ifeu -
Institut für Energie-
und Umweltforschung
Heidelberg GmbH

Optimierung des Stoffstrommanagements für gemischten Bauschutt (Bauschutt mit Anteilen an Mauerwerks-bruch)

im Auftrag des
Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg

Institut für Energie- und Umweltforschung GmbH, Heidelberg
Anton Diebel
Florian Knappe

Inhaltsverzeichnis

Seite

1 Hintergrund / Aufgabenstellung 1

2 Gemischter Bauschutt – abfallwirtschaftliche Relevanz 2

2.1 Das Aufkommen in Baden-Württemberg 2
2.2 Der Verbleib von mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg 3
2.3 Die Verwertung von mineralischen Bauabfällen in Recyclinganlagen 5
2.4 Gewonnene Erzeugnisse aus mineralischen Bauabfällen 6
2.5 Gemischter Bauschutt in seiner Zusammensetzung 7

3 Einsatzmöglichkeiten aus Sicht der bautechnischen Regelwerke 12

3.1 Verwertungsoptionen im Erdbau 13
3.1.1 Anforderungen 13
3.1.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche 15
3.1.3 Fazit 17
3.2 Einsatz in ungebundenen Schichten im Straßen- und Wegebau 17
3.2.1 Anforderungen 18
3.2.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche 21
3.2.3 Fazit 22
3.3 Einsatz in Pflasterdecken und Plattenbelägen 23
3.3.1 Anforderungen 23
3.3.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche 24
3.3.3 Fazit 25
3.4 Gebundene Schichten im Straßen- und Wegebau 26
3.4.1 Bituminös gebundene Schichten - Asphalt 26
3.4.2 Hydraulisch gebundene Schichten im Straßenbau 26
3.4.3 Schichten aus Beton im Straßenbau 28
3.5 Transportbeton zum Einsatz im Hochbau 31
3.5.1 Anforderungen 32
3.5.2 Fazit 36

4 Einsatzmöglichkeiten aus Sicht der umwelttechnischen Regelwerke 37

4.1 Rechtliche Situation 37
4.2 Randbedingungen für die Verwendung von Recyclingbaustoffe gemäß Ersatzbaustoffverordnung 38
4.2.1 Mögliche Einbauweisen für Recyclingbaustoffe gemäß der RC-Klassen 38
4.2.2 Abhängigkeit der Verwertbarkeit von Recyclingprodukten durch die Ersatzbaustoffverordnung 40
4.3 Relevante Parameter 42
4.4 Herkunft von Sulfat in Recyclingprodukten 44
4.5 Strategien zur Reduktion von Sulfat-Werten in RC-Produkten 46
4.6 Fazit 49

5		Situationsaufnahme Bauschuttrecycling	50
	5.1	Herstellung und Absatz von Produkten im ungebundenen Bereich	50
	5.2	Herstellung und Absatz im gebundenen Bereich	52
	5.3	Herstellung und Absatz von RC-Produkten - Schlussfolgerungen	53
6		Einsatzmöglichkeiten von Mauerwerksbruch – das Ideal	54
	6.1	Stoffstrommanagement mineralischer Bauabfälle	54
	6.2	Die Möglichkeiten für Mauerwerksschutt	56
	6.3	Die klassischen Hemmnisse	58
7		Fazit und Ausblick	60
8		Literatur	62
	8.1	Regelwerke	62
	8.2	Literaturverzeichnis	64
	8.3	Verzeichnis der befragten Recyclingbetriebe in Baden-Württemberg	65

Abbildungsverzeichnis

Seite

Abbildung 1: Aufkommen an mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg nach Abfallarten für die Jahre 1996 bis 2009 3

Abbildung 2: Verbleib von mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg für die Jahre 1996 bis 2009 4

Abbildung 3: Verwertung von mineralischen Bauabfällen in Recyclinganlagen in Baden-Württemberg im Zeitraum 1996 bis 2008 5

Abbildung 4: Gewonnene Erzeugnisse aus mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1996 bis 2009 6

Abbildung 5: Bandbreiten der stofflichen Zusammensetzung von Recyclingbaustoffen aus v.a. gemischtem Bauschutt 8

Abbildung 6: Mittlere stoffliche Zusammensetzung der Recyclingbaustoffe aus v.a. gemischtem Bauschutt 8

Abbildung 7: Hinterfüllungen von Arbeitsräumen bzw. Auffüllen der Resthohlräume von Baugruben 16

Abbildung 8: Aufstandskörper unter Fundament- und Bodenplatte 16

Abbildung 9: Verhältnis der umwelttechnischen und bauphysikalischen Anforderungen der gängigen Regelwerke für unterschiedliche Einsatzzwecke 40

Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Proben mit Werten über Z 1.1 / Z 1.2 / Z 2 des UM-Erlasses im Jahr 2006 42

Abbildung 11: Prozentualer Anteil der Proben mit Werten über RC-1 / RC-2 / RC-3 der Ersatzbaustoffverordnung im Jahr 2006 43

Abbildung 12: Verteilung des Sulfatgehaltes SO4- innerhalb der Fraktion 0/56 mm 47

Abbildung 13: Situation bei den Abnehmern von RC-Baustoffen 60

Tabellenverzeichnis

Seite

Tabelle 1:	Mittlere physikalische Eigenschaften der Komponenten eines aufbereiteten Hochbauschuttes	9
Tabelle 2:	Mittlere Widerstände gegen Schlagzertrümmerung von unterschiedlichen Ziegelgemischen (nach Kollar 2004)	10
Tabelle 3:	Physikalische Eigenschaften von RC-Produkten eines Recyclingherstellers für den Einsatz als Frostschutz- und Schottertragschicht im Straßenbau	11
Tabelle 4:	Mögliche Einsatzgebiete für RC-Bauprodukte mit höheren Anteilen an Mauerwerksgranulat	12
Tabelle 5:	Stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen und Böden mit Fremdbestandteilen im Erdbau	14
Tabelle 6:	Gemische aus gebrochenem Mauerwerk nach DIN EN 13285, Anhang A, Tabelle A.2	18
Tabelle 7:	Gemische aus gebrochenem aus gebrochenem Beton und Mauerwerk nach DIN EN 13285, Anhang A, Tabelle A.3	18
Tabelle 8:	Bauphysikalische Anforderungen an den Einsatz von RC-Materialien für ungebundene Schichten im Straßenbau gemäß TL SoB-StB 04	20
Tabelle 9:	Auswahl an bauphysikalischen Anforderungen an den Einsatz von RC-Materialien für Pflasterdecken und Plattenbeläge im Straßenbau gemäß TL Gestein-StB 04	23
Tabelle 10:	Rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07, Abschnitt 5.8	33
Tabelle 11:	Regelanforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620	34
Tabelle 12:	Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen größer 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%)	35
Tabelle 13:	Sulfatgehalte verschiedener Ausgangsmaterialien	45

1 Hintergrund / Aufgabenstellung

Wie zuletzt auch die Arbeit „Optimierung der Verwertung mineralischer Bauabfälle“ für das Umweltministerium Baden-Württemberg (IFEU 2010) gezeigt hat, wird offensichtlich ein erheblicher Anteil an gemischtem Bauschutt an Recyclinganlagen vorbei entsorgt. So deuten statistische Auswertungen darauf hin, dass in manchen Regionen aus dem Hochbauschutt fast ausschließlich Betonbruch über Recycling-Anlagen verwertet wird.

Die fehlende Akzeptanz der Recyclingunternehmer für den gemischten Bauschutt zeigte sich auch in den beiden Fachgesprächen, die dieses Projekt abschlossen. In vielen Fällen scheint die Strategie verfolgt zu werden, gemischten Bauschutt und damit hohe Anteile an Mauerwerksbruch im Inputmaterial möglichst nicht annehmen zu müssen.

Diese Strategie ist eine Reaktion auf die (vermeintlich) fehlende Akzeptanz bei den Kunden für RC-Bauprodukte, die (offensichtlich) Bestandteile aus Mauerwerksschutt aufweisen. Auf der anderen Seite kann nicht ausgeschlossen werden, dass bislang auch auf Seiten der Recyclingunternehmen die Bereitschaft fehlt, für diese eher problematischeren Inputmaterialien ein angepasstes Verwertungskonzept aufzubauen. Die mangelnde Beliebtheit des gemischten Bauschutts bei den Recyclingunternehmen ergibt sich auch aus (vermeintlich) fehlender bauphysikalischer Eignung des Materials sowie einer gegenüber reinem Betonbruch möglicherweise etwas höheren chemischen Belastung.

Bislang gab es zumindest in einigen Regionen offensichtlich ausreichende (und ausreichend kostengünstige) Entsorgungsmöglichkeiten an den Recyclinganlagen vorbei, auf die derartiger Bauschutt ausweichen konnte. Diese Randbedingungen werden sich jedoch mit der kommenden Mantelverordnung, die neben der Ersatzbaustoffverordnung auch eine Änderung der Bodenschutzverordnung mit sich bringen wird, sehr wahrscheinlich ändern.

Mit der Aufbereitung von gemischtem Bauschutt bzw. Mauerwerksbruch fallen zudem Stoffströme an, die sich nur schwer vermarkten bzw. entsorgen lassen. Es handelt sich hierbei vor allem um Vorsiebmaterial (Erdanhaftungen, gipshaltige Putze, etc.) und um den Brechsand, d.h. die nach der Aufbereitung mittels Backenbrecher oder Prallmühle verbleibende Feinfraktion. Je höher der Anteil Mauerwerksbruch im Inputmaterial, desto höher ist das Aufkommen an Brechsand. Frostschutzmaterial als typisches Produkt aus dem Bauschuttrecycling verträgt nur einen gewissen Anteil Feinmaterial, so dass tendenziell Überschussmassen entsorgt werden müssen. Gibt es hierfür keinen ausreichenden Absatzweg (bspw. Verfüllen von Leitungsgräben), wird eine teure Entsorgung über Deponien befürchtet.

Mit der vorliegenden Studie sollten die Absatzmöglichkeiten für RC-Baustoffe eruiert werden, die zumindest in Anteilen auf Mauerwerk als Ausgangsmaterial zurückgreifen. Ergaben sich aus Produktsicht Verwertungsoptionen, die bislang nicht oder wenig genutzt werden, galt es entsprechenden Strategien bspw. im Stoffstrommanagement d.h. im Umgang mit der Bauschuttmassen bzw. im Produktionsprozess aufzuzeigen.

2 Gemischter Bauschutt – abfallwirtschaftliche Relevanz

2.1 Das Aufkommen in Baden-Württemberg

Für das Aufkommen an gemischtem Bauschutt in Baden-Württemberg wurden für die vorliegende Studie Erhebungen des statistischen Landesamtes Baden-Württemberg (SLBW) aus „Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg“ im Stand vom September 2010 verwendet.

Nach dieser Quelle lässt sich das Aufkommen nur allgemein und zwar getrennt nach Bodenaushub und der Gesamtmenge an Bauschutt und Straßenaufbruch diskutieren. In den Statistiken werden nur die Mengen erfasst, die an definierten Senken d.h. bspw. Abfallentsorgungsanlagen angedient werden. Gerade das Aufkommen an Bodenaushub dürfte deshalb faktisch höher liegen. In der Abbildung 1 sind die Aufkommen an mineralischen Bauabfällen in Baden Württemberg im Zeitraum 1996 bis 2009 dargestellt.

Bei einer Einwohnerzahl von 10,8 Millionen in Baden-Württemberg, erreicht das Aufkommen an Bodenaushub knapp 2 Tonnen/(E*a), das Aufkommen an Bauschutt und Straßenaufbruch knapp 1 Tonne/(E*a).

Das gesamte Aufkommen an mineralischen Bauabfällen unterliegt den gängigen Schwankungen der Baukonjunktur. Das Aufkommen spiegelt aber auch die Art der Bautätigkeit wider.

Der über die Jahre zu verzeichnende deutliche Rückgang der Mengen an Bodenaushub dürfte sich auch aus der allgemein erkennbaren Verlagerung der Bautätigkeit in die Innerortslagen erklären lassen. Erdaushub fällt bspw. beim Ausschachten von Baugruben an. Erfolgt dies im Rahmen der Neuerschließung von Baugebieten, ist das Aufkommen deutlich höher als beim Bau in Innerortslagen. Der Bau in Innerortslagen erfolgt in der Regel auf bereits ehedem bebauten Grundstücken, so dass Erdbauarbeiten reduziert werden können.

Das Aufkommen an mineralischen Bauabfällen ist über die Jahre vergleichsweise konstant. Da zeitgleich die Baukonjunktur eher rückläufig war, deutet dies ebenfalls auf ein vermehrtes Bauen im Bestand hin. Im Gegensatz zum Bauen auf der „Grünen Wiese“ muss in Innerortslagen zunächst der Bestand an Altgebäuden entfernt werden. Mit

jeder Baustoffnachfrage ist deshalb zunächst die Notwendigkeit verbunden, abfallenden Bauschutt entsorgen zu müssen.

Dies gilt analog auch für den Straßenbau. Auch hier verlagert sich Bautätigkeit immer mehr in Richtung der Erhaltung und Ertüchtigung des Bestandes an Verkehrswegen.

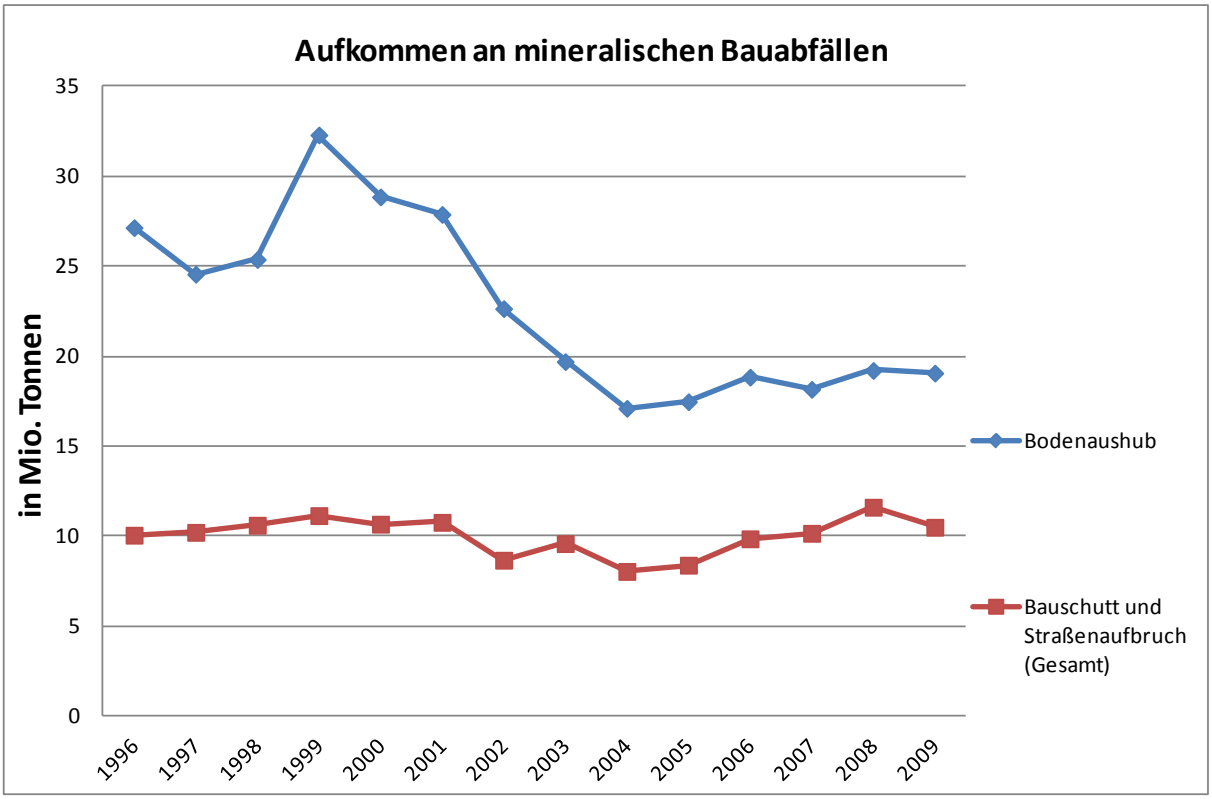

Abbildung 1: Aufkommen an mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg nach Abfallarten für die Jahre 1996 bis 2009

Im Jahr 2009 erreicht der Anteil an Bauschutt und Straßenaufbruch am Gesamtaufkommen etwa 35%. Durch zukünftig vermehrte Bautätigkeiten in urbanen Gebieten und damit im Bestand wird es zu einer weiteren Erhöhung des Aufkommens von Bauschutt und Straßenaufbruch kommen.

2.2 Der Verbleib von mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg

Dieses Aufkommen an mineralischen Bauabfällen gelangt in Baden-Württemberg in unterschiedliche Entsorgungswege (Verwertung bzw. Beseitigung). In der Abbildung 2 sind die Anteile der unterschiedlichen Entsorgungsmöglichkeiten für mineralische Bauabfälle dargestellt.

