipiell recycelbar. In den letzten Jahren haben die großen Mineralwolle-Hersteller damit begonnen, Rücknahmesysteme aufzubauen, wobei sich diese zunächst auf saubere Baustellenreste beziehen.⁷² Aufgrund der überwiegend minerali-

⁶⁹ Rechberger, Helmut/Clement, David: Urban Mining- städtebauliche Rohstoff-Potenziale aus: Zukunftspotential Bauwirtschaft, Schach, R. (Hrsg.): Repregress GmbH, Dresden, 2011, S. 214

⁷⁰ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Dämmstoffe. URL: <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁷¹ URL: <http://www.wingisonline.de/wingisonline/default.aspx?PROGRUNR=053205-00&TYP=INFO&DETAIL=1279>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁷² Baunetz Wissen Nachhaltiges Bauen: Entsorgung und Recycling von Steinwolle. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Nachhaltig_Bauen-Entsorgung-und-Recycling-von-Steinwolle_725656.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

schen Struktur ist vor allem Steinwolle nicht thermisch verwertbar. Für ein stoffliches Recycling ist die Entwicklung geeigneter Verfahren erforderlich.

So hat die hessische Firma Woolrec mit Fördermitteln des BMUB die erste Anlage zur Verwertung von Mineralfasern gebaut, die überwiegend aus Abfällen beim Bauabrisse stammen. In dem dort eingesetzten Recyclingverfahren werden die Mineralfasern zunächst in zwei Stufen zu Mineralfasermehl zerkleinert. Anschließend erfolgt die Entfernung von metallischen Rückständen und weiteren Reststoffen. Das Mehl wird dann durch Einkapselung in eine sichere Matrix zu einem Granulat weiterverarbeitet, das in der Ziegelherstellung eingesetzt werden kann. Als Beimischung im Tonteig verbrennt das Granulat beim Brennvorgang und führt so zur gewünschten Porosität der Ziegel. Durch eine geplante Erweiterung der Anlage sollen künftig auch die bei der Mineralfaserverwertung anfallenden Störstoffe wie Plastikfolien und Metalldraht einer stofflichen Verwertung zugeführt werden.⁷³

Am Institut für Angewandte Bauforschung Weimar (IAB) wird ein Verfahren entwickelt, mit dem Mineralwolle-Abfälle unter Einsatz der Mikrowellentechnologie umweltgerecht recycelt und verwertet werden können. Die entstehenden Schlacken sollen als Füllstoff in Baustoffen genutzt oder zu einem Mineralwolle-Leichtgranulat weiterverarbeitet werden.⁷⁴

Expandiertes Polystyrol (Styropor)

Gebäudefassaden werden heute zu einem großen Teil durch Wärmedämmverbundsysteme (WDVS) gedämmt. Dabei werden Dämmplatten direkt auf das Mauerwerk beziehungsweise auf den Außenputz bei der Altbausanierung aufge-

⁷³ Baunet Wissen Dämmstoffe: Recycling von Mineralfasern. URL: http://www.baunetwissen.de/standardartikel/Daemmstoffe-Recycling-von-Mineralfasern_770352.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁷⁴ DasErste.de: Dämmstoff-Recycling. URL: <http://www.daserste.de/information/ratgeber-service/bauen-wohnen/sendung/wdr/2012/daemmstoff-recycling-100.html>, nicht mehr online. URL einer Webseiten-Kopie: <https://web.archive.org/web/20120603034331/http://www.daserste.de/information/ratgeber-service/bauen-wohnen/sendung/wdr/2012/daemmstoff-recycling-100.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

klebt oder gedübelt und darüber ein Armierungsmörtel mit eingebettetem Gewebe aufgebracht. Laut Fachverband WDVS werden auf diese Weise in Deutschland jedes Jahr rund 40 Millionen Quadratmeter Dämmmaterial verbaut, wobei die durchschnittliche Dämmstoffdicke von knapp 80 Millimeter im Jahr 2000 auf aktuell knapp 125 Millimeter kontinuierlich zugenommen hat. Mit einem Anteil von 76,1 Prozent kommt dabei expandiertes Polystyrol (EPS) mit Abstand am häufigsten zum Einsatz.⁷⁵ Dies liegt vor allem daran, dass dieses Material im Vergleich zu anderen Dämmstoffen am preiswertesten ist. Das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) gibt für die Lebensdauer von fachgerecht ausgeführten Wärmedämmverbundsystemen eine Größenordnung von 40 bis 60 Jahren an.⁷⁶