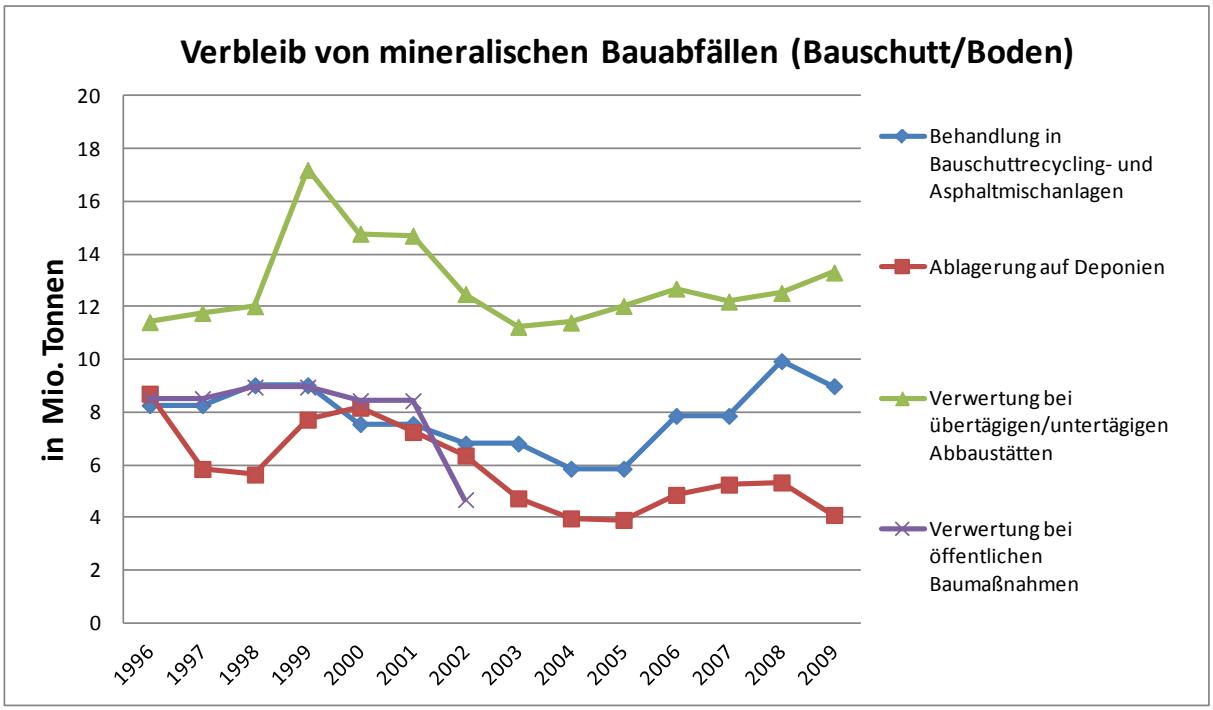

Abbildung 2: Verbleib von mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg für die Jahre 1996 bis 2009

[Anmerkung: Für Verwertungen bei öffentlichen Baumaßnahmen werden ab dem Jahr 2003 keine Daten mehr getrennt ausgewiesen]

Den höchsten Anteil an allen Entsorgungsmöglichkeiten hat die Verwertung in über-/untertägigen Abbaustätten (Gruben/Bergbau) mit im Mittel ca. 45%. Die Behandlung in RC-Anlagen hat mit im Mittel ca. 25% den zweithöchsten Anteil. Die Entsorgungsmöglichkeiten „Verwertung über öffentliche Baumaßnahmen“ sowie „Ablagerung auf Deponien“ haben jeweils im Mittel einen Anteil von ca. 20%. Diese Entsorgungsmöglichkeiten gelten sowohl für mineralische Bauabfälle in Form von Bodenaushub, als auch von Bauschutt.

Eine Zuordnung der einzelnen Fraktionen an mineralischen Bauabfällen zu den einzelnen Entsorgungs- bzw. Verwertungswegen ist mit den vorliegenden Daten des Statistischen Landesamtes nicht möglich. Die Gesamtmengen in Abbildung 1 und Abbildung 2 stimmen in etwa überein.

Es ist jedoch zu beachten, dass die Entsorgung von Böden vornehmlich über Gruben, Deponien sowie öffentliche Baumaßnahmen stattfindet. Über die Entsorgungsmöglichkeit „Behandlung in RC-Anlagen“ werden vornehmlich Bauschuttmassen und nur wenig Bodenaushub verwertet (siehe auch Abbildung 3).

Die Entwicklung der Anteile der Entsorgungswege zeigt seit dem Jahr 2004 eine leichte Zunahme von Entsorgungsmaßnahmen über Gruben/Bergbau, RC-Anlagen, sowie Deponien. In Zukunft werden jedoch – aufgrund schwindender Kapazitäten - weniger

mineralische Bauabfälle über Deponien oder Gruben entsorgt werden können. Ein Ausbau der Entsorgungsmöglichkeit „Behandlung in Recyclinganlagen“ wird somit immer wichtiger werden.

Bei der zunehmenden Verwertung von mineralischen Bauabfällen in RC-Anlagen müssen zukünftig noch mehr qualitativ hochwertige Erzeugnisse hergestellt werden.

2.3 Die Verwertung von mineralischen Bauabfällen in Recyclinganlagen

Die Entsorgung von mineralischen Bauabfällen findet u.a. über eine Verwertung in Recyclinganlagen statt. In den Anlagen werden die einzelnen Bauabfallbestandteile in sehr unterschiedlichen Anteilen verwertet. Die Abbildung 3 zeigt die Verteilung von min. Bauabfällen in RC-Anlagen für den Zeitraum 1996 bis 2008.

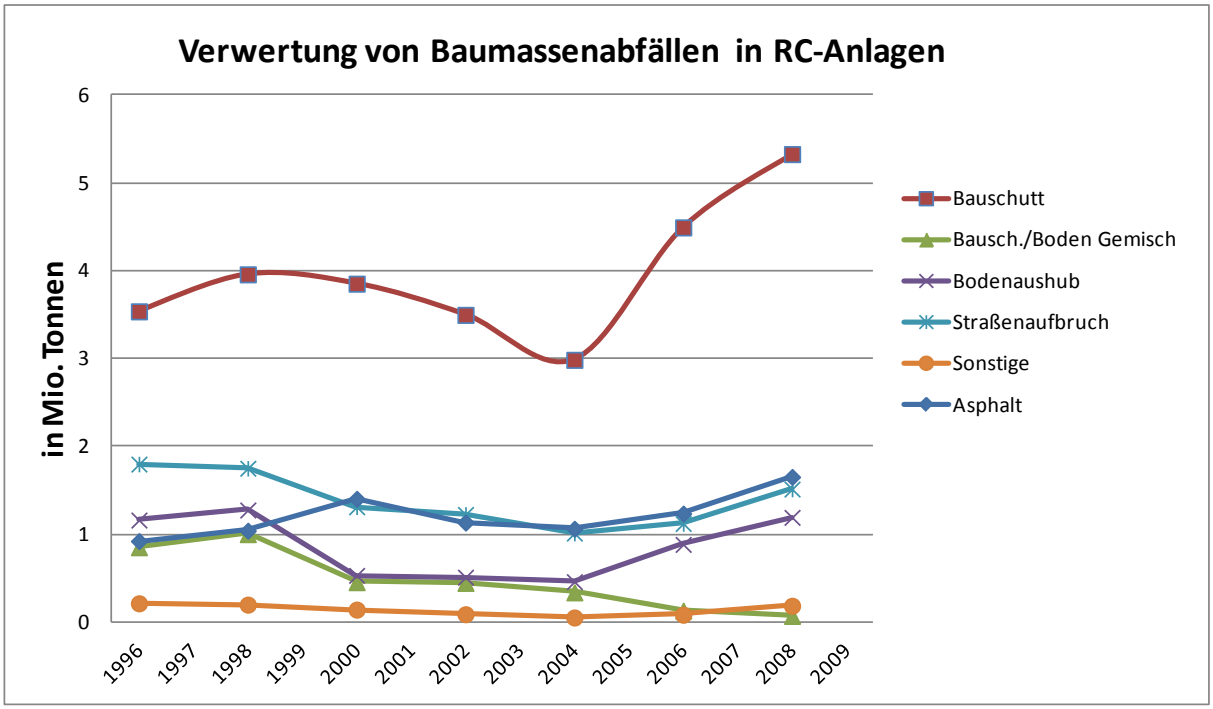

Abbildung 3: Verwertung von mineralischen Bauabfällen in Recyclinganlagen in Baden-Württemberg im Zeitraum 1996 bis 2008

Den größten Anteil an verwerteten Baumasseabfällen haben - mit im Mittel ca. 50% - die Bauschuttmassen. Die Massen an Straßenaufbruch sowie Asphaltbruch nehmen jeweils einen Anteil von im Mittel ca. 15% ein. Die Anteile der übrigen mineralischen Bauabfälle wie Bodenaushub, Gemische und Sonstige betragen zusammen im Mittel etwa 20%.

Die Entwicklung der Verwertung von Bauschuttmassen in RC-Anlagen nimmt in Baden-Württemberg seit 2004 stark zu, die von Asphalt, Straßenaufbruch sowie Bodenaushub nur leicht.

2.4 Gewonnene Erzeugnisse aus mineralischen Bauabfällen

Aus den in Recyclinganlagen verwerteten mineralischen Bauabfälle werden unterschiedliche Erzeugnisse gewonnen. In der Abbildung 4 sind die in Recyclinganlagen in Baden-Württemberg gewonnenen Erzeugnisse für den Zeitraum 200 bis 2008 dargestellt.

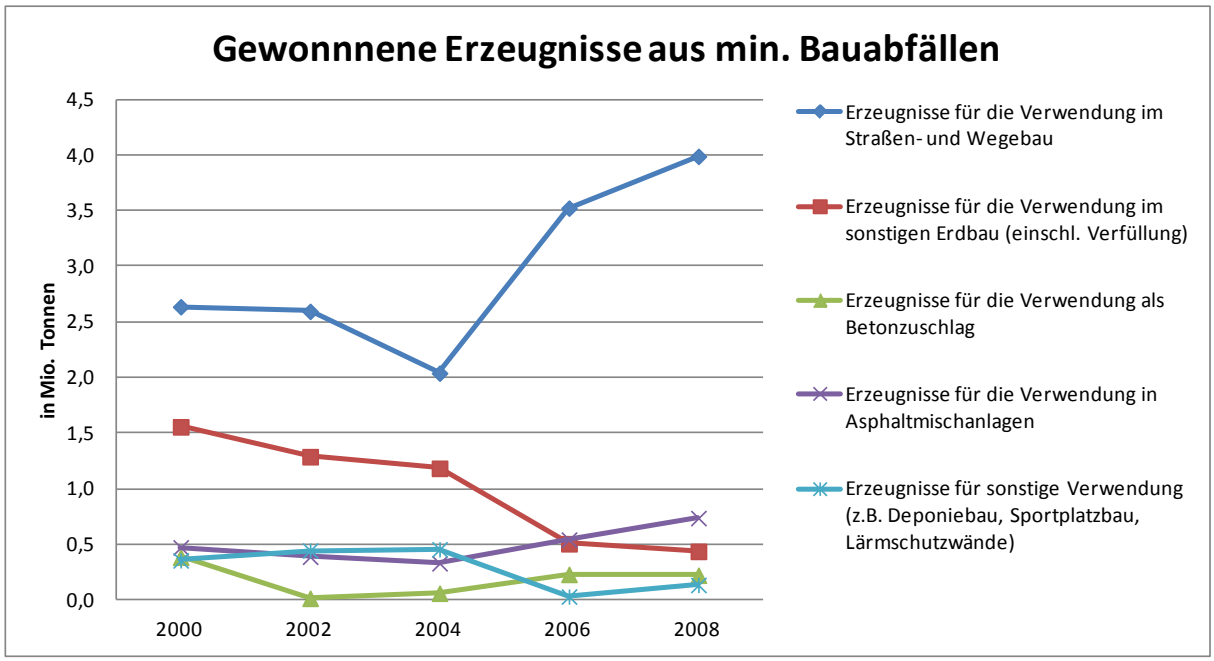

Abbildung 4: Gewonnene Erzeugnisse aus mineralischen Bauabfällen in Baden-Württemberg für den Zeitraum 1996 bis 2009

Der Anteil der gewonnenen oder hergestellten Erzeugnisse für eine Verwendung im Straßen- und Wegebau haben seit dem Jahr 2004 stark zugenommen. Der ehemals hohe Anteil an Erzeugnissen für eine Verwendung im sonstigen Erdbau nimmt seit Jahren stetig ab. Die übrigen Erzeugnisse für Verwendungen in Asphaltmischanlagen, als Betonzuschlag und sonstigen Anwendungen haben in dem betrachteten Zeitraum keine nennenswerte Änderung erfahren.

2.5 Gemischter Bauschutt in seiner Zusammensetzung

Eine typische Zusammensetzung von Hochbauschutt existiert nicht. Die Zusammensetzung der Baurestmassen ergibt sich unmittelbar aus der stofflichen Zusammensetzung des abzubrechenden bzw. rückzubauenden Bauwerks. Je nach Bauwerksart und –alter bestehen die Altgebäude aus unterschiedlichen Baustoffen in zudem deutlich unterschiedlichen Anteilen (Lippok et al. 2007).

In manchen Fällen findet zudem eine Vorselektion bereits auf der Baustelle statt. In allen Fällen werden nicht-mineralische Bestandteile schon vor dem eigentlichen Abbruch abgetrennt. Finden sich derartige Materialien im Bauschutt, ist sowohl eine Entsorgung über eine Recyclinganlage als auch über eine Deponie nicht oder nur sehr schwer und damit zu hohen Preisen möglich. Weisen die Gebäude in größeren Anteilen Bauteile aus Konstruktionsbeton auf, werden diese in der Regel aus ökonomischen Gründen bereits auf der Baustelle getrennt gehalten von den übrigen mineralischen Bauschuttmassen separiert.

Mineralische Bauabfälle werden zudem nicht auf ihre stoffliche Zusammensetzung hin analysiert. Die wesentliche Größe zur Analyse der Inputmaterialien sind immer die Gehalte an Schadstoffen bzw. deren Elution. Nicht immer lässt sich eine Schadstoffbelastung aus dessen Herkunft ableiten. Zur Beurteilung der aus der stofflichen Zusammensetzung ergebenen Verwertungseignung der Baurestmassen reicht ein in der Regel visueller Eindruck.

Eine generelle Beschreibung der mittleren stofflichen Zusammensetzung gemischtem Bauschutt ist nicht möglich.

Im Gegensatz zum Inputmaterial einer Recyclinganlage werden die Produktmassenströme auf ihre stoffliche Charakteristik hin untersucht, sofern es die Regelwerke für die einzelnen RC-Produkte erfordern. Darüber hinaus liegen auch weitere Untersuchungen insbesondere der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden Württemberg (LUBW 2003) (LUBW 2006) vor, die sich für eine erste Beschreibung im Überblick eignen.

In Abbildung 5 ist die aus den verschiedenen Quellen ermittelte mittlere stoffliche Zusammensetzung aufgeführt, mit Angaben der jeweiligen Spannweiten. Wie die Abbildung zeigt, enthalten die RC-Produkte, die wesentlich auf Basis von gemischtem Bauschutt hergestellt werden, im Mittel zu etwa 8% auch Anteile aus aufbereitetem Ausbauasphalt. Dieser ist nicht Bestandteil des Inputgemisches, sondern wird in Anteilen gezielt zu den Produkten dosiert.

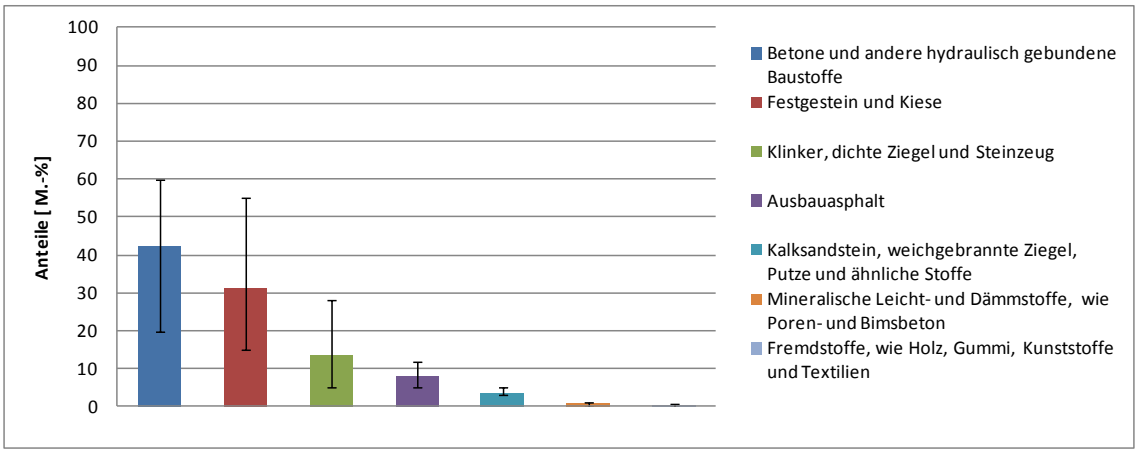

Abbildung 5: Bandbreiten der stofflichen Zusammensetzung von Recyclingbaustoffen aus v.a. gemischtem Bauschutt

Wie der Überblick zeigt, sind nicht nur Betone in einem erheblichen Anteil enthalten. Auch Festgesteine und Kiese stellen mit im Mittel 30% eine wichtige Fraktion dar. Der hohe Anteil an Festgestein ist unter Umständen auf die Analyse von Outputmaterial mobiler Brecheranlagen zurückzuführen. Dabei werden vermutlich bei Straßenbaustellen ungebundene Schichten (Schottertragschichten, Frostschutzschichten) aus dem Straßenkörper im Rahmen bspw. eines Vollausbaus aufgenommen und dem Baustoffrecycling zugeführt. Auch aus der Aufbereitung von Gleisschotter könnten diese Anteile an Festgesteinen resultieren.

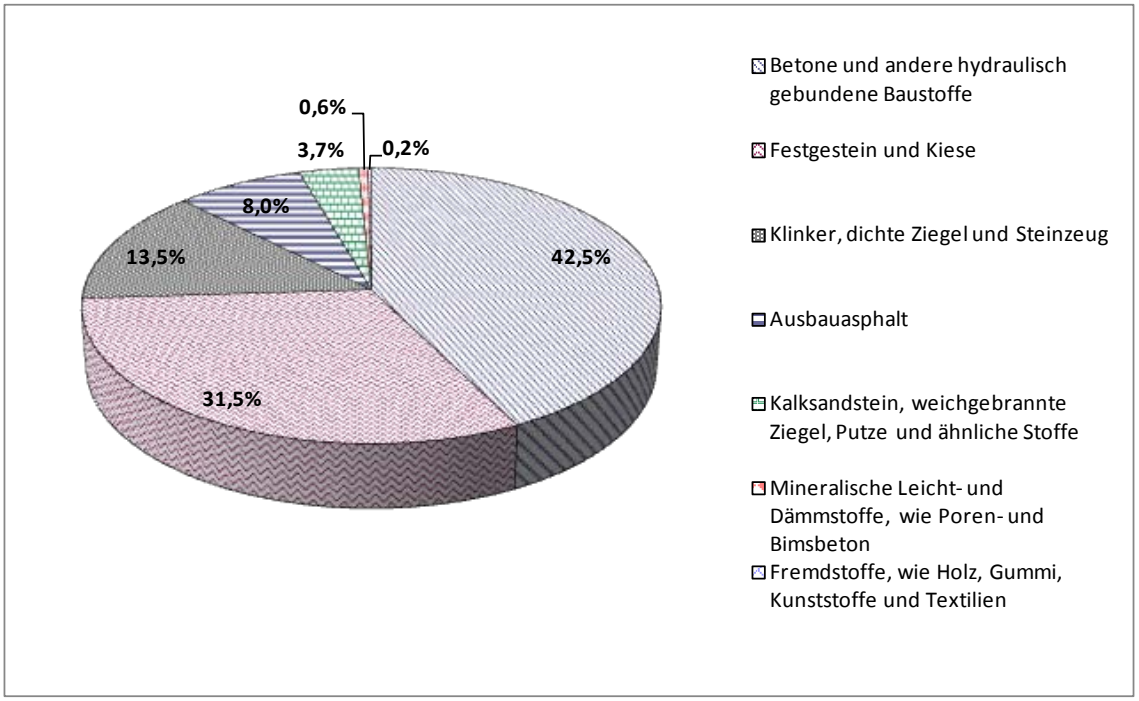

Abbildung 6: Mittlere stoffliche Zusammensetzung der Recyclingbaustoffe aus v.a. gemischtem Bauschutt

Angesichts der großen Spannweite der mittleren Zusammensetzung sowohl des Inputmaterials in Bauschuttrecyclinganlagen als auch der dort erzeugten Produkte kann eine Beschreibung der bauphysikalischen Eigenschaften dieser Materialien nur im Ansatz erfolgen.

Es ist daher nicht möglich, aus den Eigenschaften von Einzelkörnungen einen zulässigen maximalen Mauerwerksanteil in der Produktmischung abzuleiten, der die verschiedenen Anforderungen der Regelwerke und Lieferbedingungen sicher einhalten lässt. Als Lösungsansatz zu dieser Problematik wurden Daten aus verschiedenen Untersuchungen herangezogen.

Von der Materialprüfungsanstalt (MPA) Bremen wurden in 2001 im Zuge einer Untersuchung zur Thematik „Rückenstützenbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt“ (Dietrich et al. 2001) Zuschlagsuntersuchung an ausgewählten Rezyklaten durchgeführt. Eine Auswertung der Ergebnisse zeigt die Tabelle 1. Die einzelnen aufgeführten Materialien wurden einem hierfür zunächst aufgearbeiteten Hochbauschutt entnommen und anschließend in möglichst in sich homogene Fraktionen aussortiert. So bestand die Sortierfraktion Naturstein zu 100% aus Kies. Für die anderen aus Rezyclaten hergestellten Fraktionen wurden Reinheiten von lediglich ca. 80 bis 90 % in der stofflichen Zusammensetzung erreicht.

Wie man aus der Übersicht der Ergebnisse ersehen kann, weisen die einzelnen Fraktionen deutlich unterschiedliche Eigenschaften auf, wobei die bauphysikalischen Eigenschaften der Fraktion Naturstein von keinem der Rezyklate erreicht wird. Eine Ausnahme stellt die Kornform dar, die sich für Weserkies etwas ungünstiger darstellt und jedoch nur für die Nutzung als Zuschlag in der Betonherstellung von Belang ist. Gerade bei Kornrohdichte und Kornfestigkeit kommt das Material aus aufbereitetem Altbeton den Eigenschaften des Natursteins am nächsten.

Tabelle 1: Mittlere physikalische Eigenschaften der Komponenten eines aufbereiteten Hochbauschuttes

Zuschlagsstoffe	**Einheiten**	**Naturstein (Kies)**	**Betonbruch**	**Ziegel**	**Kalksand-stein**	**Poren-beton**
Kornrohdichte	t/m³	2,55	2,25	1,9	1,95	1
Kornform (günstig geformte Körner)	%	79	90	78	81	88
Kornfestigkeit	kN	> 100	50	25	13	3
Abwitterung bei Frosteinwirkung	M.-%	0,7	1,8	3,6	9,6	26,7
Sulfatgehalt (säurelösliche Sulfate)	M.-%	0,026	0,510	0,286	0,104	1,301

Wie aus der Tabelle 1 ersichtlich wird erreichen Mauerwerksziegel nicht die physikalischen Eigenschaften von Altbeton oder gar Naturstein. Wenn es Bauschuttrecyclingunternehmen möglich ist, werden Chargen mit höheren Anteilen an Kalksandsteinen oder Porenbeton möglichst gemieden, was angesichts der Analyseergebnisse verständlich wird. Sollen hochwertige Baustoffe hergestellt werden, dürfen diese beiden Baustoffe nur geringe Anteile am Produktgemisch haben.

Da aus der Untersuchung der MPA Bremen nicht für alle bauphysikalischen Anforderungen der Regelwerke Daten vorliegen, wurden auszugsweise anderen Untersuchungen hinzugezogen. So wurde für die bauphysikalische Eigenschaft „ Widerstand gegen Schlagzertrümmerung (SZ 8/12)“ Daten einer Untersuchung der Universität Bochum (Kollar 2004) herangezogen.

In dieser Untersuchung wurde u.a. der Schlagzertrümmerungswert von verschiedenen Ziegelgemischen unterschiedlicher Qualitäten (Hart-/ Weichbrant) bestimmt. Die an den Gemischen festgestellten Eigenschaften sind in der Tabelle 2 zusammengefasst.

Tabelle 2: Mittlere Widerstände gegen Schlagzertrümmerung von unterschiedlichen Ziegelgemischen (nach Kollar 2004)

Recyclate	Gemische Nr.	SZ-Wert (8/12)	Mittelwerte (einzeln)	Mittelwert (Gesamt)
Ziegelgemische hartgebrannt (ZH)	1	28,9	29,7	30,9
	2	29,9		
	3	27,8		
	4	25,3		
	5	36,8		
Ziegelgemische weichgebrannt (ZW)	1	34,7	32,1	
	2	28,1		
	3	30,3		
	4	35,3		

Im Folgenden wird bei einem Vergleich zwischen den Anforderungen der Regelwerke zur Schlagzertrümmerung und den Eigenschaften der Rezyklate auf die Untersuchung der Universität Bochum verwiesen.

In Tabelle 3 sind Ergebnisse für verschiedene Produkte eines Bauschuttrecyclingunternehmens zusammen gestellt, die im Rahmen von Qualitätskontrollen sowohl im Rahmen der Eigen- als auch der Fremdüberwachung gewonnen wurden. Für die einzelnen Produkte ist jeweils die stoffliche Zusammensetzung als auch die physikalischen Eigenschaften beschrieben.

Ein Vergleich über alle Produkte und ihre Eigenschaften ist deshalb interessant, weil das Frostschutzschichtmaterial des Recyclingunternehmens entgegen der ansonsten üblichen Praxis in höherem Umfang Anteile an Klinker, Ziegel und Steinzeug sowie Kalksandstein und Putze aufweist. Die Anteile liegen hier in Summe über die zuvor

genannten Fraktionen bei 10% bis 16%. Dazu kommen erhebliche Anteile an Altasphaltgranulat.

Während die Schottertragschichten offensichtlich aus einer Mischung von Altbeton und Naturstein (wahrscheinlich Gleisschottermaterial) hergestellt werden, wird für die Herstellung von Frostschutzschichten zu diesem Materialstrom gezielt aufbereiteter gemischter Hochbauschutt sowie Altasphalt zugesetzt. Dies macht sich weniger in der Dichte und Wasseraufnahme des Materialgemischs, sondern vor allem im Widerstand gegen Frostbeanspruchung und Schlagzertrümmerung bemerkbar.

Tabelle 3: Physikalische Eigenschaften von RC-Produkten eines Recyclingherstellers für den Einsatz als Frostschutz- und Schottertragschicht im Straßenbau

		Schottertragschicht		Frostschutzschicht		Splitt -Sand-Gemisch
Material		**Nr. 1**	**Nr. 2**	**Nr. 3**	**Nr. 4**	**Nr. 5**
Stoffliche Zusammensetzung		**M.-%**	**M.-%**	**M.-%**	**M.-%**	**M.-%**
Korngruppe		**0/32**	**0/45**	**0/32**	**0/45**	**0/8**
Kalkstein, Hartgestein, usw.		47.1	30.7	43.3	21.2	97.5
Beton		50	66.1	35.1	57.9	1.2
Klinker, Ziegel, Steinzeug		2	0.7	7.5	12.6	0
Asphaltgranulat		0.9	1.8	11.2	4.9	0.9
Kalksandstein, Putze u.ä.		0	0.7	2.8	3.3	0.4
min. Leichtst., Poren/Bimsbeton		0	0	0	0	0
Fremdstoffe		0	0	0	0	0
		Schottertragschicht		**Frostschutzschicht**		
Korngruppe		**0/32**	**0/45**	**0/32**	**0/45**	**0/8**
Eigenschaft	**Einheit**					
Rohdichte	t/m³	2.540	2.550	2.530	2.550	2.55
Schüttdichte	t/m³	1.520	1.520	1.480	1.540	1.440
KV						
Überkorn D	M.-%	97.5	96.6	98.4	98.6	91.5
Überkorn 1,4D		100	100	100	100	100
Feinanteil Max	M.-%	3.2	4.6	4.8	4.7	0.2
Kornform grober Gesteinskörnung	M.-%	12.1	9.2	14.3	14.5	5
Wasseraufnahme	M.-%	1.6	1.5	1.7	1.5	15
Wassergehalt Natürlich	M.-%	5.9	5.9	6.2	6.3	
Wassergehalt Optimal	M.-%	6.1	6.1	5.9	5.9	
Trockendichte	t/m³	2.055	2.052	2.032	2.040	
Widerstand gegen Frostbeanspruchung	M.-%	2.7	2.7	3.5	3.5	0.9
Widerstand gegen Zertrümmerung SZ8/12	M.-%	22.6	22.6	24.4	24.4	21.9
Fließkoeffizient						37

3 Einsatzmöglichkeiten aus Sicht der bautechnischen Regelwerke

Grundsätzlich gibt es eine sehr große Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten für Bauprodukte, die auf sekundäre Rohstoffe und damit insbesondere aufbereiteten Bauschutt zurückgreifen. Diese Vielzahl an Einsatzmöglichkeiten lässt sich nicht im Detail beschreiben. Tabelle 4 gibt einen Überblick über die Einsatzbereiche. RC-Bauprodukte lassen sich auch dann in diese Einsatzbereiche vermarkten, wenn sie in Anteilen auf Mauerwerksgranulat zurückgreifen. Abhängig von den geforderten Produkteigenschaften variieren jedoch deren maximal möglichen Anteile an der Produktmischung etwa zwischen 10% und 100%.

Tabelle 4: Mögliche Einsatzgebiete für RC-Bauprodukte mit höheren Anteilen an Mauerwerksgranulat

Tiefbau	
Erdbau	- Verfüllung von Leitungsgräben - Verfüllung von Arbeitsräumen - Lärmschutzwälle - Frostschutzkörper unter Industriebauten - Bodenaustausch - Verbesserung der Tragfähigkeit von Böden - Herstellung von temporären Baustraßen
Straßen- und Wegebau a) ungebunden	- Schottertragsschichten - Frostschutzschichten - kombinierte Frostschutz- und Schottertragschichten - Deckschichten im Wegebau - Verbesserung der Tragfähigkeit von Böden im Planumsbereich - Pflasterdecken und Plattenbeläge
b) gebunden	- bituminös gebundene Tragschicht - hydraulisch gebundene Tragschicht - Betontragschicht
Hochbau	
Betonbau	- Transportbeton; Ortbeton - Betonfertigteile - Betonwaren

Produkte und ihre Eigenschaften und in vielen Fällen auch explizit deren Zusammensetzung werden über Normen und Richtlinien geregelt. An die in der Tabelle aufgeschlüsselten Einsatzmöglichkeiten werden gemäß den gültigen bautechnischen Vor-

schriften sehr unterschiedliche Anforderungen bezüglich ihrer bauphysikalischen und chemischen Eigenschaften gestellt. Diese Vorgaben werden nachfolgend getrennt nach bauphysikalischen und chemischen Eigenschaften eingehender beschrieben und erläutert.

3.1 Verwertungsoptionen im Erdbau

3.1.1 Anforderungen

Der Umfang der bauphysikalischen Vorgaben an die Eigenschaften der im Erdbau eingesetzten Baustoffe ist relativ gering. In aller Regel geht es um die Bereitstellung von ausreichenden Massen bzw. entsprechender Volumina. Die geforderten Eigenschaften werden von Baumaßnahme zu Baumaßnahme gezielt festgelegt und sind von allen im Erdbau verwendbaren Materialen prinzipiell einzuhalten. Es sind dies:

- Der Wassergehalt (nach DIN 18121) des Bauproduktes hat dem für Einbau und Verdichtung erforderlichen Wassergehalt zu entsprechen und sollte in der Spanne der Wassergehalte bei 97% der Proctordichte liegen.
- Die Korngrößenverteilung (DIN 18123) beschreibt die Massenanteile in den Korngruppen <0,063mm, <2mm, 2mm < x > 63mm und >63mm bzw. die Sieblinie. Über diese Vorgaben lassen sich gezielt grobkörnige, gemischtkörnige oder feinkörnige Böden mit bestimmten plastischen Eigenschaften beschreiben und vorgeben.

Der Wassergehalt lässt sich grundsätzlich nach Bedarf einstellen. Auch die je nach Baumaßnahme geforderte unterschiedliche Korngrößenverteilung lässt sich grundsätzlich aus verschiedenen Ausgangsmaterialien herstellen.

Die im Erdbau verwendeten Materialien sind gemäß der Begriffsbestimmung der TL BuB E-StB 09 in verschiedene Kategorien eingeteilt. Neben vielen anderen Baustoffkategorien, die sich nach Art ihrer Hauptbestandteile definieren (so z.B. Stahlwerksschlacken (SWS)), sind im Zusammenhang dieser Untersuchung vor allem die Kategorien rezyklierte Baustoffe (RC), Böden mit Fremdbestandteilen (BmF) und im geringeren Maße auch Böden (BO) von Interesse. Gemäß der technischen Lieferbedingungen TL BuB E-StB 09 unterscheiden sich diese gemäß ihrer Zusammensetzung folgendermaßen:

- RC-Baustoffe (RC) werden als rezyklierte Gesteinskörnungen bzw. Gesteinskörnungsgemische sowie Böden mit Fremdbestandteilen größer gleich 50 M.-% definiert.
- Als Böden mit Fremdbestandteilen (BmF) gelten die Böden, die einen Anteil an Fremdbestandteilen zwischen 10 Vol. % und 50 Vol. % aufweisen.
- Böden (BO) sind demnach diejenigen, deren Fremdbestandteile unter 10 Vol. % liegen.

Bei rezyklierten Baustoffen, Böden sowie Böden mit Fremdbestandteilen hat die Einteilung in Bodengruppen nach DIN 18196 zu erfolgen. Für die Zielgrößen grobkörniger, gemischtkörniger sowie feinkörniger Boden werden nach den Technischen Lieferbedingungen TL BuB E-StB 09 jeweils Korngrößenverteilungen in den Klassen $d \leq 0{,}063$ mm, $d \leq 2$ mm und $d > 63$ mm vorgegeben.

Bei rezyklierten Baustoffen und Böden mit Fremdbestandteilen ist bis zum Vorliegen einer Norm die stoffliche Zusammensetzung gemäß den TP Gestein-StB, Teil 3.1.5 zu ermitteln und anzugeben (siehe Tabelle 5). Gemäß den TL BuB E-StB 09 darf der Anteil von Ausbauasphalt 10 M.-% sowie der von Fremdstoffen, wie Holz, Gummi, Kunststoffen und Textilien 0,2 M.-% am Gesamtgemisch nicht überschreiten. Mit pechhaltigen Bindemitteln gebundene Stoffe dürfen generell nicht enthalten sein. Der Massenanteil der Körnungen kleiner 4 mm muss gesondert aufgeführt werden.

Tabelle 5: Stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen und Böden mit Fremdbestandteilen im Erdbau

Lfd.-Nr.	**Hauptgruppen der Materialkomponenten**[1)]	**max. zulässig [M.-%]**[2)]
1	Festgestein	-
2.1	Kies, vollständig gerundet	-
2.2	Kies, teilweise gerundet	-
2.3	Kies, teilweise und vollständig gebrochen	-
3	Betone und andere hydraulisch gebundene Baustoffe	-
4	Schlacken	-
5	Klinker, Ziegel und Steinzeug	-
6	Ausbauasphalt	10
7	Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe	-
8	Mineralische Leicht- und Dämmstoffe, wie Poren- und Bimsbeton	-
9	Fremdstoffe, wie Holz, Gummi, Kunststoffe und Textilien	0,2

[1)] gemäß TP-Gestein-StB, Teil 3.1.5
[2)] gemäß TL BuB E-StB 09
- keine Anforderungen gegeben

3.1.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche

Die Anforderungen der Regelwerke an die stoffliche Zusammensetzung von RC-Baustoffen und Böden mit Fremdstoffen (BmF) sind sehr gering. Sie beschränken sich auf die geforderten bauphysikalischen Eigenschaften, die sich aus Wassergehalt und der Korngrößenverteilung ergeben.

Hinsichtlich der stofflichen Zusammensetzung werden nur Vorgaben zum höchstzulässigen Anteil an Altasphalt sowie nicht-mineralischen Fremdstoffen gemacht. Ob das Bauprodukt für den Erdbau demnach vor allem aus Festgesteinen, Altbetonen, Schlacken, Klinker und Ziegel, Kalksandsteinen sowie mineralischen Leichtstoffen hergestellt wurde und in welchen Anteilen jeweils wird demnach nicht vorgegeben.

RC-Baustoffe für den Erdbau können demnach einen beliebig hohen Anteil an Komponenten aufweisen, die typisch in gebrochenem gemischtem mineralischem Bauschutt enthalten sind. Ein Einsatz von aufbereitetem Mauerwerksbruch wäre somit bis zu 100 Massen % zulässig.

Für den Einbau von Baustoffen im Erdbau werden gemäß ZTV E StB (Zusätzliche Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau) Anforderungen an die Standfestigkeit der eingebauten Baustoffe gestellt. Diese Standfestigkeitseigenschaften der RC-Baustoffe aus Mauerwerksbruch sind u.a. von der Korngrößenverteilung sowie von der Kornfestigkeit der eingesetzten Materialien abhängig. Die stoffliche Zusammensetzung der Materialien und deren Kornfestigkeit sind bspw. für die Errichtung von Dämmen von Bedeutung.

Die Anforderungen an Materialien, die als Aufstandskörper unter Bauwerken eingesetzt werden sollen, sind in der Praxis vergleichbar zu Frostschutzschichten für den Straßenbau. In der Regel wird deshalb auch bei Recyclinganlagen nicht zwischen den Produktlinien Frostschutzschicht für den Straßen- und Wegebau sowie Aufstandskörper unterschieden. In diesen Produkten muss auf einen ausreichend hohen Anteil an Materialkomponenten mit einer hohen Kornfestigkeit (Betonbruch, Naturstein) geachtet werden.