Derzeit gibt es praktisch kein Recyclingverfahren, das eine hochwertige Wiederverwertung von Polystyrol-Dämmungen ermöglicht. Neben fehlenden Verfahren zur Herstellung von wieder als Dämmstoff oder Verpackungsmaterial einsetzbarem reexpandiertem Polystyrol liegt ein zentrales Problem in der sehr aufwendigen Sammlung von EPS-Abfällen. Die geringe Schüttdichte (circa $6,5 \text{ kg/m}^3$ ⁷⁷)⁷⁸ bzw. hohe Porosität (98 Prozent) führt zu extrem hohen spezifischen Transportkosten von der Rückbaustelle zur Recyclinganlage. Durch Zerkleinern kann das Volumen um einen Faktor Zwei bis Drei reduziert werden. Wird das zerkleinerte Material anschließend verpresst, kann eine Volumenreduktion auf insgesamt ein Zehntel erreicht werden. Dies wird bereits an einigen Sammelstellen für EPS-Müll durchgeführt.⁷⁹ Ein weiteres Problem stellt die Verunreinigung mit im Baubereich üblichen bromhaltigen Flammenschutzverbindungen dar.

Hohe spezifische Transportkosten können durch Zerkleinerung und Verpressung stark reduziert werden.

⁷⁵ WDV Systeme: Branchendaten. URL: <http://www.heizkosten-einsparen.de/views/presse/branchendaten/index.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁷⁶ Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): Wärmedämmung von Außenwänden mit dem Wärmedämmverbundsystem, November 2012, S. 8

⁷⁷ Der Zahlenwert stammt von der Interseroh AG und bezieht sich auf gesammeltes Material mit einer nicht näher definierten Größenverteilung

⁷⁸ CreaCycle GmbH: Recycling von expandiertem Polystyrol (EPS) – Transportkosteneinsparung durch Auflösen. URL: <http://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/9-transportkosteneinsparung-durch-aufloesen.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁷⁹ CreaCycle GmbH: Recycling von expandiertem Polystyrol (EPS) EPS-Kreislauf heute. URL: <http://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/11-eps-kreislauf-heute.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

Eine Möglichkeit, das Volumen von EPS-Abfällen weiter zu reduzieren und das Material einem hochwertigen Recycling zuzuführen, besteht bei lösemittelbasierten Verfahren. Dazu hat die CreaCycle GmbH gemeinsam mit dem Fraunhofer Institut IVV den sogenannten CreaSolv[®]-Prozess entwickelt. Das Verfahren beruht auf einer selektiven Extraktion des zu recycelnden Polystyrols aus einer Lösung. Durch das selektive Lösen von zerkleinerten EPS-Abfällen in einem eigens entwickelten Lösemittel wird zunächst eine weitere Volumenreduktion (Faktor Drei bis Vier) erreicht, was sich positiv auf Kosten und Energieeinsatz für den Transport auswirkt. In der Recyclinganlage wird dann die Lösung von Fremd- und Störstoffen gereinigt. Anschließend wird das Polystyrol durch Zugabe spezieller Fällungsformulierungen ausgefällt und getrocknet. Das derart wiedergewonnene Material ist so rein, dass es wieder aufgeschäumt und als Dämmstoff oder auch in anderen Anwendungen eingesetzt werden kann. Auch toxische Substanzen wie zum Beispiel bromierte Flammenschutzadditive können auf diese Weise effektiv abgetrennt und in entsprechende Recyclingprozesse überführt werden. Da die eingesetzten Lösungsmittelformulierungen im Kreislauf gefahren werden, sind die erforderlichen Lösungsmittelmengen im Verhältnis zum verarbeiteten Material gering.

Derzeit wird im Rahmen eines BMBF-geförderten Projekts eine Pilotanlage für den CreaSolv[®]-Prozess mit einer Kapazität von 500 Jahrestonnen am IVV in Betrieb genommen.^{80,81,82}

Ende 2012 startete ein Forschungsprojekt, das unter anderem durch den Fachverband Wärmedämm-Verbundsysteme und den Industrieverband Hartschaum (IVH) initiiert wur-

⁸⁰ CreaCycle GmbH: Transportkosteneinsparung durch Auflösen. URL: <http://www.creacycle.de/TransportkosteneinsparungdurchAuflösenQ0id-9-34Q0lang-german.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸¹ CreaCycle GmbH: Der CreaSolv Prozess. URL: <http://www.creacycle.de/DerCreaSolvProzessQ0id-20-38Q0lang-german.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸² CreaCycle GmbH: Der CreaSolv Prozess Pilotanlage. URL: <http://www.creacycle.de/PilotanlageQ0id-13-43Q0lang-german.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

de, mit folgenden Zielen, die sich vor allem auf EPS-basierte WDVS konzentrieren:

- „Erstellen einer Übersicht abgeschlossener oder derzeit laufender Forschungsprojekte auf dem Gebiet der Verwertung/Nachnutzung von Bauprodukten zur Ermittlung möglicher Synergien;
- Schaffung von Transparenz über die Menge rückzubauender WDVS und derzeitige Handhabung (Verschmutzungsgrad, Sammellogistik usw.);
- Ermitteln wirtschaftlich sinnvoller Möglichkeiten der sortenreinen Trennung und Wiederverwertung von WDVS-Bestandteilen;
- Kostenermittlung für eine Wiederverwertung oder ein Downcycling als Bestandteil der Lebenszyklusanalyse.“⁸³

Für die spätere Umsetzung ist die Entwicklung einer Fräse geplant, mit der sich Putz, Gewebe und EPS beim Rückbau voneinander trennen lassen. Während Putz und Gewebe als Zuschlagstoff im Straßenbau wiederverwertet werden können, sollen die EPS-Platten noch vor Ort mit einem mobilen System in den Ausgangsstoff Styrol umgewandelt werden, was einer Volumenreduktion von 1 : 50 entspräche.⁸⁴

Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen

Dazu zählen Dämmstoffe aus Holzfasern, Kork, Kokosfaser, Schaf- und Baumwolle. In jüngerer Zeit wird zunehmend versucht, durch den heimischen Anbau von Faserpflanzen wie Flachs oder Hanf weitere nachwachsende Rohstoffe für Dämmstoffe bereitzustellen. Neben solchen landwirtschaft-

⁸³ Pressemeldung vom 16.11.2012: Recycling-Forschungsprojekt gestartet. URL: <http://www.heizkosten-einsparen.de/content/application/database/press/1/0/110/text-147-recyclingprojekt-gestartet.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸⁴ Pressemeldung vom 16.11.2012: Recycling-Forschungsprojekt gestartet. URL: <http://www.heizkosten-einsparen.de/content/application/database/press/1/0/110/text-147-recyclingprojekt-gestartet.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

lich erzeugten Produkten sind aber auch biogene Recyclingmaterialien (Zellulose) sowie Schwachholz und landwirtschaftliche Nebenprodukte (Stroh), von denen große Mengen zur Verfügung stehen, für die Nutzung als natürliche Dämmstoffe interessant.

Praktische Erfahrungen mit dem Recycling und der Entsorgung biogener Dämmstoffe bestehen bisher kaum. Da diese derzeit nur einen Anteil von etwa drei Prozent des Dämmstoffmarktes ausmachen, sind mittelfristig eine getrennte Sammlung und ein hochwertiges Recycling kaum realisierbar. Aufgrund der häufig eingesetzten Zusätze zum Brand- und Insektenschutz sind biogene Dämmstoffe nicht einfach kompostierbar.⁸⁵ Eine thermische Verwertung zur Energiegewinnung ist hingegen für alle genannten Dämmstoffe aus nachwachsenden Rohstoffen möglich.

4. Übergeordnete Ansätze für ein hochwertiges Recycling

Hochwertiges Recycling von Abbruchmaterialien ist nur möglich, wenn schon beim Abriss durch einen kontrollierten, selektiven Rückbau die unterschiedlichen Abfallstoffe getrennt gesammelt und den entsprechenden Recycling-Stoffströmen zugeführt werden. Von zentraler Bedeutung sind daher eine weitere Optimierung und konsequente Umsetzung selektiver Rückbaukonzepte. Dies bildet auch die Grundvoraussetzung für die Entwicklung neuer Ansätze zur Wiederverwendung von Bauteilen, die laut europäischer Abfallrahmenrichtlinie noch höher zu bewerten ist als das stoffliche Recycling. Die Förderrichtlinie „r³ - Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien“ schlägt im Rahmen der Konkretisierung der Hightechstrategie 2020 der Bundesregierung im Bedarfswelt Klima/Energie als vordringliche Forschungs- und Entwicklungsaspekte unter anderem vor, zur Gewinnung von Wertstoffen aus dem Rückbau von Infrastrukturen In-

⁸⁵ Forum Nachhaltiges Bauen: Biogene Dämmstoffe - Ökobilanz. URL: <http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Biogene%20D%C3%A4mmstoffe>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

formationssysteme zu entwickeln, die in einem rohstoffbezogenen Gebäudepass oder in einem Rohstoffkataster die verwendeten Wertstoffe beim Bau einer Infrastruktur dokumentieren.⁸⁶