Typische Einsatzbereiche für RC-Baustoffe bzw. Böden mit Fremdstoffen im Erdbau sind unter anderen:

- Unterbau unter Fundament- oder Bodenplatte
- Hinterfüllungen von Bauwerken im Böschungsbereich
- Verfüllung von Baugruben
- Dämme im Böschungsbereich unter kulturfähigen Böden
- Schutzwälle unter kulturfähigen Böden
- Verfüllung von Leitungsgräben
- Bodenverbesserung unter gebundener Deckschicht
- Aufstandskörper

Bei einigen der genannten Verwertungsoptionen zielt der Einsatz der RC-Baustoffe auf das Füllen von Hohlräumen. Typisch ist hierfür die Hinterfüllung von Arbeitsräumen, d.h. das Auffüllen der verbliebenen Hohlräume der Baugruben. Wenn auf dem so neu errichteten Planum keine Nutzungen vorgesehen sind, die hohe Tragfähigkeiten erfordern, beschränken sich die Anforderungen an das Material auf gute Einbau- und Verdichtbarkeit. Dies erfordert vor allem eine gute Kornabstufung bzw. eine geeignete Sieblinie. Da es aufgrund einer fehlenden Auflast durch darüber liegende Bauwerke nur zu einer relativ geringen Belastung der Hinterfüllungsbereiche kommt, könnten in diesem Einsatzbereich auch RC-Materialien mit einem hohen Anteil an Mauerwerksbruch zum Einsatz kommen.

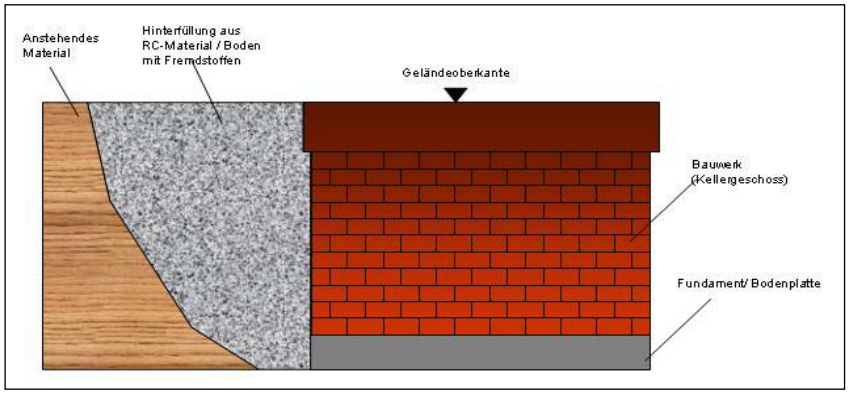

Abbildung 7: Hinterfüllungen von Arbeitsräumen bzw. Auffüllen der Resthohlräume von Baugruben

An RC-Baustoffe zum Einsatz in Hinterfüllungen (s. Abbildung 7) werden die geringsten spezifizierten Anforderungen gestellt. Der Einsatz von RC-Baustoffen als Aufstandskörper (s. Abbildung 8) weißt dagegen die höchsten spezifizierten Anforderungen auf. Wird der Baustoff nicht nur als Unterbau und damit zur Erhöhung der Standfestigkeit des Bodens eingesetzt (Bodenaustausch), sondern auch für die Frostschutzschicht, sind die Produkteigenschaften vergleichbar zu Frostschutzschichten im Straßenbau (siehe dort).

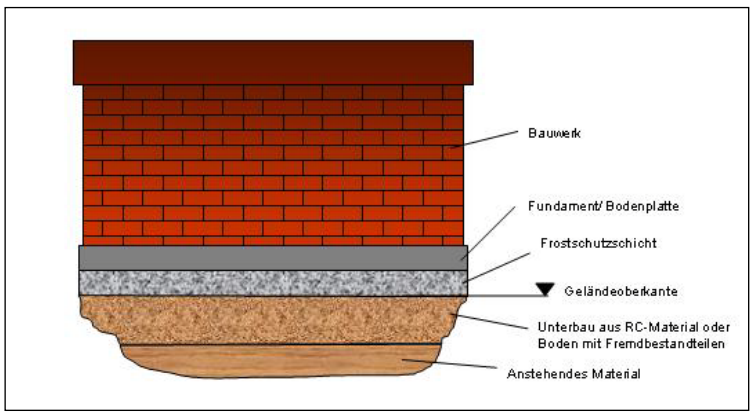

Abbildung 8: Aufstandskörper unter Fundament- und Bodenplatte

3.1.3 Fazit

Aus bauphysikalischer Sicht steht in den meisten Einsatzzwecken des Erdbaus einem verstärkten Einsatz von Bauprodukten aus der Aufbereitung von gemischtem Bauschutt nichts entgegen.

Die Nachfrage nach Baumaterialien im Erdbau ist schwankend und stark abhängig von einzelnen größeren Baumaßnahmen. Angesichts des Aufkommens (siehe Kapitel 2) dürfte aus bauphysikalischer Sicht eine vergleichsweise hohe Aufnahmefähigkeit bestehen.

Es muss allerdings beachtet werden, dass in manchen Anwendungsbereichen, wie insbesondere den einfachen Hohlraumverfüllungen die Verwendung von RC-Baustoffen aus gemischtem Bauschutt tendenziell in Konkurrenz zu Verwertungsmöglichkeiten für Böden steht.

3.2 Einsatz in ungebundenen Schichten im Straßen- und Wegebau

Im Straßen- und Wegebau werden für den Straßenoberbau d.h. für den eigentlichen Straßenkörper Materialien benötigt, die in ungebundenen Schichten die Frostsicherheit und die Tragfähigkeit gewähren sollen, oder im einfachen Wegebau auch als ungebundene Deckschicht dienen können. Diese Einsatzzwecke werden nachfolgend diskutiert.

Der klassische Einsatzbereich von RC-Baustoffen im Oberbau von Straßen ist in den ungebundenen Trag- und Frostschutzschichten. Nur in den Straßenbauklassen IV bis VI, d.h. in Fußgängerzonen mit Ladeverkehr, Anliegerstraßen sowie Fuß- und Radwegen, sind auch Deckschichten ohne Bindemittel zulässig. Während sie in den eigentlichen Straßen eher selten sind, können gerade Fuß- und Radwege häufiger ungebundene Deckschichten aufweisen.

Werden im Straßen- und Wegebau Materialien verwendet, die teilweise aus sekundären Rohstoffen bestehen, so sind diese Gemische gemäß der europäischen Norm „DIN EN 13285, Anhang A“ in ihrer Zusammensetzung genauer zu beschreiben. Dabei wird grundsätzlich unterschieden in:

- Gemische aus gebrochenem Mauerwerk (siehe Tabelle 6)
- Gemische aus gebrochenem Beton und Mauerwerk (siehe Tabelle 7)

Grundsätzlich sind auch andere Gemische bzw. Zusammensetzungen zulässig die nicht in den Tabellen beschrieben sind. Sie haben jedoch in dem hier vorliegenden Zusammenhang der „Optimierung der Verwertung von gemischtem Bauschutt mit höheren Anteilen an Mauerwerksbruch“ keine Bedeutung.

Tabelle 6: Gemische aus gebrochenem Mauerwerk nach DIN EN 13285, Anhang A, Tabelle A.2

Bestandteile		**Massenanteil (in %)**
Hauptbestandteile	Gebrochenes Mauerwerk (Dichte >1,6 t/m³), gebrochener Beton (Dichte > 2,1 t/m³) und Gesteinskörnungen (einschließlich Schlacke)	≥ 80
Weitere körnige Materialien	Körnige Materialien mit einer Dichte < 1,6 t/m³	≤ 20
	Gebrochener Ausbauasphalt	≤ 5
Verunreinigungen	Bindige Bestandteile (einschließlich Ton)	≤ 1
	Organische Bestandteile	≤ 0,1

Tabelle 7: Gemische aus gebrochenem aus gebrochenem Beton und Mauerwerk nach DIN EN 13285, Anhang A, Tabelle A.3

Bestandteile		**Massenanteil (in %)**
Hauptbestandteile	Gebrochener Beton (Dichte > 2,1 t/m³) und Gesteinskörnungen (einschließlich Schlacke)	≥ 50
Weitere körnige Materialien	Gebrochenes Mauerwerk	≤ 50
	Gebrochener Ausbauasphalt	≤ 5
	Körnige Materialien mit einer Dichte > 1,6 t/m³	≤ 10
Verunreinigungen	Bindige Bestandteile (einschließlich Ton)	≤ 1
	Organische Bestandteile	≤ 0,1

3.2.1 Anforderungen

Der in diesem Kapitel beschriebene Einsatz von RC-Baustoffen in ungebundenen Schichten im Straßenbau und die sich daraus ergebenden Anforderungen an die Materialien werden sowohl in der TL SoB-StB 04 als auch in der TL Gestein-StB 04 beschrieben. Die TL SoB-StB 04 ist als Anforderungszusammenstellung für Baustoffgemische und die TL Gestein-StB 04 als Anforderungszusammenstellung für einzelne Gesteinskörnungen zu verwenden. Das bedeutet, dass die TL SoB-StB 04 als vorran-

giges und die TL Gestein-StB 04 als ergänzendes Regelwerk anzuwenden ist, wenn Baustoffgemische mit Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Bei möglicherweise auftretenden Überschneidungen von Anforderungen in den Regelwerken ist die TL SoB-StB 04 anzuwenden.

Die bauphysikalischen Anforderungen für die Anwendung von RC-Materialien in ungebundenen Schichten im Straßenbau gemäß TL SoB-StB 04 sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Die Anforderung an die stoffliche Zusammensetzung ergibt sich aus den Anforderungen gemäß TL Gestein-StB 09. Danach werden die maximal zulässigen Gehalte von Asphaltbruch größer 4 mm und Klinker, Ziegel, Steinzeug größer 4 mm auf jeweils 30 % begrenzt. Mineralische Leichtbaustoffe sowie nicht-mineralische Fremdstoffe dürfen zu maximal 1 % bzw. 0,2 % enthalten sein.

Eine zentrale bauphysikalische Eigenschaft ist der Widerstand gegen Frostbeanspruchung. Eine Überschreitung der Anforderungen der Kategorie F4 (≤ 4 M.-%) der Tabelle B-4 bis 10 M.-% ist für RC-Baustoffe für Frostschutzschichten (FSS) nur zulässig, wenn der im Frost-Tauwechsel an der Gesamtkörnung größer 0,063 mm gemäß den „Technischen Prüfvorschriften für Mineralstoffe im Straßenbau“ (TP Min-StB, Teil 4.3.1) entstandene Anteil kleiner 0,063 mm 2 M.-% nicht übersteigt.

Die Summe aus dem ursprünglich enthaltenen Anteil kleiner 0,063 mm und dem im Befrostungsversuch (nach der Befrostung der Gesteine und ihrer entsprechenden Zertrümmerung) zusätzlich entstandenen Anteil kleiner 0,063 mm darf nicht mehr als 5 M.-% betragen. Eine Überschreitung der Anforderungen der Kategorie F4 (≤ 4 M.-%) der Tabelle B-4 für RC-Baustoffe für Schottertragschichten (STS) bis zu 5 M.-% insgesamt ist zulässig, wenn der Anteil kleiner 0,71 mm höchstens bis 1,0 M.-% beträgt.

Die Vorgabe des maximal zulässigen Feinanteils kleiner 0,063 mm von 3 M-% bei Frostschutzschichten (1) gilt nur, wenn ein Einstau von Grundwasser bis in die Höhe des Planums möglich ist. Bei Schottertragschichten ist dieser Feinkornanteil auf 5 M-% beschränkt. Sollte die Schottertragschicht (2) als 0/32 ausgeführt und unter Betondecken in Straßen der Bauklassen SV (Autobahn; Schnellstraßen) oder I-III (Schnellstraßen, Hauptverkehrsstraßen, Wohnsammelstraßen) eingesetzt werden, darf der Feinkornanteil maximal nur 3 M% betragen. Lediglich bei Deckschichten ohne Bindemittel wird nicht ein höchst zulässiger Feinanteil geregelt, sondern eine Mindestgröße. Hier muss die die Anforderung der Kategorie LF8 mit größer gleich 8 M.-% erfüllt werden.

Eine weitere Eigenschaft, die an die Baustoffe gestellt wird, ist eine ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Zertrümmerung (s. Zeilen 11,12 und 13). Der Widerstand gegen Zertrümmerung wird als Schlagzertrümmerungswert gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-2, Abschnitt 6, oder als Los-Angeles-Koeffizient gemäß DIN EN 1097-2, Abschnitt 6, bestimmt. Das Los-Angeles-Prüfverfahren ist das Referenzprüfverfahren. Bei Gesteinskörnungen mit einem Größtkorn größer 32 mm ist auch die Widerstandsfähigkeit gegen Zertrümmerung nach TP Gestein-StB, Teil 5.1.3 und

Teil 5.3.1.2, zu ermitteln und die Anforderung an den SD10-Wert im Anhang A zu erfüllen. Diese gilt als repräsentativ für alle Gesteinskörnungen größer 32 mm.

Tabelle 8: Bauphysikalische Anforderungen an den Einsatz von RC-Materialien für ungebundene Schichten im Straßenbau gemäß TL SoB-StB 04

	Anforderungen/ Prüfungen	**Frostschutz-schicht (FSS)**	**Schottertrag-schicht (STS)**	**Deckschichten ohne Bindemittel (DoB)**
1	**Stoffliche Zusammensetzung**	Gemäß TL-Gestein-StB 04		
2	**Baustoffgemische** (Kleinst- und Größtkorn in mm)	0/2; 0/4; 0/5; 0/8; /11; 0/16; 0/22; 0/32; 0/45; 0/56; 0/63	0/32; 0/45; 0/56	0/8; 0/11; 0/16; 0/22; 0/32
3	**Widerstand gegen Frostbeanspruchung**	1) FV < 0,063mm < 2 M.-% 2) < 0,063mm + Frostversuch < 5 M.-%	< 0,063mm + Frostversuch < 5 M.-% (wenn Anteil < 0,71 mm <1 M.-%)	-
4	**Maximaler Feinanteil (< 0,063mm)**	≤ 5 M.-% bzw. ≤ 3 M.-% [1)]	≤ 5 M.-% bzw. ≤ 3 M.-% [2)]	≤ 15 M.-%
5	**Minimaler Feinanteil (< 0,063mm)**	-	-	≥ 8 M.-%
6	**Überkorn (Durchgang in M.-%)**	1,4 D D 100 90-99	1,4 D D 100 90-99	1,4 D D 100 90-99
7	**Korngrößenverteilung**	Tabelle 4	Tabelle 8 und 9	Tabelle 15
8	**Wasserdurchlässigkeit**	-	-	-
9	**Wassergehalt**	90% wOpt	90% wOpt	90% wOpt
10	**CBR-Wert**	-	≥ 80 %	-
11	**Widerstand gegen Schlagzertrümmerung SZ (8/12,5)**	≤ 32	≤ 28	-
12	**Los Angeles-Koeffizient LA (10/14)**	≤ 40	≤ 35	-
13	**Widerstand gegen Zertrümmerung an Schotterschlagwert SD10 (35,5/45)**	-	≤ 33	-

[1)] [2)] Gilt nur für Baustoffgemische, die in Schottertragschichten 0/32 unter Betondecken der Bauklassen SV und I-III eingesetzt werden.

3.2.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche

Frostschutzschichten (FSS) sowie Schottertragschichten (STS) werden als Teil des Oberbaus im qualifizierten Straßenbau sowie auch unter gebundenen Fundament-/Bodenplatten von Gebäuden eingesetzt. Da ungebundene Deckschichten i.d.R. im Straßen- und Wegebau für Straßen der Klassen IV bis VI eingesetzt werden, sind ihre bauphysikalischen Anforderungen – im Verhältnis – relativ gering.

Analog zum Erdbau ist die stoffliche Zusammensetzung der RC-Baustoffe im ungebundenen Straßenbau durch die Regelwerke begrenzt. Die TL Gestein-StB 04 (sowie analog die TL SoB-StB 04) beschränkt die Mengen der Materialkomponenten auf maximal 30 M.-%, die nicht den Kategorien „Betone, Festgestein, Schlacken und natürliche Gesteinskörnungen“ bzw. für „Ausbauasphalt“ und auch Mauerwerksziegel entsprechen.

Die eigentlichen Anforderungen an Frostschutz- und Schottertragschichten wären unter realen Bedingungen in einer Recyclinganlage jedoch mit derartigen Produkten wohl nicht zu erreichen. Wie man aber aus Tabelle 3 ersehen kann, werden alle durch die Regelwerke geforderten Eigenschaften auch von Gemischen mit höheren Anteil an Ziegelbruch (bspw. 12,6 M.-%, Material Nr. 4) eingehalten.

Vergleich der Eigenschaften mit den Anforderungen der Regelwerke

Der hier beschriebene Vergleich geht von einem stofflichen Anteil an Ziegelbruch von ~30 M.-% und einem Anteil von ~60 bis 70 M.-% Betonbruch bzw. natürliche Gesteinskörnungen aus. Die verbleibenden Anteile am Baustoffgemisch teilen sich auf in ~ 5-10 M.-% Asphaltbruch, sowie ~ 0-5 M.-% Kalksandsteine und sonstige Bestandteile. Hierdurch sollen die Eigenschaften einer rezyklierten Gesteinskörnung mit den Anforderungen der Regelwerke auch bei ungünstigen Bedingungen verglichen werden.

Die Prüfung des „Widerstandes gegen Frostbeanspruchung“ muss durchgeführt werden, da die Einhaltung der Anforderung von einer maximalen Wasseraufnahme der festgelegten Kategorie Wcm 0,5 nicht zu erwarten ist. Die Abwitterung bei Frosteinwirkung bei der Bestimmung des „Widerstandes gegen Frostbeanspruchung“ liegt bei reinem Ziegelbruch sowohl noch innerhalb der zulässigen Anforderungen gemäß TL SoB-StB 04 (5 M.-%), als auch gerade noch innerhalb der höheren Anforderung gemäß TL Gestein-StB 04 (4 M.-%).

Die restlichen Gemischbestandteile (Betonbruch bzw. natürliche Gesteinskörnungen) weisen einen wesentlich höheren Widerstand gegen Frostbeanspruchung auf. Da diese mengenmäßig einen wesentlich größeren Anteil an der Produktmischung haben, müssten auch bei einem höheren Anteil an Ziegelbruch am Gesamtgemisch die Anforderungen sicher eingehalten werden können.

Für einen Vergleich der Anforderungen zum Widerstand gegen Schlagzertrümmerung mit den Eigenschaften der Rezyklate werden die in Tabelle 2 dargestellten Werte von Ziegelgemischen herangezogen.

Der für Frostschutzschichten (FSS) gemäß TL SoB-StB 04 geforderte Widerstand gegen Schlagzertrümmerung wird im Mittel sowohl von weichgebrannten als auch von hartgebrannten Ziegelgemischen eingehalten. Der für Schottertragschichten (STS) gemäß TL SoB-StB 04 geforderte Widerstand gegen Schlagzertrümmerung wird lediglich von wenigen hartgebrannten Ziegelgemischen eingehalten.

Somit ist festzustellen, dass im Mittel von reinem Ziegelbruch die Anforderung bezüglich des Widerstandes gegen Zertrümmerung nur die Anforderung für FSS-Material durchgehend eingehalten wird.

Zusätzlich zu den gemäß TL SoB-StB 04 gestellten Anforderungen an die Eigenschaften der Baustoffgemische, sind von den Gesteinskörnungen noch weitere Anforderungen gemäß TL Gestein-StB 04 einzuhalten. An die Gesteinskörnungen werden noch Anforderungen an die Kornform sowie den Anteil der gebrochenen Oberflächen gestellt. Die Anforderungen an die „Kornform grober Gesteinskörnungen“ bezüglich der Plattigkeits- und Kornformkennzahl werden auch noch von reinem Ziegelbruch eingehalten (vgl. Tabelle 1). Aufgrund des sehr hohen Anteils an gebrochenen Gesteinskörnungen ist i.d.R. von einer Einhaltung der Anforderungen an den „Anteil an gebrochenen Oberflächen auszugehen“.

3.2.3 Fazit

Zusammenfassend könnte somit bei einer qualifizierten Aufbereitung von Hochbauschutt gemäß den gängigen Regelwerken eine Einhaltung der Anforderungen – auch bei einem gemäß TL-Gestein-StB 04 maximalen zulässigen Anteil von Ziegelbruch– theoretisch möglich sein. Zumindest dürften Produkte für „Forstschutzschichten“ oder auch „Deckschichten ohne Bindemittel“ mit höheren Anteilen an Ziegel- und Mauerwerkssplitt herstellbar sein, wie erste Beispiele aus der Praxis zeigen.

Angesichts der hohen Anforderungen an Produkte für „Schottertragsschichten“ bezüglich des Widerstandes gegen Schlagzertrümmerung dürften hier vermutlich nur geringere Anteile an Ziegelbruch im Gemisch möglich sein.

Typische Einsatzbereiche für RC-Materialien für ungebundene Schichten im Straßenbau sind unter anderen:

- Schottertragschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht
- Frostschutzschicht (ToB) unter gebundener Deckschicht
- Deckschicht ohne Bindemittel
- Tragschicht ohne Bindemittel und Bodenverbesserung sowie Bodenverfestigung unter Deckschicht ohne Bindemittel oder unter Plattenbelägen
- Tragschicht ohne Bindemittel und Bodenverbesserung sowie Bodenverfestigung unter Pflaster
- Frostschutzschicht unter Fundament- oder Bodenplatte

3.3 Einsatz in Pflasterdecken und Plattenbelägen

3.3.1 Anforderungen

Die bauphysikalischen Anforderungen für den Einsatz von RC-Materialien in Pflasterdecken und Plattenbelägen im Straßenbau ergeben sich aus den Vorgaben der TL Gestein-StB 04.

Für die Rohdichte des Materials werden aus der TL heraus keine Anforderungen vorgegeben. Die Rohdichte der Gesteinskörnungen ist nach den Prüfverfahren der DIN EN 1097-6, Anhang A, zu bestimmen und anzugeben. Erfahrungswerte für die Korngruppen/Lieferkörnungen zwischen 2 und 45 mm sind im Anhang A der TL Gestein-StB 04 angegeben. Für eine Verwendung als Bettungsmaterialien werden typischer Hartsteingemische verwendet. Die Rohdichten können bei den Gemischen, abhängig von der verwendeten Gesteinsart, unterschiedlich ausfallen. So hat ein Granit eine Rohdichte von im Mittel 2,7 t/m³ und ein Basalt von im Mittel 2,9 t/m³. Da ein reiner Betonbruch eine Rohdichte von ca. 2,3 t/m³ aufweist, wird ein Gemisch mit Ziegelmaterial (Rohdichte ca. 2,0 t/m³) nicht mit Natursteinen vergleichbare Werte erreichen können. Die Rohdichte für die Korngruppen/Lieferkörnung „Füller“ ist nach den Prüfverfahren der DIN EN 1097-7 an der Kornklasse 0/0,125 mm zu bestimmen und anzugeben.

Tabelle 9: Auswahl an bauphysikalischen Anforderungen an den Einsatz von RC-Materialien für Pflasterdecken und Plattenbeläge im Straßenbau gemäß TL Gestein-StB 04

	Parameter	**Bettungsmaterial / Fugenmaterial**
4	**Gehalt an Feinanteilen**	maximal <5 M.-%
5	**Kornform grober Gesteinskörnungen**	
	Kornformkennzahl	≤50
	Plattigkeitskennzahl	≤50
7	**Fließkoeffizient Korngruppe 0/2**	<30
8	**Widerstand gegen Zertrümmerung**	
	Anforderungen SZ-Wert (8/12,5)	≤26
	Anforderungen LA-Wert (10/14)	≤30
9	**Wasseraufnahme**	Wcm 0,5
10	**Widerstand gegen Frostbeanspruchung**	<4 M.-%

Der nach DIN EN 933-1 bestimmte Gehalt an Feinanteilen in den Korngruppen darf 5 Massen-% nicht überschreiten. Für Kombinationen von benachbarten Korngruppen

gilt für den Gehalt an Feinanteilen die Anforderung der gröbsten in der Kombination enthaltenen Korngruppe.

Die Kornform grober Gesteinskörnungen wird nach DIN EN 933-4 als Kornformkennzahl oder nach DIN EN 933-3 als Plattigkeitskennzahl bestimmt. Das Prüfverfahren nach DIN EN 933-3 ist das Referenzprüfverfahren.

Der Fließkoeffizient der Gesteinskörnungen 0/2 mm bis 0/5 mm und von den Gesteinskörnungsgemischen mit d gleich 0 und D größer gleich 8 mm wird nach den Prüfverfahren der DIN EN 933-6, Abschnitt 8 bestimmt.

Die Gesteinskörnungen müssen ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Zertrümmerung aufweisen. Der Widerstand gegen Zertrümmerung wird als Schlagzertrümmerungswert gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-2, Abschnitt 6, oder als Los-Angeles-Koeffizient gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-2, Abschnitt 6, bestimmt. Das Los-Angeles-Prüfverfahren ist das Referenzprüfverfahren. Wie im Vergleich zu Tabelle 3 zu sehen,

Der Nachweis des ausreichenden Widerstandes gegen Frostbeanspruchung hat durch die Bestimmung der Wasseraufnahme, falls erforderlich mit anschließender Bestimmung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung oder direkt durch die Bestimmung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung zu erfolgen. Wenn die Wasseraufnahme gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-6, Anhang B der festgelegten Kategorie Wcm 0,5 entspricht, ist von einer ausreichenden Widerstandsfähigkeit der Gesteinskörnung auszugehen. Wird die Anforderung der Kategorie Wcm 0,5 nicht eingehalten, ist der Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach nach DIN EN 1367-1 zu prüfen.

3.3.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche

Ein Vergleich mit Tabelle 1 zeigt, dass die Anforderungen von einem Baustoff auf Basis von ausschließlich Mauerwerk kaum einzuhalten ist. Die bauphysikalischen Anforderungen an RC-Baustoffe für Pflasterdecken und Plattenbelägen ähneln denen für einen Einsatz in ungebundenen Schichten. Da beim Einsatz unterhalb von Pflasterdecken und Plattenbelägen die RC-Baustoffe als Bettungs- bzw. Fugenmaterial dienen, werden vor allem Körnungsgruppen mit geringem Größtkorn eingesetzt.

Mit Bezug auf das Regelwerk TL Gestein-StB 04 wäre ein Baustoff denkbar, der bis zu 30 M.-% aus Ziegel- und Mauerwerksbruch hergestellt wurde, wobei die Anforderungen der Ausschreibung an die Abstufung des Korngerüstes (wie Korngruppen, Korngrößenverteilung, Überkorn, Feinkornanteil) zu beachten sind.

Obwohl Baustoffgemische aus gemischtem Bauschutt (Beton, Ziegel, etc.) nicht die Rohdichten von Natursteinen erreichen können, ist dies kein Ausschlusskriterium. Die Rohdichte ist lediglich zu bestimmen und anzugeben. Die in der TL Gestein-StB 04 Anhang A angegebenen Erfahrungswerte sind kein Ausschlusskriterium.

Bei den bauphysikalischen Eigenschaften der Rezyklate lagen keine Daten zum Fließkoeffizienten der Materialien vor. Der gemäß TL Gestein-StB 04 erforderliche Wert für

den Fließkoeffizient der Korngruppe 0/2 von unter 30 (Sekunden bis zum Auslaufen aus dem standardisierten Messgefäß) ist von fraktionierten, rezyklierten Baustoffen kaum einzuhalten. Es sind jedoch auch für Brechsande aus natürlichen Gesteinskörnungen Literaturwerte für einen Fließkoeffizienten größer 30 bekannt.

Für den Einsatz von Baustoffen mit hohem Anteil an Mauerwerkssplitt sind vor allem die Anforderungen an einen ausreichenden „Widerstand gegen Zertrümmerung“ problematisch. So zeigt ein Vergleich der Regelwerksanforderungen mit den Werten aus der Tabelle 2, dass die hohen Anforderungen für Bettungsmaterial von reinen Ziegelgemischen nicht eingehalten werden kann.

Die Prüfung des „Widerstandes gegen Frostbeanspruchung“ muss durchgeführt werden, da die Einhaltung der Anforderung von einer maximalen Wasseraufnahme der festgelegten Kategorie Wcm 0,5 nicht zu erwarten ist (siehe Tabelle 3). Die Abwitterung bei Frosteinwirkung bei der Bestimmung des „Widerstandes gegen Frostbeanspruchung“ liegt bei reinem Ziegelbruch gerade noch innerhalb der gemäß TL Gestein-StB 04 zulässigen Anforderungen (s. Tabelle 1). Somit dürften auch für die Gesamtmischung des Produktes (mit max. 30 M.-% Ziegelbruch) die Anforderungen an den Widerstand gegen Frostbeanspruchung eingehalten werden.

3.3.3 Fazit

Tendenziell ist festzustellen, dass bei einer qualifizierten Aufbereitung von Hochbauschutt gemäß den gängigen Regelwerken eine Einhaltung der bauphysikalischen Anforderungen – auch bei einem gemäß TL-Gestein-StB 04 maximalen zulässigen Anteil von Ziegelbruch– möglich erscheinen.

Hierzu gibt es zwei Ausnahmen:

- So sind die Anforderung an den Fließkoeffizienten der Korngruppe 0/2, im Zuge von weiteren Untersuchungen erst noch zu bestätigen.
- Der von der TL Gestein-StB 04 geforderte Widerstand gegen Schlagzertrümmerung wird anhand der vorliegenden Werte lediglich von Recyclingprodukten mit einem maximalen Anteil von 10 bis 12 M.-% eingehalten (s. Tabelle 3).

Die Verwendung von aufbereitetem gemischtem Hochbauschutt als Bettungs- und Fugenmaterial wäre ein wichtiger Verwertungsweg. Vor allem die in den anderen Einsatzbereichen ansonsten wenig genutzten Korngruppen mit geringem Durchmesser könnten hier eine verstärkte Verwendung finden. So gibt es bis auf einen Einsatz als Material zu Verfüllung im Erdbau (z.B. Leitungssand) keine weitere Absatzmöglichkeit für die umfangreichen Massenanteile, die bei der Aufbereitung von Hochbauschutt zwangsläufig anfallen. Typische Einsatzbereiche für RC-Materialien für Pflasterdecken und Plattenbeläge im Straßenbau wären zum Beispiel:

- Bettungssand unter Pflaster oder unter Plattenbelägen
- Bettung unter Pflaster oder Platten jeweils mit wasserundurchlässiger Fugenabdichtung

3.4 Gebundene Schichten im Straßen- und Wegebau

Bei den gebundenen Schichten im Straßen- und Wegebau handelt es sich vor allem um Deck- und Tragschichten aus Beton und Asphalt. Dazu kommen hydraulisch gebundene Schichten, die nicht selten vor Ort hergestellt werden.

3.4.1 Bituminös gebundene Schichten - Asphalt

In den gängigen Regelwerken (vgl. Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen „MRC“) für den Einsatz von RC-Baustoffen, wird eine Verwendung als Gesteinskörnung bzw. Gesteinskörnungsgemisch selbst bei einem erhöhten Überwachungsaufwand - mit besonderem Eignungsnachweis - in bituminös gebundenen Schichten nicht empfohlen.

Die bauphysikalischen Anforderungen für die Anwendung von RC-Materialien für bituminös gebundene Schichten im Straßenbau sind in Anhang A der TL Asphalt-StB sowie in der Tabelle B-12 der TL-Gestein-StB 04 dargelegt. Die Anforderungen sind ausgesprochen hoch und selbst für RC-Material aus reinem Betonbruch kaum zu erfüllen. Gesteinskörnungen mit Anteilen an Mauerwerksbruch können diese Anforderungen sicher nicht erfüllen. In die Asphaltproduktion wird klassisch nur das Asphaltfräsgut zurückgeführt und nicht für die Deckschichten, sondern für die Tragschichten verwendet.

3.4.2 Hydraulisch gebundene Schichten im Straßenbau

3.4.2.1 Anforderungen

Die bauphysikalischen Anforderungen für die Anwendung von RC-Materialien für hydraulisch gebundene Schichten im Straßenbau gemäß TL-Gestein-StB 04 sind in der dortigen Tabelle B 13 zusammengefasst.

Bei RC-Baustoffen ist die stoffliche Zusammensetzung bis zum Vorliegen einer DIN EN gemäß dem „Merkblatt über die Wiederverwendung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau“ (MRC) zu ermitteln und anzugeben. Die Anforderungen im Anhang B der TL Gestein StB 09 sind einzuhalten. Danach sind die Anteile größer 4mm an Altasphalt oder Klinker, Ziegel, Steinzeug auf jeweils maximal 30% begrenzt. Problematische mineralische Stoffe wie bspw. Putze und Kalksandstein sowie Leichtbaustoffe dürfen nur zu maximal 5% bzw. 1% enthalten sein.

Die Anforderungen an Kornform und Wasseraufnahme bzw. Widerstand gegen Frostbeanspruchung entspricht den Anforderungen, die auch für andere Anwendungszwecke gelten.

Die Kornform grober Gesteinskörnungen wird nach DIN EN 933 4 als Kornformkennzahl oder nach DIN EN 933 3 als Plattigkeitskennzahl bestimmt. Das Prüfverfahren nach DIN EN 933 3 ist das Referenzprüfverfahren. Kornform- und Plattigkeitskennzahl liegen bei jeweils kleiner gleich 50.

Der Nachweis des ausreichenden Widerstandes gegen Frostbeanspruchung hat durch die Bestimmung der Wasseraufnahme gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-6, Anhang B oder falls erforderlich direkt durch die Bestimmung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung zu erfolgen. Wenn diese Wasseraufnahme der festgelegten Kategorie Wcm 0,5 entspricht, ist von einer ausreichenden Widerstandsfähigkeit der Gesteinskörnung gegen Frostbeanspruchung auszugehen. Wird die Anforderung der Kategorie Wcm 0,5 nicht eingehalten, ist der Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach DIN EN 1367-1 zu bestimmen. Zulässig sind weniger als 4 M.-%.

Die Anforderungen an die Rohdichte der Gesteinskörnung ergeben sich aus den Randbedingungen des Bauvorhabens. Die Rohdichte der Gesteinskörnungen ist nach DIN EN 1097-6, Anhang A, zu bestimmen und anzugeben. Erfahrungswerte für die Korngruppen/Lieferkörnungen zwischen 2 und 45 mm sind im Anhang A der TL Gestein StB 09 angegeben. Sie gelten nicht als Anforderungen. Die Rohdichte für die Korngruppen/Lieferkörnung „Füller“ ist nach DIN EN 1097-7 an der Kornklasse 0/0,125 mm zu bestimmen und anzugeben.

Verfestigungen kommen hauptsächlich im Unterbau des qualifizierten Straßen- und Wegebaus bei unzureichenden natürlichen Bodeneigenschaften zum Einsatz. Hydraulisch gebundene Tragschichten finden z.T. unterhalb von bituminös gebundenen Schichten bzw. Betondecken Verwendung.

Für den Bereich der gebundenen Schichten im Straßenbau werden gemäß TL Gestein StB 04 an Verfestigungen sowie an hydraulisch gebundene Tragschichten die gleichen Anforderungen für die stoffliche Zusammensetzung gestellt. Somit wäre ein Einsatz von aufbereitetem Mauerwerksbruch mit bis zu 30 M.% Ziegelbruch zulässig, wobei die Anforderungen an die Abstufung des Korngerüstes (wie Korngruppen, Korngrößenverteilung, Überkorn, Feinkornanteil) durch den herstellenden Recycling-Betrieb sicher gestellt werden müssen.

Bei einem Vergleich mit den Ergebnissen aus der Eignungsprüfung bzw. Überwachung von Baustoffen (siehe Tabelle 3) zeigt sich, dass auch das Material mit dem höchsten Anteil an Ziegelbruch (12,6 M. %, Material Nr. 4) die geforderten Eigenschaften aufweist.

3.4.2.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche

Die Einhaltung der Anforderung von einer maximalen Wasseraufnahme der festgelegten Kategorie Wcm 0,5 ist aufgrund von Erfahrungswerten nicht zu erwarten, so dass die Prüfung des „Widerstandes gegen Frostbeanspruchung“ erfolgen muss. Die

Abwitterung beim Frost-Tauwechsel liegt bei reinem Ziegelbruch gerade noch innerhalb der gemäß TL Gestein-StB 04 zulässigen Anforderungen (s. Tabelle 1).

Die restlichen Gemischbestandteile (Betonbruch bzw. natürliche Gesteinskörnungen) weisen jedoch einen wesentlich höheren Widerstand gegen Frostbeanspruchung auf. Da diese mengenmäßig einen wesentlich größeren Anteil an der Produktmischung haben, müssten auch bei einem höheren Anteil an Ziegelbruch am Gesamtgemisch die Anforderungen sicher eingehalten werden können.

3.4.2.3 Fazit

Bei einer qualifizierten Aufbereitung von Hochbauschutt sollten RC-Produkte herstellbar sein, die die bauphysikalischen Anforderungen der gängigen Regelwerke einhalten. Dies sollte auch bei einem höheren Anteil an Mauerwerks- und Ziegelbruch in der Produktmischung der Fall sein. Möglicherweise lässt sich der gesamte nach TL Gestein StB 04 maximal zulässige Anteil von Ziegelbruch mit 30 m.-% in Anspruch nehmen.

3.4.3 Schichten aus Beton im Straßenbau

3.4.3.1 Anforderungen

Analog zu den Fahrbahnen aus Asphalt gibt es auch bei Fahrbahndecken aus Beton verschiedene Schichten an die unterschiedliche Anforderungen gestellt werden. In der Praxis wird zwischen der eigentlichen Deck- oder Verschleißschicht und den darunter liegenden Tragschichten unterschieden.