Die japanische Firma Taisei Coroporation zeigt beispielsweise, wie der Gebäudeabriss von Hochhäusern leiser, sauberer und energiesparender durchgeführt werden kann.⁸⁷ Im Inneren des Gebäudes werden Spezialkräne eingesetzt, die beim Absenken von Abrissmaterial Strom erzeugen, ähnlich der Energierückgewinnung bei Elektrofahrzeugen. Auf diese Weise wird die Lageenergie der Massen in großen Höhen beim Herunterlassen auf Bodenniveau zurückgewonnen, um zum Beispiel andere Geräte zu betreiben und den Abrissvorgang energiesparender zu gestalten. Gleichzeitig werden die nichtstrukturellen Gebäudeteile sukzessive von Hand entfernt und dem Recycling zugeführt. Etagenweise wird ein Hochhaus auf diese Weise, beginnend mit dem obersten Stockwerk, zurückgebaut. Die Betreiber sprechen von einer „Demontage-Fabrik im Gebäude“ und reduzieren mit ihrer Abrissmethode, einer Kombination aus Material-Recycling vor Ort und stromerzeugenden Kränen, den CO₂-Ausstoß und die Lärmbelastung um bis zu 90 Prozent. Die größten Vorteile dieser Methode liegen gegenüber der klassischen Vorgehensweise mit Abrissbirne und Abrissbagger vor allem in dicht bebauten Gebieten.

Eine Innovative Gebäudeabriss-Methode aus Japan reduziert den CO₂- Ausstoß und die Lärmbelastung um 90 Prozent.

Anthropogene Rohstoffe, also solche, die bereits von Menschen genutzt wurden, stellen in Zukunft eine wichtige Ressource dar. Johann Fellner vom Institut für Wassergüte, Ressourcenmanagement und Abfallwirtschaft an der TU Wien geht davon aus, dass „derzeit etwa genauso viele Rohstoffe in Verwendung sind, wie es noch bekannte, abbaubare Primärressourcen gibt“⁸⁸. Während Lagerstätten

⁸⁶ Wallner, Barbara: Rohstoffe, von Menschen gemacht, aus: DER STANDARD, 07.11.2012. URL:<http://derstandard.at/1350260526535/Rohstoffe-von-Menschen-gemacht>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸⁷ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Strategische Metalle und Mineralien. URL: <http://www.bmbf.de/foerderungen/15444.php>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸⁸ Pichler, Thomas: Hochhaus-Abriss wird leiser und energiesparender. URL: http://www.innovations-report.de/html/berichte/architektur_bauwesen/hochhaus_abriss_leiser_energiesparender_20_8115.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

und Abbaumethoden für Primärressourcen gut erforscht seien, gelte dies für anthropogene Ressourcen nicht, weshalb ein neues Labor der österreichischen Christian Doppler Forschungsgesellschaft diesen Rückstand aufholen soll.

Für die erste von vier Fallstudien, die sich dem Ressourcenpotenzial von Bauwerken und Infrastruktur widmet, schildert Fellner das zentrale Problem wie folgt: „Darauf, dass auch Gebäude eine begrenzte Lebensdauer haben, wird beim Bau nur sehr selten Rücksicht genommen.“⁸⁹ Im Vergleich zu älteren Gebäuden besäßen modernere einen höheren Materialwert. Allerdings ist es aufgrund der Verarbeitung in modernen Gebäuden schwieriger, diese Baumaterialien voneinander zu trennen. Erforscht werden sollen die Bedingungen und das Maß der Rückgewinnung von Rohstoffen aus Abbruchprojekten unter ökonomischen Gesichtspunkten.⁹⁰

Um Entscheidungen hinsichtlich der nachhaltigsten Verwertungsmöglichkeit getrennt erfasster Abbruchmaterialien zu treffen, sind umfassende Ökobilanzen von der Rohstoffgewinnung über die Nutzung bis zur Verwertung notwendig. Für alle relevanten Abfallstoffe, die hier betrachtet werden, werden mittlerweile solche Ansätze der Ökobilanzierung verfolgt. Dabei fällt häufig auf, dass sich die Energie- und Kostenaufwendungen für den Transport sortenrein gesammelter Abbruchmaterialien zu den oft weit entfernten hoch spezialisierten Verwertungsanlagen besonders negativ auf die Gesamtbilanz auswirken.⁹¹ Dies ist in Zukunft noch stärker zu berücksichtigen und in die Entwicklung von Recyclingkonzepten mit einzubeziehen.

Aus dem Straßenbau ist bereits bekannt, wie Altmaterial (hier der Asphalt aus dem Straßenbruch) „in situ“ rezykliert werden kann. Auch bei bestimmten Sanierungsvorgän-

Die Nachhaltigkeit von Verwertungsmöglichkeiten lässt sich mit Hilfe umfassender Ökobilanzen bewerten.

⁸⁹ Wallner, Barbara: Rohstoffe, von Menschen gemacht, aus: DER STANDARD, 07.11.2012. URL:<http://derstandard.at/1350260526535/Rohstoffe-von-Menschen-gemacht>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁹⁰ Ebenda.

⁹¹ Holcim AG: Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton, S. 59. URL: http://www.iip.kit.edu/downloads/Holcim_Forschungsbericht_dt_2011.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

gen werden das Abtragen von Altmaterialien, die Erneuerung und das erneute Auftragen des gereinigten Materials häufig vor Ort durchgeführt. „Fahrende Recycling-Anlagen“ könnten in Zukunft in einigen Einsatzbereichen die Rezyklierung direkt vor Ort durchführen und somit den Transport von Alt- und Neumaterial minimieren, die Logistik vereinfachen und in Teilbereichen Recycling-Vorgänge wirtschaftlicher gestalten.

Eine weitere Erhöhung der Verwertungsquoten und eine Steigerung insbesondere der hochwertigen Recyclinganteile können durch technologische Entwicklungen und neue Methoden der Detektion, Sortierung und Trennung erzielt werden. Beispiele hierfür sind die Entwicklung spektroskopischer Verfahren zur differenzierten Erfassung behandelter Althölzer oder Ansätze zum Einsatz optoelektronischer Systeme zur Sortierung von Sanitärkeramik und Ziegelschutt. Bei der Aufbereitung von kunststoffbasierten Bauabfällen wie PVC-Fensterrahmen und -Bodenbelägen, Wärmedämmverbundsystemen und faserverstärkten Kunststoffen besteht noch großes Entwicklungspotenzial bei lösemittelbasierten Verfahren zur Trennung des gewünschten Recyclingmaterials von Verunreinigungen unterschiedlichster Art.

Da der Bausektor zu den ressourcenintensiven Wirtschaftssektoren gehört und zudem sehr langlebige Investitionsgüter produziert, muss ein übergeordnetes Interesse bestehen, bereits heute durch entsprechende Forschung und Entwicklung die Grundlagen für ein hochwertiges Recycling zu legen. Ebenso ist es notwendig, vorhandenes Wissen konsequent in die Praxis umzusetzen, um die bereits verbauten Rohstoffe sowie alle zukünftig zu verbauenden Ressourcen im Wirtschaftskreislauf zu behalten und zukünftigen Generationen zur Verfügung zu stellen.

5. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Anfall mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010 (© Kreislaufwirtschaft-Bau.de)⁶

Abb. 2: Einflüsse von Betonzusatzmitteln auf die Nachhaltigkeit von Beton¹⁹

Abb. 3: Anfall und Verbleib der mineralischen Bauabfallfraktion Boden und Steine im Jahr 2010 (© Kreislaufwirtschaft-Bau.de)²⁵

Abb. 4: Scharfkantiger Gleisschotter³¹

Abb. 5: Kunststoff-Fensterprofile mit Recyclat⁵⁷

6. Fußnotenverzeichnis

¹ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgResS) – Programm zur nachhaltigen Nutzung und zum Schutz der natürlichen Ressourcen, Mai 2012. URL: http://www.bmu.de/fileadmin/bmu-import/files/pdfs/allgemein/application/pdf/progress_bf.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

² Agenda 21: Konferenz der Vereinten Nationen für Umwelt und Entwicklung, Rio de Janeiro, Juni 1992. URL: http://www.un.org/Depts/german/conf/agenda21/agenda_21.pdf, abgerufen am 23.01.2014

³ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2008 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008, S. 10. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_7.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁴ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, S. 6. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁵ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010, S. 14

⁶ Ebenda

⁷ Amtsblatt der Europäischen Union: Richtlinie 2008/98/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien. URL: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2008:312:0003:0030:DE:PDF>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (BMUB): Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen oder das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzstoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material vom 31.10.2012. URL: http://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Bodenschutz/entw_mantelverordnung.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁹ Fraunhofer Kompakt: Baumaterialien wiederverwerten: Betonrecycling, 01.10.2012. URL: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹⁰ Ebenda

¹¹ Fraunhofer Gesellschaft: Blitz, schlag' ein!, Oktober 2012. URL: <http://www.fraunhofer.de/de/presse/presseinformationen/2012/oktober/blitz-schlag-ein.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹² InformationsZentrum Beton: Recycling-Beton – Wiederaufbereitung von Bauteilen und Abbruchmaterialien. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Beton-Recycling-Beton_930267.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹³ Breit, Wolfgang: RC-Beton und die Anforderungen an die RC-Gesteinkörnung, Technische Universität Kaiserslautern, Oktober 2010. URL: <http://www.ifeu.de/abfallwirtschaft/pdf/Breit.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹⁴ Brandenburgische Technische Universität (BTU) Cottbus: Ökologische Prozessbetrachtung – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen), November 2011. URL: http://www.tu-cottbus.de/fakultaet4/fileadmin/uploads/altlasten/files/bauliches_recycling/RC-Beton-Stofffluss-Energieaufwand-101102.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