Im Allgemeinen werden RC-Gesteinskörnungen nicht zur Herstellung von Betondeckschichten verwendet. Dies gilt auch dann nicht, wenn reiner Altbeton als Ausgangsmaterial verwendet wird. Die entscheidenden limitierenden Randbedingungen sind Widerstand gegen Polieren als auch die Frostbeanspruchung und hier insbesondere der Widerstand gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung nach DIN EN 1367-1, Anhang B.

Der Widerstand gegen Polieren von groben Gesteinskörnungen, die in Deckschichten einschließlich Abstreusplitt und Oberflächenbehandlungen verwendet werden, ist als PSV (polished stone value) gemäß DIN EN 1097-8 zu bestimmen. Es liegen keine Informationen für Gesteinsmischungen vor, die in Anteilen auf Mauerwerksschutt zurückgreifen. Da Fahrbahndecken Tausalz in Verbindung mit Frost ausgesetzt sind, ist die Exposition und Beanspruchung des Baustoffes sehr hoch. Auch hierzu liegen keine Erfahrungen aus Eignungsprüfungen von Gesteinsmischungen mit Anteilen an Mauerwerk vor. Die Erfahrungen aus der Herstellung von Transportbeton auf Basis von RC-Gesteinskörnungen zeigen, dass selbst RC-Gesteinskörnung aus reinem Altbeton die Anforderungen an die Wasseraufnahme und den Frostwiderstand (IFEU 2010) nur

nach hohem Aufwand einhalten. Auch Ergebnisse aus der Schweiz zur Herstellung von Transportbeton aus Mischabbruchgranulat (Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA) et al. 2004)) weisen in diese Richtung.

RC-Gesteinsgranulat insbesondere mit Anteilen an Mauerwerksschutt ist für Betondeckschichten nicht geeignet.

Soll RC-Gesteinskörnung in den Unterbeton eingesetzt werden, ist für den Widerstand gegen die Frostbeanspruchung von weniger als 2 M.-% gemäß DIN EN 1367-1 einzuhalten. Im Rahmen des Projektes zum Einsatz von RC-Beton in Stuttgart (IFEU 2010) ergab die Eignungsprüfung der RC-Gesteinskörnung aus 99% Altbeton in der Korngruppe 8/16 einen Wert von 3,2 M-%.

RC-Gesteinskörnungen mit Anteilen an Mauerwerksschutt lassen sich nur in Betontragschichten einsetzen.

Die Anforderungen an die dort einzusetzende Gesteinskörnung nach TL Gestein-StB 04 unterscheiden sich für viele Parameter nicht von denen, die auch für die Verwendung in ungebundenen Schichten diskutiert wurden (siehe Tabelle 9).

Die Kornform grober Gesteinskörnungen wird nach DIN EN 933-4 als Kornformkennzahl oder nach DIN EN 933-3 als Plattigkeitskennzahl bestimmt. Das Prüfverfahren nach DIN EN 933-3 ist das Referenzprüfverfahren. Die Anforderungen lauten in beiden Fällen kleiner gleich 50.

Die Gesteinskörnungen müssen ausreichende Widerstandsfähigkeit gegen Zertrümmerung aufweisen. Der Widerstand gegen Zertrümmerung wird als Schlagzertrümmerungswert gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-2, Abschnitt 6, oder als Los-Angeles-Koeffizient gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-2, Abschnitt 6, bestimmt. Das Los-Angeles-Prüfverfahren ist das Referenzprüfverfahren. Die Anforderungen liegen bei kleiner gleich 32 bzw. kleiner gleich 40 für die Korngruppen 8/12,5 bzw. 10/14.

Der Nachweis des ausreichenden Widerstandes gegen Frostbeanspruchung hat durch die Bestimmung der Wasseraufnahme, falls erforderlich mit anschließender Bestimmung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung oder direkt durch die Bestimmung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung zu erfolgen. Wenn die Wasseraufnahme als Kriterium für die Prüfung des Widerstandes gegen Frostbeanspruchung gefordert wird, ist sie gemäß den Prüfverfahren der DIN EN 1097-6, Anhang B zu bestimmen. Wird die Anforderung der Kategorie Wcm 0,5 nicht eingehalten, ist der Widerstand gegen Frostbeanspruchung nach DIN EN 1367-1 zu bestimmen. Der Zielwert liegt bei weniger als 4 M.-%.

3.4.3.2 Bewertung typischer Einsatzbereiche

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktivität von Gesteinskörnungen nach DAfStB-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädliche Alkalireaktionen im Beton“ (Alkali-Richtlinie) ist zu bestimmen. Da der Beton im Straßen-Unterbeton in der Regel keiner Wasserbeanspruchung ausgesetzt ist, hat dieser Parameter keine zentrale Bedeutung. Wird in der Betonrezeptur der Anteil an Zement als Bindemittel auf weniger als 300 kg/m³ begrenzt, muss die Reaktivität der Gesteinskörnung nicht beachtet werden.

Die Gesteinskörnung darf keine Bestandteile aufweisen, die das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des Betons stören. Gesteinskörnungen und Füller, die organische oder andere Stoffe in solchen Mengen enthalten, dass das Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten von hydraulisch gebundenen Gemischen verändert wird, müssen in Übereinstimmung mit DIN EN 1744-1, Abschnitt 15.3, hinsichtlich ihres Einflusses auf Erstarrungszeit und Druckfestigkeit beurteilt werden.

Werte zur Rohdichte sind in der TL Gestein-StB 04 nicht vorgeben. Trotzdem stellt die Rohdichte ein entscheidendes Kriterium zur Beurteilung der Eignung einer Gesteinskörnung für die Betonherstellung dar, da darüber wesentlich die Eignung des Betons selbst beeinflusst wird.

Durch die EMPA (et al. 2004) wurden Gesteinsmischungen größer 8mm für die Betonherstellung untersucht, die bis zu etwa 28% Backstein und Ziegel d.h. Mauerwerksschutt enthielten. Die erreichten Rohdichten lagen zwischen 1.900 kg/m³ und 2.400 kg/m³. Die Betondecken im Straßenbau müssen eine Betonfestigkeit von 37 N/mm² (Eifert et al. 2004) aufweisen, was der Druckfestigkeitsklasse C 35/45 entsprechen würde. Die Betontragschichten dagegen dürften eher im Bereich von C 20/25 oder darunter liegen. Im Hochbau sind hier nach der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton RC-Gesteinskörnungen GK II bis zu einem Anteil von 35% eingesetzt werden. Diese Gesteinskörnung weist einen Anteil an Körnungen aus Ziegelmauerwerk von maximal 30% auf.

Wie auch bei bituminösen Schichten im Straßenbau, werden an Schichten aus Beton im Straßenbau gemäß TL-Gestein-StB 04 hohe Anforderungen gestellt.

Für den gebundenen Einsatz im Straßenbau werden gemäß TL Gestein-StB 04 an die unterschiedlichen Schichten aus Beton die jeweils gleichen Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung gestellt. Somit wäre ein Einsatz von aufbereitetem Mauerwerksbruch, mit bis zu 30 M.-% Ziegelbruch, in Schichten aus Beton im Straßenbau (gemäß den Anforderungen der TL-Gestein-StB 04 an die stoffliche Zusammensetzung) zulässig.

Die unterschiedlichen Produktanforderungen zeigen, dass RC-Gesteinskörnungen mit Mauerwerksanteilen nur in Betontragschichten eingesetzt werden können. Hier allerdings tendenziell in Anteilen bis zu 30 M.-%.

Auch für eine lokale Begrenzung der nach „Alkali-Richtlinie“ angegebenen Vorkommen von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen nach Teil 2 der Alkali-Richtlinie ist in Ba-

den-Württemberg ein Auftreten von problematischen Materialien im Hochbauschutt nicht gänzlich auszuschließen. Bei gebrochenen Gesteinskörnungen die nicht als unbedenklich einzustufen sind, kann das Schnellprüfverfahren angewendet werden, so die Zementgehalte auch bei Druckfestigkeiten von C 20/25 und darunter nicht auf weniger als 300 kg/m³ begrenzt werden können.

3.4.3.3 Fazit

Für die Herstellung von gebundenen Schichten im Straßen- und Wegebau zeigen sich zwei Bauprodukte, die für die Aufnahme von RC-Gesteinskörnungen geeignet wären. Diese könnten auch höhere Anteile an Mauerwerksschutt aufweisen.

In der Praxis wird dies für HGT hydraulisch gebundene Tragschichten schon am ehesten umgesetzt.

Der Einsatz von RC-Gesteinskörnungen als Tragschichten bei Betondecken ist in der Praxis noch nicht realisiert worden. Am ehesten könnte dies noch aus Altbeton erfolgen, der beim Rückbau der Betondecken im Überschuss anfällt. Dies würde allerdings eine mobile Betonmischanlage vor Ort voraussetzen. Ein Einsatz von RC-Gesteinskörnungen mit Anteilen an Mauerwerkssplitt dürfte bislang noch nicht erfolgt sein.

3.5 Transportbeton zum Einsatz im Hochbau

Für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in RC-Betonen im Hochbau existieren z.Z. verschiedene Regelwerke. Am 1. Juni 2004 wurde europaweit die DIN EN 12620: 2003-04 (Gesteinskörnungen für Beton) bauaufsichtlich eingeführt und löste damit die DIN 4226-1 ab, die für Beton und Mörtel galt.

Da die DIN EN 12620 für die betonherstellende Industrie jedoch zu allgemein gehalten ist, wurden in Deutschland - bis zur Erstellung einer neuen landesweiten Norm - für rezyklierte Gesteinskörnungen weiterhin die Bestimmungen der DIN 4226-100 herangezogen.

Die Richtlinie des „Deutschen Ausschusses für Stahlbau“ (DAfStb) von 2004, als Umsetzung der Normen DIN EN 206-1, der DIN 1045-2 sowie der DIN 4226-100 wurde in 2010 überabreitet. Die überarbeitete DAfStb-Richtlinie von 2010 fungiert dabei als deutsche Anwendungsnorm der übergeordneten DIN EN 12620.

Sonstige weitere „Restnormen“ wie die TL Gestein-StB bleiben für den Straßenbau weiterhin gültig.

3.5.1 Anforderungen

Nach der **DAfStb-Richtlinie** aus dem Jahre 2010 (Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620) Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1) ergeben sich folgende Anforderungen:

1) Anwendungsbereich

Diese Richtlinie gilt für die sortenreine Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen der Typen 1 und 2 nach Tabelle 1 (siehe Tabelle 10) dieser Richtlinie zur Herstellung und Verarbeitung von Beton ach DIN 1045-2 und DIN EN 206-1 bis zu einer Druckfestigkeitsklasse C30/37 unter Beachtung der Einschränkungen von Absatz (3) und Absatz (4). Bauteile aus Beton, welche unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen bis zu den in Tabelle 5 (s. Tabelle 11) angegebenen Höchstanteilen hergestellt werden, dürfen nach DIN EN 1992-1-1 bemessen werden (…).

Rezyklierte Gesteinskörnungen dürfen für Bauteile in trocknen Umgebungsbedingungen, entsprechend der Klasse WO der Alkalirichtlinie, z.B. für trockene Innenbauteile XC1, ohne weitere Bedingungen verwendet werden.

(…)

2) Anforderungen

Es dürfen nur RC-Gesteinskörnungen größer 2mm eingesetzt werden. Diese werden in zwei Kategorien unterschieden: Typ 1: Betonsplitt; Typ 2: Bauwerksplitt.

Rezyklierte Gesteinskörnungen müssen die in Tabelle 2 (s. Tabelle 11) aufgeführten Regelanforderungen erfüllen. Für bestimmte Expositionsklassen oder Arten der Verwendung können andere Anforderungen maßgebend sein, die in Tabelle 3 der Richtlinie aufgeführt sind. Die Anforderungen haben in dem Zusammenhang der Verwendung von Mauerwerksanteilen in Gesteinskörnungen keine Bedeutung.

Tabelle 10: Rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07, Abschnitt 5.8

Spalte	1	2	3
Zeile	**Bestandteile** [a)]	**Kategorie der Gesteinskörnung**	
		Typ 1	**Typ 2**
1	*Rc + Ru*	Rcu_{90}	Rcu_{70}
2	*Rb*	Rb_{10-}	Rb_{30-}
3	*Ra*	Ra_{1-}	Ra_{1-}
4	*X + Rg*	XRg_{1-}	XRg_{1-}
5	*FL*	FL_{2-}	FL_{2-}

Dabei bedeuten:

Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauerstein aus Beton

Ru: Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung

Rb: Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton

Ra: Bitumenhaltige Materialien

Rg: Glas

X: Sonstige Materialien: Bindige Materialien (d.h. Ton und Boden)

Verschiedene sonstige Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips

FL: Schwimmendes Material im Volumen

Tabelle 11: Regelanforderungen für rezyklierte Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620

	1	2	3	4
	Eigenschaft	**DIN EN 12620**	**Kategorie der Gesteinskörnung**	
			Typ 1	**Typ 2**
1	Kornzusammensetzung	4.3		
1a	Grobe Gesteinskörnungen mit D/d ≤ 2 oder	4.3.2	$G_C85/20$	$G_C80/20$
1b	Korngemische	4.3.5	G_A90	G_A85
2	Kornform (Plattigkeitszahl / Kornformkennzahl)	4.4	≤ 50 oder ≤ 55	
4	Feinanteile			
4a	Grobe Gesteinskörnung	4.6	≤ 4 M.-%	
5	Kornrohdichte	5.5	≥ 2000 kg/m³	
5a	Schwankungsbreite bezogen auf den vom Hersteller deklarierten Mittelwert der Kornrohdichte	5.5	± 150 kg/m³	
11	Frost-Tau-Widerstand[a)]	5.7.1	≤ 4 M.-%	
13	Säurelösliches Chlorid	6.2	≤ 0,04% Massenanteil	
14	Säurelösliches Sulfat für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstückschlacke	6.3.1	≤ 0,8% Massenanteil	
15	Gesamtschwefelgehalt für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstückschlacke	6.3.2	≤ 1% Massenanteil	
16	Leichtgewichtige organische Verunreinigungen von grober Gesteinskörnung, natürlich zusammengesetzter Gesteinskörnung 0/8 und von Korngemischen	6.4.1 und G.4	≤ 0,1% Massenanteil	

[a)] Alternativ kann der Frost-Tau-Widerstand rezyklierter Gesteinskörnungen auch mittels Betonprüfung nach Anhang A dieser Richtlinie nachgewiesen werden

Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen muss die Anforderungen von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 erfüllen, falls nachstehend keine anderen Festlegungen getroffen werden.

3) Herstellung des Betons

Die Zusammensetzung des Betons ist anhand einer erweiterten Erstprüfung nach Abschnitt 4 festzulegen.

Rezyklierte Gesteinskörnungen dürfen höchstens mit den in Tabelle 5 (siehe Tabelle 12) angegeben Anteilen zugegeben werden

Tabelle 12: Zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen größer 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%)

Spalte	1	2	3	4
Zeile	Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
	Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Typ 1	Typ 2
1	WO (trocken)	Karbonatisierung XC1	≤ 45	≤ 35
2	WFa) (feucht)	Kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4		
3		Frostangriff ohne Taumitteleinwirkung XF1 a) und XF3 a) und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35	≤ 25
4		Chemischer Angriff(XA1)	≤ 25	≤ 25
[a)] Zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt 1, (3) und (4)				

3.5.2 Fazit

Gemäß der überarbeiteten DAfStB-Richtlinie (Januar 2011) ist bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen für Betone nach DIN EN 206 1 und DIN 1045 2 sowohl der zulässige Anteil der rezyklierten Gesteinskörnungen bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung, als auch die stoffliche Zusammensetzung dieser rezyklierten Gesteinskörnungen zu beachten.

Für die stoffliche Zusammensetzung ist somit der Anteil an Ziegelbruch (Bestandteile „Rb“ nach DIN EN 12620:2008 07, Abschnitt 5.8) für die genannten Gesteinskörnungen nach Typ 1 auf 4,5 % sowie für den Typ 2 auf 10,5 % der gesamten Gesteinskörnung beschränkt.

Während es erste Bauvorhaben gibt, bei denen im Hochbau Beton verwendet wird, der in Anteilen auf eine RC-Gesteinskörnung nach Typ 1 zurück greift (vergleiche auch www.rc-beton.de), ist die Verwendung des Typs 2 bislang nur in der Schweiz erfolgt. Hier wurden bspw. in Bauvorhaben (Geschosswohnungsbau) des sozialen Wohnungsbaus (Wohnüberbauung Werdwies) in großem Umfang Betone aus Mischabbruchgranulat eingesetzt.

Aus wirtschaftlichen Gründen liegt dies in Ballungsräumen wahrscheinlich auch in Deutschland nahe. Die Herstellung der RC-Gesteinskörnung ist für einen Bauschuttrecyclingbetrieb einfacher möglich als eine Gesteinskörnung nach Typ 1. Er kann zudem für die Herstellung auf nahezu den gesamten Inputmassenstrom zurückgreifen. Diese Gesteinskörnung dürfte sich gegenüber primärer Gesteinskörnung besser auf dem Markt behaupten können. Die entsprechenden Betonrezepturen allerdings müssen von jedem Betonwerk erst entwickelt werden.

4 Einsatzmöglichkeiten aus Sicht der umwelttechnischen Regelwerke

Eine Verwendung von RC-Baustoffen (Allgemein) sowie BmF (Erdbau) mit Hinblick auf ihre umwelttechnische Eignung wird in verschiedenen einschlägigen Regelwerken behandelt. Es werden in ihnen Empfehlungen zum Einsatzort bzw. der Einbauweise von unterschiedlichen RC-Baustoffen beschrieben.

4.1 Rechtliche Situation

Im Folgenden werden die aktuellen, sowie zukünftig gültigen Regelwerke für die umwelttechnischen Anforderungen von RC-Materialien dargestellt.

Erlass “Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“

Das Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg hat am 13.04.2004 einen Erlass mit dem Titel „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“ herausgegeben. In diesen werden die Regelungen für die Teile II und III der LAGA M 20 länderspezifisch für Baden-Württemberg angewandt.

QRB

Das Qualitätssicherungssystem Recycling-Baustoffe Baden-Württemberg e.V. (QRB) wurde im Oktober 2004 gegründet. Damit reagierte die baden-württembergische Baustoff-Recyclingindustrie auf den Erlass des Umwelt- und Verkehrsministeriums Baden-Württemberg (UVM) zum Einsatz von Recycling-Baustoffen vom 13. April 2004. Das QRB wurde vom Umwelt- und Verkehrsministerium als erste und bislang einzige Gütegemeinschaft in Baden-Württemberg anerkannt.