¹⁵ Ministerium für Umwelt, Naturschutz und Verkehr Baden-Württemberg: RC-Beton im Baubereich – Informationen für Bauherren, Planer und Unternehmen. URL: http://www.um.baden-wuerttemberg.de/servlet/is/103603/Broschuere_RC-Beton.pdf?command=downloadContent&filename=Broschuere_RC-Beton.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

- ¹⁶ Reuscher, Günter et al.: Mehr Wohlstand – weniger Ressourcen, aus Zukünftige Technologien Consulting Nr. 94, Düsseldorf, 2012
- ¹⁷ InformationsZentrum Beton GmbH: Das grüne Buch vom Beton – Gute Argumente für nachhaltiges Bauen, 2009
- ¹⁸ Sika Service AG: Sika Beton Handbuch, Mai 2013, S. 16 – 21
- ¹⁹ Sika Services AG (Hrsg.), 2013, Sika Beton Handbuch (Deutsche Version Sika Schweiz AG, Ausgabe 05/2013). URL: http://che.sika.com/de/solutions_products/informationen_ch/beton.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²⁰ Abbruch und Recycling – Einsatzmöglichkeiten für recycelten Mauerwerksbruch. URL: <http://www.tbe-euro.com/de/clc-recycling/recycling-other.asp>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²¹ Martens, Hans: Recyclingtechnik: Fachbuch für Lehre und Praxis, 2011, Spektrum Akademischer Verlag
- ²² Deutscher Asphaltverband (DAV) e.V.: Asphaltproduktion in Deutschland, Juni 2012. URL: <http://www.asphalt.de/media/exe/198/c49b8c0d0ee9ee0d747e210a117ec79a/asphalt-2011.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²³ Mollenhauer, Konrad: Wohin mit unseren verbrauchten Straßen? Asphalt-Recycling im Europäischen Kontext, 2010. URL: https://www.tu-braunschweig.de/Medien-DB/isbs/01_04_mollenhauer.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²⁴ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, S. 6. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²⁵ Kreislaufwirtschaft Bau: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2010 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2010, S. 6. URL: http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/Arge/KWB_8.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²⁶ Keßler, Hermann: Auswertung der Studie: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine- und Erdenindustrie bis 2030 in Deutschland, 2013, Umweltbundesamt
- ²⁷ Hafentaubentechnische Gesellschaft: Umgang mit Baggergut. URL: http://www.htg-baggergut.de/Downloads/BG_Position_HTG.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²⁸ Baggergutmanagement der Hansestadt Rostock, 2004. URL: http://www2.auf.uni-rostock.de/ll/baggergut/pdf/BM_HRO.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ²⁹ DredgDikes: Baggergut im Deich. URL: http://www.dredgdikes.eu/wp-content/uploads/DredgDikes_flyer_German.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ³⁰ Bayerisches Landesamt für Umwelt: Anforderungen an die Verwertung und Beseitigung von Gleisschotter, August 2010. URL: <http://www.abfallratgeber.bayern.de/publikationen/doc/infoblaetter/gleisschotter.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ³¹ Quelle: Bayerisches Landesamt für Umwelt
- ³² URL: http://www.abw-recycling.de/art/publik/Veroeffentlichungen_2012/Bauschutt%20ohne%20Gips.pdf, zuletzt abgerufen am 23.1.2014
- ³³ EUWID: Deponie-Novelle: Bundesrats-Umweltausschuss bringt Gips-Frage wieder ins Spiel, Januar 2013. URL: <http://www.euwid-recycling.de/news/politik/einzelansicht/Artikel/deponie-novelle-bundesrats-umweltausschuss-bringt-gips-frage-wieder-ins-spiel.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ³⁴ Deutsche Gesellschaft für Abfallwirtschaft e. V.: Rohstoffe aus Abfällen – Rückgewinnung von Gips aus Gipsabfällen und synthetischen Gipsen. URL: http://www.dgaw.de/files/uploaded/100421_dgaw-arbeitspapier-rueckgewinnung-von-gips_1287067519.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ³⁵ Müller, Anette: Das Sulfatproblem, aus: RECYCLING magazin 22, 2012, S. 26 – 29
- ³⁶ Meier, Rolf H.: Gips-Recycling senkt Abfallkosten, aus: Applicia 13 – 14, 2007, S. 14 – 16
- ³⁷ Ebenda
- ³⁸ Schlupeck, Bernd: Weg von der Deponie, aus: RECYCLING magazin 22, 2012, S. 30
- ³⁹ URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/altholzv/index.html#BJNR330210002BJNE000201310>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

- ⁴⁰ Fraunhofer-Gesellschaft: Molecular Sorting – Szenarien für die Welt von Übermorgen, 2012, S. 5
- ⁴¹ Fraunhofer WKI: Jahresbericht 2011, 2012, S. 66
- ⁴² Fraunhofer WKI: Jahresbericht 2011, 2012, S. 64
- ⁴³ Fraunhofer WKI: ReGap- Recycling of used wood in Germany and Poland. URL: <http://www.wki.fraunhofer.de/de/projekte/netzwerkprojekte/regap.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁴⁴ Recycling von Glas. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Fenster-und-Tueren_Recycling-von-Glas_155383.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁴⁵ Bundesverband Sekundärrohstoffe und Entsorgung (bvse) e. V.: Deutschland steigert Glasrecyclingquote auf 85 Prozent. URL: <http://www.bvse.de/13/6310/Deutschland%20steigert%20Glasrecyclingquote%20auf%2085%20Prozent>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁴⁶ Zweckverband Abfallverwertung Reutlingen Tübingen (ZAV): Flachgas. URL: <http://www.zav-rt-tue.de/index.php?id=98>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁴⁷ Fachverband Glasrecycling (bvse): 9. Flachglasrecycling. URL: http://www.bvse.de/342/498/9_Flachglasrecycling, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁴⁸ Dämmstoff aus Recycling-Glas. URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2007/1677.php4>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁴⁹ Fraunhofer-Gesellschaft: Molecular Sorting – Szenarien für die Welt von Übermorgen, 2012, S. 5
- ⁵⁰ Arbeitsgemeinschaft PVC und Umwelt (AGPU) e. V.: PVC-Recycling- Die Erfolgsgeschichte. URL: <http://www.agpu.com/recycling.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵¹ Europäische PVC-Industrie startet neue Nachhaltigkeits-Selbstverpflichtung. URL: <http://www.baulinks.de/webplugin/2011/0982.php4>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵² VinylPlus: Progress Report 2013. URL: http://www.vinylplus.eu/uploads/Progress%20report%202013/VinylPlus_-_AR2012_-_LONG_-_V17.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵³ The VinylLoop: Benchmarking of the environmental impact of PVC compound recycled in the VenyLoop process with PVC compound produced in conventional route (virgin PVC compound and incineration). URL: <http://piweb.plasteurope.com/members/pdf/p221881b.PDF>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵⁴ <http://www.rewindo.de/>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵⁵ Rewindo: Kunststoffenster-Recycling in Zahlen 2011
- ⁵⁶ Rewindo GmbH: Neue Werte aus alten Fenstern. URL: <http://www.rewindo.de/rewindo-recycling-ziele/index.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵⁷ Quelle: Rewindo GmbH
- ⁵⁸ Arbeitsgemeinschaft PVC-Bodenbelag Recycling (AgPR). URL: <http://www.agpr.de/cms/website.php>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁵⁹ HEMAWE-Technikum: Technikum /PVC-Verbundstofftrennung. URL: <http://www.hemawe.de/html/technikum.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁶⁰ Knippers, Jan et al.: Faserverbundwerkstoffe in Architektur und Bauwesen, aus: Themenheft Forschung Nr. 3: Leichtbau, 2007, S. 58 – 69
- ⁶¹ K Zeitung online: Startschuss für neue CFK-Recyclinganlage, 02.04.2012. URL: www.k-zeitung.de/Startschuss+fuer+neue+CFK-Recyclinganlage/150/1085/35048/, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁶² Baumformstahl: Umwelt-Produktdeklaration Baustähle Erläuterungen, S. 11
- ⁶³ Ebenda
- ⁶⁴ Baumformstahl: Nachhaltiges Bauen. URL: <http://www.bauforumstahl.de/nachhaltigkeit>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁶⁵ Siemens: Recycling von Stahl wird umweltfreundlicher. URL: <http://www.siemens.com/innovation/de/news/2010/recycling-von-stahl-wird-umweltfreundlicher.htm>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁶⁶ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven, 2008, S. 5