Ersatzbaustoffverordnung (Entwurf)

Im Rahmen der geplanten Verordnung des Bundes der „Verordnung zur Festlegung von Anforderungen für das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser, an den Einbau von Ersatzbaustoffen und für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material“ (Mantelverordnung) wurden die einzelnen Teile als Rechtsverordnungen veröffentlicht.

Diese Mantelverordnung enthält Festlegungen von Anforderungen für:

- das Einbringen und das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser (Artikel 1),
- an den Einbau von Ersatzbaustoffen (Artikel 2) und
- für die Verwendung von Boden und bodenähnlichem Material (Artikel 3).

Der Artikel 2 oder auch die Ersatzbaustoffverordnung (EBV) liegt aktuell als zweiter Arbeitsentwurf (AE), in der Fassung vom 06.Januar 2011 vor.

Mit der EBV sollen folgende wichtige Inhalte geregelt werden:

- Die Bundesweite, einheitliche und rechtsverbindliche Regelung zur schadlosen Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen zu technischen Zwecken und zur Verwertung,
- Aufheben von Rechtsunsicherheiten bei der Verwendung und Verwertung von mineralischen Ersatzbaustoffen für alle Beteiligten,
- Verringerung administrativer Vorgänge für den Einbau bzw. für die Verwendung von mineralischen Ersatzbaustoffen zu technischen Zwecken,
- Erhöhung von Wettbewerbschancen bei bundesweiten Bauleistungen und Lieferleistungen durch Aufhebung länderspezifischer Regelungen.

Ein Vergleich der Anforderungen aus den Regelwerken in Baden-Württemberg mit den derzeit diskutierten Vorgaben einer zukünftigen Ersatzbaustoffverordnung ist nicht unmittelbar möglich. Die Werte werden teilweise nach unterschiedlichen Verfahren bestimmt.

Die EBV soll in Zukunft bundesweit die Behandlung und den Einbau von RC-Materialien regeln. Aus diesem Grund wird der Entwurf der EBV als Maßstab für die Einsatzmöglichkeiten von RC-Materialien herangezogen. Nachfolgend soll die EBV und ihre umwelttechnischer Anforderungen an RC-Materialien erläutert werden. Es sollen dabei an einem umwelttechnischen Parameter exemplarisch die Einschränkungen für den Einbau von RC-Materialien diskutiert werden.

4.2 Randbedingungen für die Verwendung von Recyclingbaustoffe gemäß dem Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung

4.2.1 Mögliche Einbauweisen für Recyclingbaustoffe gemäß der RC-Klassen

Recyclingbaustoffe können durch ihre umwelttechnischen oder chemischen Eigenschaften anhand der Materialwerte der Ersatzbaustoffverordnung in die Klassen RC-1, RC-2 und RC-3 unterteilt werden. Diese Klassen haben gemäß dem Anhang 2.2 der EBV im Entwurf unterschiedliche Einsatzmöglichkeiten. Die Klasse RC-1 bietet dabei die vielfältigsten und die Klasse RC-3 die geringsten Einsatzmöglichkeiten.

RC-3:

- Als Stützkorn in hydraulisch bzw. bituminös gebundenen (wasserundurchlässigen) Schichten.

- I.d.R. als Schicht- oder Verfüllmaterial unter hydraulisch bzw. bituminös gebundenen (wasserundurchlässigen) Schichten (min. 1 m GW-Abdeckung und außerhalb von WSG).
- I.d.R. Straßendämme in MTSE Bauweise, Bettungssande (außerhalb des WSG).
- Restliche Einbauweisen i.d.R. nicht zulässig.

Mit den oben skizzierten Möglichkeiten stehen für diese Materialien Verwendungsoptionen offen, die für RC-Baustoffe als typisch gelten können. So werden derartige Baustoffe in der Regel im Rahmen der Errichtung von Verkehrsflächen wie Straßen oder Parkplätze eingesetzt und damit unter einer Asphalt- oder Betonschicht (außerhalb von WSG). Ein weiterer typischer Einsatzbereich ist die Herstellung von Tragkörpern bzw. Bodenaustauschmaterial unter Gebäuden wie insbesondere Industriehallen, der RC-3-Material ebenfalls grundsätzlich offen steht. Die Anforderungen an den Grundwasserflurabstand von größer 1m und eine Lage außerhalb von Wasserschutzgebieten (WSG) lassen sich häufig einhalten.

RC-2:

- Als Stützkorn in hydraulisch bzw. bituminös gebundenen (wasserundurchlässigen) Schichten.
- I.d.R. als Schicht- oder Verfüllmaterial unter hydraulisch bzw. bituminös gebundenen (wasserundurchlässigen) Schichten (min. 1 m GW-Abdeckung).
- Straßendämme in MTSE Bauweise, Bettungssande oder DoB solange der Abstand zum Grundwasser größer als 10 cm ist.
- Restliche Einbauweisen nur in wenigen Ausnahmen zulässig

Die Einsatzmöglichkeiten der Klasse RC-2 beinhalten alle der bereits in Klasse RC-2 aufgeführten Möglichkeiten. Zusätzlich können Baustoffe der Klasse RC-2 auch in der Regel unterhalb einer Asphalt- oder Betonschicht eingebaut werden, welche innerhalb eines Wasserschutzgebietes liegt. Auch die in Klasse RC-3 beschrieben Anwendungen als Material für Straßendämme oder als Bettungssande dürfen zusätzlich innerhalb von WSG eingesetzt werden. Weiterhin dürfen Baustoffe der Klasse RC-2 auch bei Deckschichten ohne Bindemittel (DoB) eingesetzt werden.

RC-1:

- Als Stützkorn in hydraulisch bzw. bituminös gebundenen (wasserundurchlässigen) Schichten.
- Als Schicht- oder Verfüllmaterial unter hydraulisch bzw. bituminös gebundenen (wasserundurchlässigen) Schichten.
- Straßendämme in MTSE Bauweise, solange der Abstand zum Grundwasser größer als 10 cm ist.
- Restliche Einbauweisen (z.B. Arbeitsraumverfüllungen) (außerhalb von WSG) i.d.R. zulässig, wenn mindestens eine 1 m mächtige Grundwasserdeckschicht

aus Sand (Lehm/Schluff/Ton) vorliegt und der Abstand zum Grundwasser größer 1 m ist.

Die Einsatzmöglichkeiten der Klasse RC-1 beinhalten alle bereits in den Klassen RC-3 und RC-2 aufgeführten Möglichkeiten. Bei Anwendungen unterhalb von Asphalt- oder Betonschichten entfällt der Mindestabstand zum Grundwasser. Am weitreichendsten ist die Einsatzmöglichkeit von RC-1 Material in Anwendungen ohne weitere Abdeckung (Verfüllungen), solange die Mindestanforderungen zum unterliegenden Boden sowie zum Grundwasserabstand eingehalten werden.

4.2.2 Abhängigkeit der Verwertbarkeit von Recyclingprodukten durch die Ersatzbaustoffverordnung

Die umwelttechnischen Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung in ihrer aktuellen Fassung haben einen großen Einfluss auf die Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbaustoffen, die den gängigen bauphysikalischen Regelwerken entsprechenden.

Dabei sind die Anforderungen der vornehmlich bauphysikalischen Regelwerke (TL-Gestein-StB, TL-SoB-StB, etc.) häufig unterschiedlich hoch zu den umwelttechnischen Anforderungen der Ersatzbaustoffverordnung. So werden an Recyclingbaustoffe in Anwendungen mit hohen bauphysikalischen Anforderungen, lediglich relativ geringe umwelttechnische Anforderungen gestellt (siehe folgende Abbildung).

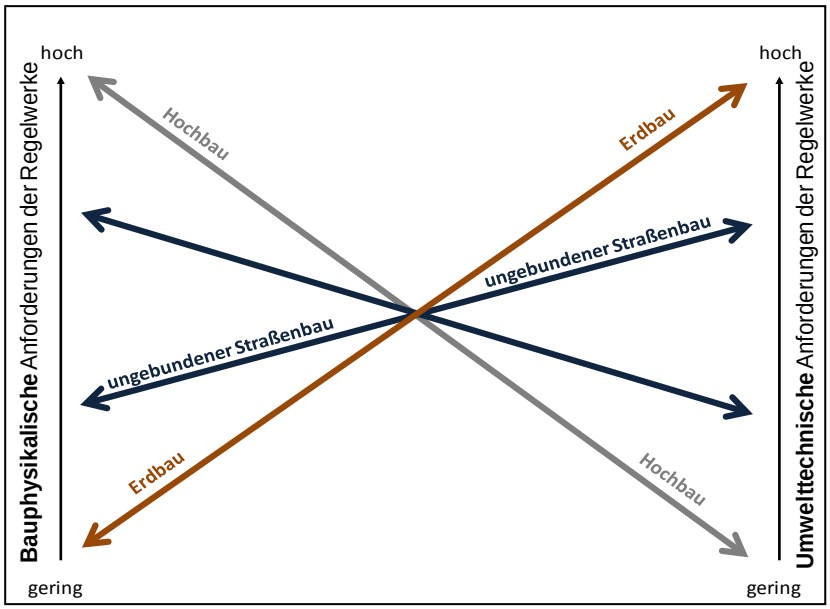

Abbildung 9: Verhältnis der umwelttechnischen und bauphysikalischen Anforderungen der gängigen Regelwerke für unterschiedliche Einsatzzwecke

Recyclingmaterial das bei einer Anwendung in oder unter gebundenen Schichten (Hochbau/gebundener Straßenbau) zum Einsatz kommt, muss sehr hohen bauphysikalischen Anforderungen entsprechen. Da das Recyclingmaterial bei diesen Anwendungen entweder von einer gebunden Schicht umhüllt oder überdeckt wird, ist eine Elution von Schadstoffen stark behindert. Somit sind die umwelttechnischen Anforderungen an solches Recyclingmaterial verhältnismäßig gering.

Im Gegensatz hierzu muss Recyclingmaterial welches z.B. als Verfüllung im Erdbau verwendet wird relativ geringen bauphysikalischen Anforderungen entsprechen. Durch das Fehlen einer Abdeckung könnten jedoch durch Wassereintritt – im Baustoff enthaltene - Schadstoffe eluiiert werden. Deshalb sind die umwelttechnischen Anforderungen an dieses Recyclingmaterial verhältnismäßig hoch.

Vor allem bei Einsatzmöglichkeiten im ungebundenen Straßenbau und im Erdbau können verschiedene Schadstoffparameter der Grund für einen Ausschluss der Recyclingprodukte sein. Die umwelttechnischen Anforderungen der EBV beeinflussen die Verwertbarkeit von Recyclingbaustoffen zum Teil in großem Umfang.

Von der Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW) wurden u.a. in den Jahren 2007/2008 analytische Untersuchungen an RC-Baustoffen durchgeführt.

Bei den Untersuchungen wurde u.a. festgestellt:

„Überschreitungen der Materialwerte des Entwurfs der Ersatzbaustoffverordnung treten am häufigsten bei Sulfat auf. Neben dem Sulfatgehalt würde mit den Materialwerten im derzeitigen Verordnungsentwurf der Vanadiumgehalt zum maßgeblichen Entscheidungskriterium für die Verwertbarkeit von Recyclingbaustoffen werden.“ (LUBW 2008)

Der Vergleich der analytischen Untersuchungen der LUBW wurde mit dem Entwurf der Ersatzbaustoffverordnung in der Fassung vom 13.11.2007 durchgeführt. Die Materialwerte für den Parameter „Vanadium“ wurden in der Ersatzbaustoffverordnung (AE Nr.2) in der Fassung vom 06.01.2011 angehoben. Eine vom Bundesverband der deutschen Ziegelindustrie e.V. in Auftrag gegebene Untersuchung ergab, dass die Quelle des Vanadiums im Ziegel die verwendeten Rohstoffe (Ton, Lehm, Tonschiefer) und damit geogen bedingt sind. Durch den Brennprozess wird Vanadium in den Ziegeln mobilisiert. Wie bereits beschrieben, werden die Anteile von Ziegelbruch in Recyclingbaustoffen durch die gängigen technischen Regelwerke (TL Gestein-StB etc.) begrenzt. Aufgrund der stoffliche Begrenzung (maximal 25 M.-% Ziegelanteil) kommt es zu einem Verdünnungseffekt in den Recyclingbaustoffen für den Parameter Vanadium. Hierdurch ist von einer Einhaltung der Grenz-/Vorsorgewerte nach EBV der Klasse RC-1 auszugehen.

Die Materialwerte für den Parameter „Sulfat“ wurden jedoch in der EBV Fassung von 2011 nur marginal geändert, so dass sich an der Beurteilung des Sulfatgehaltes in RC-Produkten als *„maßgebliches Entscheidungskriterium für die Verwertbarkeit von Recyclingbaustoffen“* nichts geändert hat.

4.3 Relevante Parameter

Zur Orientierung für Einsatzmöglichkeiten aus Sicht der umwelttechnischen Regelwerke sollen für dieses Projekt die relevanten umwelttechnischen Parameter herangezogen werden.

In verschiedenen Untersuchungskampagnen (2003, 2006, 2007, 2009) der LUBW wurden mineralische Baustoffe auf ihre Schadstoffbelastungen untersucht. Die in Recyclinganlagen in Baden-Württemberg hergestellten Bauschuttrecyclingmaterialien wurden durch die LUBW beprobt. An diesen RC-Materialien wurden analytische Untersuchungen auf die in den aktuellen (UVM-Erlass) sowie zukünftigen (EBV) Regelwerken aufgeführten umwelttechnischen Parameter durchgeführt. Die an den Proben festgestellten Analyseergebnisse wurden mit den einzuhaltenden Materialwerten der Regelwerke verglichen.

Es wurde nur für wenige umwelttechnische Parameter Überschreitungen der Materialwerte festgestellt. Die am häufigsten vertretenen Überschreitungen wurden für die Parameter Polyzyclische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) und Sulfate festgestellt.

Für die weitere Beschreibung der Schadstoffsituation in Baden-Württemberg wurden Ergebnisse der Untersuchungskampagne der LUBW aus dem Jahr 2006 herangezogen.

Die folgende Abbildung 10 zeigt den prozentualen Anteil der Proben mit Werten über den Kategorien (Z 1.1 / Z 1.2 / Z 2) des UVM-Erlasses.

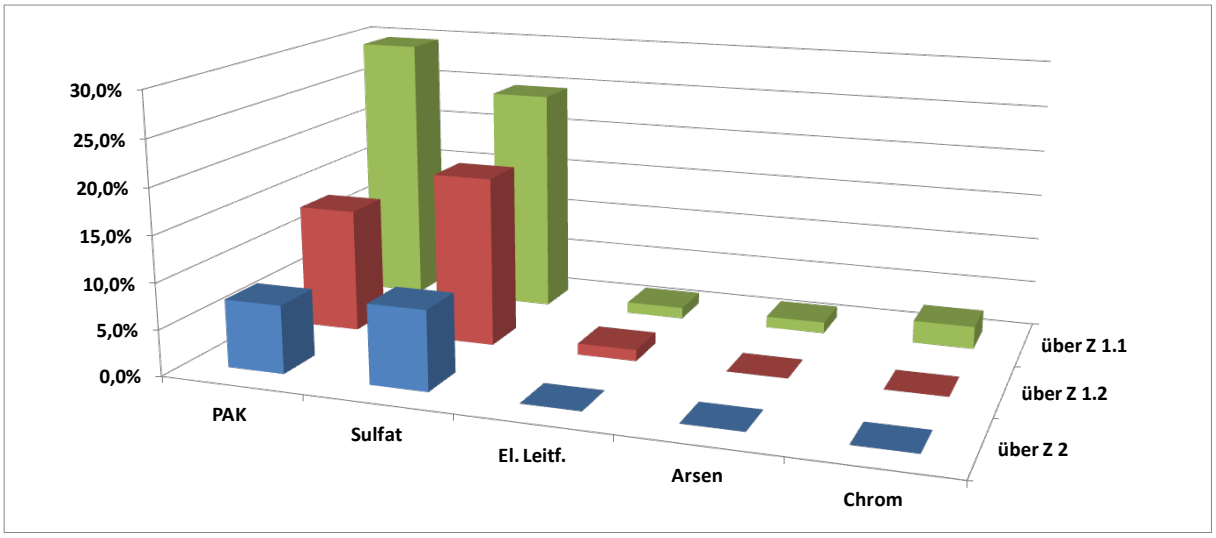

Abbildung 10: Prozentualer Anteil der Proben mit Werten über Z 1.1 / Z 1.2 / Z 2 des UM-Erlasses im Jahr 2006

Es wurden nur bei wenigen Proben die Materialwerte des UVM-Erlasses für die Parameter überschritten. Diese sind in der Abbildung nach den zulässigen Kategorien (Z 1.1 / Z 1.2 / Z 2) dargestellt. Bei den übrigen – in der Abbildung nicht aufgeführten - Parameter wurden keine Überschreitungen der Materialwerte an den Proben festge-

stellt. Die Abbildung ist nach der Häufigkeit der Überschreitungen der Materialwerte aller Proben sortiert. So wurden bei dem Parameter Sulfat bei ca. 25% aller Proben Überschreitungen der Materialwerte für die Kategorie Z 1.1 festgestellt. Die Materialwerte der Kategorie Z 1.2 und Z 2 wurden bei ca. 19% sowie ca. 9% aller Proben überschritten.

Zusätzlich zu dem aktuellen Regelwerk wurden die analytischen Untersuchungen mit den Materialwerten der zukünftig gültigen Ersatzbaustoffverordnung verglichen.

Die folgende Abbildung 11 zeigt den prozentualen Anteil der Proben mit Werten über den Kategorien (RC-1 / RC-2 / RC-3) der Ersatzbaustoffverordnung.