- ⁶⁷ Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie: Kupfereffizienz – unerschlossene Potenziale, neue Perspektiven, 2008, S. 7
- ⁶⁸ Rechberger, Helmut/Clement, David: Urban Mining – städtebauliche Rohstoff-Potenziale aus: Zukunftspotential Bauwirtschaft, Schach, R. (Hrsg.): Reprogress GmbH, Dresden, 2011, S. 212
- ⁶⁹ Rechberger, Helmut/Clement, David: Urban Mining- städtebauliche Rohstoff-Potenziale aus: Zukunftspotential Bauwirtschaft, Schach, R. (Hrsg.): Reprogress GmbH, Dresden, 2011, S.214
- ⁷⁰ Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit: Dämmstoffe. URL: <http://www.wecobis.de/bauproduktgruppen/daemmstoffe.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷¹ URL: <http://www.wingisonline.de/wingisonline/default.aspx?PROGRUNR=053205-00&TYP=INFO&DETAIL=1279>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷² Baunetz Wissen Nachhaltiges Bauen: Entsorgung und Recycling von Steinwolle. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Nachhaltig_Bauen-Entsorgung-und-Recycling-von-Steinwolle_725656.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷³ Baunet Wissen Dämmstoffe: Recycling von Mineralfasern. URL: http://www.baunetzwissen.de/standardartikel/Daemmstoffe-Recycling-von-Mineralfasern_770352.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷⁴ DasErste.de: Dämmstoff-Recycling. URL:<http://www.daserste.de/information/ratgeber-service/bauen-wohnen/sendung/wdr/2012/daemmstoff-recycling-100.html>, nicht mehr online. URL einer Webseiten-Kopie: <https://web.archive.org/web/20120603034331/http://www.daserste.de/information/ratgeber-service/bauen-wohnen/sendung/wdr/2012/daemmstoff-recycling-100.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷⁵ WDV Systeme: Branchendaten. URL: <http://www.heizkosten-einsparen.de/views/presse/branchendaten/index.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷⁶ Hessisches Ministerium für Umwelt, Energie, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (Hrsg.): Wärmedämmung von Außenwänden mit dem Wärmedämmverbundsystem, November 2012, S. 8
- ⁷⁷ Der Zahlenwert stammt von der Interseroh AG und bezieht sich auf gesammeltes Material mit einer nicht näher definierten Größenverteilung
- ⁷⁸ CreaCycle GmbH: Recycling von expandiertem Polystyrol (EPS) – Transportkosteneinsparung durch Auflösen. URL: <http://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/9-transportkosteneinsparung-durch-aufloesen.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁷⁹ CreaCycle GmbH: Recycling von expandiertem Polystyrol (EPS) EPS-Kreislauf heute. URL: <http://www.creacycle.de/de/projekte/recycling-von-expandiertem-polystyrol-eps/11-eps-kreislauf-heute.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸⁰ CreaCycle GmbH: Transportkosteneinsparung durch Auflösen. URL: <http://www.creacycle.de/TransportkosteneinsparungdurchAuflösenQid-9-34Qqlang-german.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸¹ CreaCycle GmbH: Der CreaSolv Prozess. URL: <http://www.creacycle.de/DerCreaSolvProzessQid-20-38Qqlang-german.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸² CreaCycle GmbH: Der CreaSolv Prozess Politanlage. URL: <http://www.creacycle.de/PilotanlageQid-13-43Qqlang-german.html>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸³ Pressemeldung vom 16.11.2012: Recycling-Forschungsprojekt gestartet. URL: <http://www.heizkosten-einsparen.de/content/application/database/press/1/0/110/text-147-recycling-projekt-gestartet.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸⁴ Pressemeldung vom 16.11.2012: Recycling-Forschungsprojekt gestartet. URL: <http://www.heizkosten-einsparen.de/content/application/database/press/1/0/110/text-147-recycling-projekt-gestartet.pdf>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸⁵ Forum Nachhaltiges Bauen: Biogene Dämmstoffe – Ökobilanz. URL: <http://www.nachhaltiges-bauen.de/baustoffe/Biogene%20D%C3%A4mmstoffe>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014
- ⁸⁶ Bundesministerium für Bildung und Forschung: Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Strategische Metalle und Mineralien. URL: <http://www.bmbf.de/foerderungen/15444.php>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸⁷ Pichler, Thomas: Hochhaus-Abriss wird leiser und energiesparender. URL: http://www.innovations-report.de/html/berichte/architektur_bauwesen/hochhaus_abriss_leiser_energiesparender_20_8115.html, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸⁸ Wallner, Barbara: Rohstoffe, von Menschen gemacht, aus: DER STANDARD, 07.11.2012. URL:<http://derstandard.at/1350260526535/Rohstoffe-von-Menschen-gemacht>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁸⁹ Wallner, Barbara: Rohstoffe, von Menschen gemacht, aus: DER STANDARD, 07.11.2012. URL:<http://derstandard.at/1350260526535/Rohstoffe-von-Menschen-gemacht>, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

⁹⁰ Ebenda.

⁹¹ Holcim AG: Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton, S. 59. URL: http://www.iip.kit.edu/downloads/Holcim_Forschungsbericht_dt_2011.pdf, zuletzt abgerufen am 23.01.2014

VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)
Johannisstr. 5-6
10117 Berlin
Tel. +49 30-27 59 506-0
Fax +49 30-27 59 506-30
info@vdi-zre.de
www.ressource-deutschland.de

Im Auftrag des:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz,
Bau und Reaktorsicherheit



NATIONALE
KLIMASCHUTZ
INITIATIVE