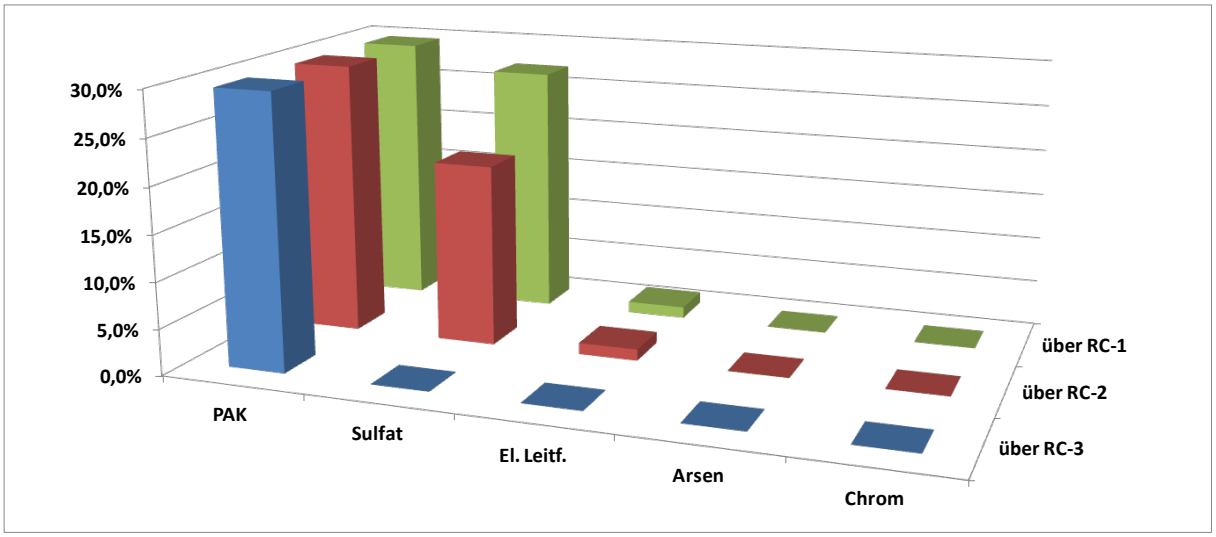

Abbildung 11: Prozentualer Anteil der Proben mit Werten über RC-1 / RC-2 / RC-3 der Ersatzbaustoffverordnung im Jahr 2006

[Anmerkung: Die jeweils gleiche Anzahl an Proben, welche die Materialwerte für den Feststoffparameter PAK überschreiten ergibt sich aus dem gleichen Grenzwert für diese Kategorien]

Eine Betrachtung der Materialwerte der EBV mit den analytischen Untersuchungen zeigt ein recht ähnliches Bild zu den Materialwerten des UVM-Erlasses. In beiden Fällen weisen die Parameter PAK sowie Sulfat die häufigsten Überschreitungen der Materialwerte auf. Die analysierten Proben haben bei den restlichen untersuchten Parameter wie Schwermetalle nur wenigen oder keine Überschreitungen der Materialwerte.

Auch bei den - in den übrigen Jahren - von der LUBW durchgeführten Untersuchungskampagnen zeigt sich ein ähnliches Bild (LUBW 2003 bis 2009).

Die von der LUBW im Zeitraum 2003 bis 2009 ermittelten Datensätze führen zusammenfassend zu dem Schluss, dass bereits seit längerem ein Problem bei Recyclingbaustoffen mit dem Parameter „Sulfat“ bestanden hat.

Die Herkunft der in den RC-Produkten gemessenen Sulfatgehalte kann unterschiedliche Gründe haben.

4.4 Herkunft von Sulfat in Recyclingprodukten

Sulfate in Bauschutt entstammen größtenteils gipshaltigen Materialien des Innenausbaus von Gebäuden. Vom Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (BBS) wurde die Rohstoffgewinnung an Gipssteinen für das Jahr 2008 mit 2,1 Millionen Tonnen beziffert.

Gipsprodukte, die im Baubereich eingesetzt werden, können in zwei Bereiche unterteilt werden:

1. Gipsplatten:
- Gipskartonplatten
- Gipsfaserplatten
- Gipskartonplatten mit Wärmedämmung
- Vollgipsplatten

2. Baugipse:
- Putzmörtel
- Gipsestrich
- Anhydritestrich
- Gipskleber
- Ansetzbinder

Der jährliche Verbrauch an Gips allgemein hat in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten stetig zugenommen. Der Verbrauch von Gipskartonplatten nimmt ebenfalls seit den 90er-Jahren stetig zu. Seit Mitte der 90er-Jahre hat der Verbrauch an Baugipsen jedoch leicht abgenommen bzw. stagniert (Quelle: BBS und DESTATIS).

Gipshaltige Produkte kommen je nach Art und Alter der Gebäude unterschiedlich häufig vor. Im Vergleich zu den anderen - im Hochbau eingesetzten - Baustoffe wie Betone oder Klinker/Ziegel haben gipshaltige Produkte jedoch nur einen sehr geringen Anteil an der gesamten Baumasse. An der Bauhaus-Universität-Weimar (BUW) wurden von Schulz, Müller und Linß eine Untersuchung zur Thematik „Gipsaufkommen in Bauabfällen“ durchgeführt. Dabei wurde ein fünfgeschossiger Plattenbau (P2) vor und nach dem Abbruch auf Gips und Sulfate untersucht.

Anmerkung: Ergebnisse für einen Plattenbau in der Bauweise (P2), die ab den 60er Jahren vor allem in Ostdeutschland verwendet wurde, sind nicht repräsentativ für das gesamte Bundesgebiet anzuwenden und sollen hier nur exemplarisch betrachtet werden.

Für ein P2-Standardgebäude wurden folgende (hochgerechnete) Konzentrationen festgestellt:

- Aufkommen an Gips im Abbruchmaterial ~ 3,5 M.-%
- Aufkommen an Sulfat (SO3) im Abbruchmaterial ~ 1,5 M.-%

Die hochgerechneten Konzentrationen an Gips und damit auch an Sulfat im Abbruchmaterial resultieren aus der Vermischung unterschiedlicher gipshaltiger Baustoffe mit

den restlichen Baustoffen (Beton, Ziegel, etc.). Die ursprünglichen gipshaltigen Produkte haben jeweils sehr unterschiedliche Sulfatgehalte. Die Tabelle 13 zeigt einen Überblick der Sulfatgehalte verschiedener Ausgangsmaterialien des von der Bauhaus Universität Weimar untersuchten Gebäudes.

Tabelle 13: Sulfatgehalte verschiedener Ausgangsmaterialien

Probe	**Bauteil**	**SO_4^{2-}**	**SO_3**
		[mg/l]	[%]
1	Sanitärinnenwand	1481	13,6
2	Aussenwandplatte, Aussenschale	60	0,4
3	Balkonbrüstung	100	1,0
4	Innenwandplatte	50,2	0,4
5	Deckenplatte oben	30	0,4
6	Deckenplatte unten	43	0,3
7	Fußbodenestrich	1463	15,7
8	Abzugsschacht	1506	40,4

Die unterschiedlichen Ausgangsmaterialien lassen sich wiederum in die zwei Bereiche Gipsplatten (Gipskartonplatten, -faserplatten, etc.) sowie Baugipse (Putzmörtel, Gipsestrich, etc.) unterteilen. Die Gipsprodukte der beiden Bereiche unterscheiden sich u.a. auch dadurch wie aufwändig ihr Rückbau ist.

Gipsplatten sind häufig lediglich durch Schrauben am Gebäude befestigt und lassen sich im Gegensatz zu den Baugipsen relativ gut händisch zurückbauen. Baugipse dienen häufig als Verbindung zwischen anderen Baustoffen wie Klinkern oder ähnlichem.

Für die Untersuchung zum Gipsaufkommen wurde von der BUW auch eine Prognose (auf Basis der Gips- und Zementproduktion) für die Entwicklung des Gipsaustrages erstellt. Demnach wird der Austrag an Baugipsen sowie an Gipsplatten in den nächsten 20 Jahren stark zunehmen.

Um einen möglichst geringen Anteil an gipshaltigen Baustoffen im Abbruchmaterial zu erhalten, sollte von den ausführenden Baufirmen ein selektiver Rückbau durchgeführt werden (s.u.).

4.5 Strategien zur Reduktion von Sulfat-Werten in RC-Produkten

Die Sulfat-Werte von Recyclingbaustoffen lassen sich durch zwei unterschiedliche Herangehensweisen reduzieren:

1. Selektiver Rückbau von Gebäuden

Die einfachste Möglichkeit für eine Reduktion von Sulfat-Gehalten in Recyclingprodukten ist gipshaltige Baustoffe möglichst bereits vor dem Abbruch der Gebäude zu entfernen. Dies ist durch einen selektiven Rückbau von Gebäuden zu erreichen, bei dem minderwertige bzw. schädliche Baustoffe (Gipse) von hochwertigen Baustoffen (z.B. Beton) getrennt werden sollen.

Der Aufwand bei einem selektiven Rückbau ist je nach angewendeter Methode unterschiedlich hoch. Eine Abtrennung von z.B. Gipsplatten kann nur händisch erfolgen und ist somit – bezogen auf die Masse - wesentlich kostenintensiver als z.B. die maschinelle Entfernung von massiven Betonteilen.

Manche Baustoffe aus dem Bereich der Baugipse (wie z.B. Putzmörtel und Gipsestriche) lassen sich nur unter sehr hohem personellem Aufwand (Abfräsen) und damit sehr kostenintensiv abtrennen.

Hier muss von der ausführenden Abbruchfirma abgeschätzt werden, inwieweit der Arbeitsaufwand eine entsprechende Abtrennung von sulfathaltigen Baustoffen rechtfertigt.

2. Abtrennung bei der Aufbereitung des Abbruchmaterials

Nach einem selektiven Rückbau kann Abbruchmaterial auch noch gipshaltiger Baustoffe wie Putze oder Mörtel enthalten. Diese müssen möglichst vollständig - im Zuge der Aufbereitung des Abbruchmaterials zu Recyclingbaustoffen - abgetrennt werden.

Für eine hohe Ausschleusung von sulfathaltigem Material ist zuerst zu ermitteln in welchen Materialbestandteilen des Stoffstroms die höchsten Konzentrationen zu finden sind. Bei der schon zuvor beschriebenen Untersuchung „Gipsaufkommen in Bauabfällen“ der Bauhaus-Universität-Weimar wurde der Sulfatgehalt verschiedener Kornfraktionen bestimmt. Das Abbruchmaterial wurde hierfür durch einen Schlagwalzenbrecher gebrochen und anschließend die Fraktion 0/56 mm abgetrennt und analysiert. Die Abbildung 11 zeigt die Verteilung des Sulfatgehaltes innerhalb der Fraktion 0/56 mm. Die höchsten Sulfatgehalte sind in den kleinsten Fraktionen, wie 0/4 und 4/8 mm zu finden.

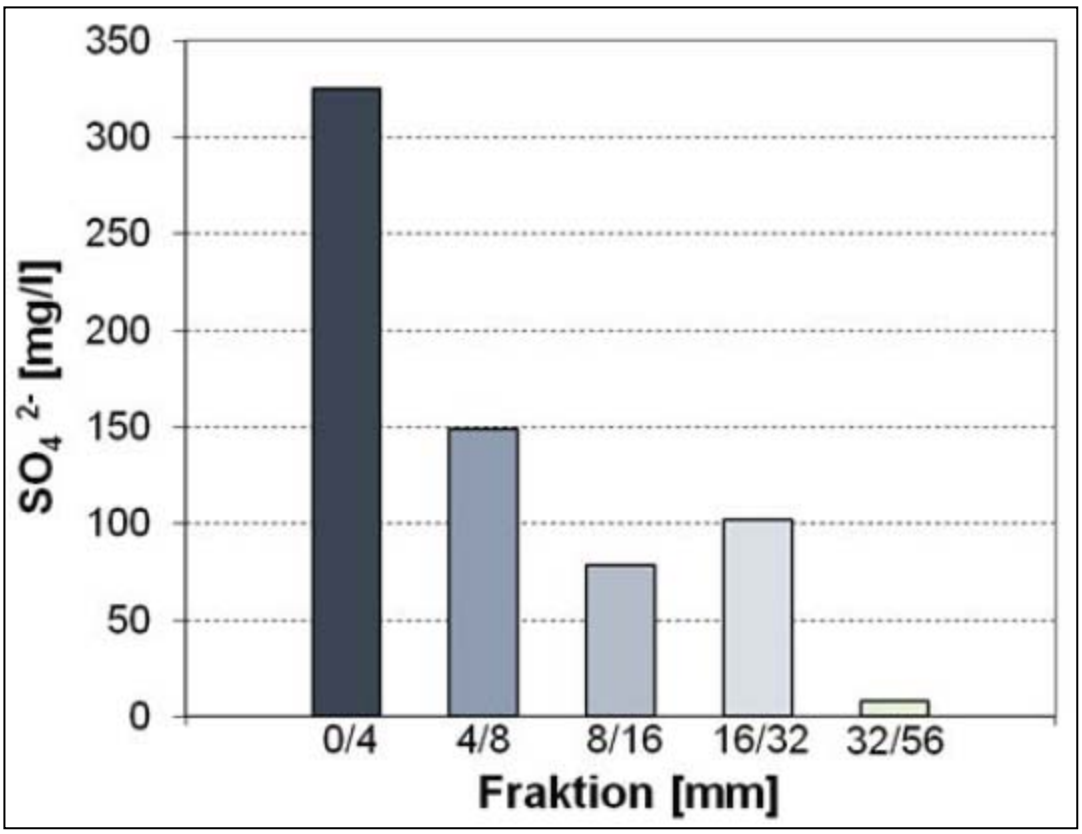

Abbildung 12: Verteilung des Sulfatgehaltes SO4- innerhalb der Fraktion 0/56 mm

Dies ist auf das selektive Zerkleinern der Bestandteile des Abbruchmaterials zurück zu führen. Diese haben jeweils sehr unterschiedliche Kornfestigkeiten und damit auch Zerkleinerungswiderstände. Die Bestandteile mit einem hohen oder mittleren Widerstand gegen Zerkleinerung (Beton, Klinker) fallen nach einem Brechvorgang zumeist in gröberen Fraktionen (16/32, 32/56) an. Gipshaltige Bestandteile wie Putze und Mörtel haben einen sehr geringen Widerstand gegen Zerkleinerung und fallen nach einem Brechvorgang zumeist in den feineren Fraktionen (0/4, 4/8) an.

Auch für andere Schadstoffparameter (PAK, etc.) ist die höchste Konzentration in Abbruchmaterial oder Hochbauschutt meistens in der feineren Kornfraktion zu finden. (Schultmann et al 2008)

Die bei einem Abbruch von Gebäuden anfallenden Hochbauschutteile (Betonstützen, Mauerstücke, etc.) sind zumeist recht grobstückig. Um sie auf eine - für den Transport zum Recyclingbetrieb und die anschließende Aufbereitung in einem Brecher – geeignete Größe zu bringen werden sie häufig durch einen Bagger mittels Abbruchzange zerkleinert. Bei diesem Vorgang sowie dem Ver- bzw. Entladen mittels Bagger wird das Abbruchmaterial mehrfach umgeschichtet. Die an den festeren Bestandteilen anhaftenden Putze und Mörtel werden dadurch teilweise abgeschlagen. Durch die bei den Vorgängen auftretenden Kräfte kommt es zu einer weiteren Zerkleinerung der weiche-

ren Hochbauschutt-Bestandteile. Es entstehen Kornfraktionen mit unterschiedlich hohen Sulfatgehalten.

Anwendung für die Praxis:

Für die Aufbereitung von Abbruchmaterialien in der Praxis bedeutet dies, dass man mit der Abtrennung der feinen Fraktion - das sogenannte „Vorsiebmaterial“ - bereits einen großen Anteil an sulfalthaltigen Bestandteilen aus dem Recyclingprodukt entfernen werden kann. Diese Fraktion ist eine vom Recyclingunternehmen zu definierende Kornfraktionsgröße. Das Vorsiebmaterial enthält zumeist die höchsten Schadstoffgehalte (nicht nur Sulfat), da auch andere Schadstoffgruppen in der feinen Fraktion zu finden sind. Das Vorsiebmaterial kann aufgrund der enthaltenen Schadstoffkonzentrationen meistens keiner weiteren Verwendung zugeführt werden und muss deponiert werden. Von den Recyclingbetrieben ist dabei der abzutrennende Korndurchmesser festzulegen. Bei einer kleineren Kornfraktion ist die Konzentration an Schadstoffen im Vorsiebmaterial entsprechend hoch, wodurch die Entsorgungskosten des Vorsiebmaterials relativ hoch ausfallen. Bei einer größeren Kornfraktion im Vorsiebmaterial ist die Schadstofffracht im Vorsiebmaterial geringer (Verdünnungseffekt), jedoch die zu entsorgenden Massen größer.

Im Zuge dieses Projekts wurden verschiedene Recyclingunternehmen zu ihrer Aufbereitungspraxis von RC-Baustoffen befragt. Von den ausführenden Firmen wird bereits - vor der eigentlichen Aufbereitung des Bauschuttmaterials - beim Abbruch der Gebäude ein hoher Separationsaufwand betrieben. Es wird versucht die anfallenden Baustoffe möglichst vollständig in die Klassen Beton, Asphalt und „rotes“ Bauschuttmischmaterial (Klinker, Ziegel, etc.) zu unterteilen. Dabei werden auch von vornherein händisch Sulfatquellen, wie Gipsplatten entfernt. Bei manchen Unternehmen wird kein eigener Abbruch von Gebäuden durchgeführt. Hier wird ein erhöhter Aufwand bei der Annahme von Hochbauschutt von externen Firmen betrieben. Von dem Bauschuttmischmaterial in der Fraktion 0/200 mm wird vor einer weiteren Behandlung das sogenannte Vorsiebmaterial 0/5 mm abgetrennt. Das verbleibende Materialgemisch (5/200 mm) wird anschließend gebrochen, fraktioniert und als Produkt vermarktet.

Die Beispiele aus der Praxis zeigen, dass auch bei einer relativ kleinen Kornfraktion (0/5) des Vorsiebmaterials, im fertigen Recyclingprodukt die Materialwerte für Sulfat eingehalten werden können. Dies ist durch einen entsprechend hohen Aufwand beim selektiven Rückbau oder erhöhten Überwachungsaufwand bei der Annahme möglich. Bereits vor dem eigentlichen Brechvorgang in einem stationären oder mobilen Brecher kann dabei die Zerkleinerung der gipshaltigen Bestandteile ausreichen, um mit dem Vorsiebmaterial den Großteil des Sulfatgehaltes aus zu schleusen.

4.6 Fazit

Die Verwertbarkeit von Recyclingprodukten wird durch die chemischen Materialwerte und die daraus resultierenden Einsatzmöglichkeiten nach der Ersatzbaustoffverordnung relativ wenig beeinflusst. Da in der Praxis jedoch sehr häufig nur RC-Baustoffe akzeptiert werden, die eine „Belastung“ von RC-1 oder weniger aufweisen (unabhängig von der erlaubten Einbauweisen), haben umwelttechnische Einstufungen faktisch einen großen Stellenwert.

Im Zuge der Umsetzung der Ersatzbaustoffverordnung wird in Baden-Württemberg vor allem der Parameter Sulfat als maßgebliches Entscheidungskriterium für die Verwertbarkeit von Recyclingbaustoffen wirken. Da dieser Parameter jedoch bereits seit längerem als Ausschlusskriterium für Recyclingprodukte bekannt ist, werden von der Recyclingindustrie verschiedene Strategien zur Abtrennung von sulfathaltigen Bestandteilen verfolgt.

Bei einem sachgerechten Abbruch von Gebäuden und einer entsprechenden, qualifizierten Aufbereitung der anfallenden Bauschuttmassen können Recyclingprodukte hergestellt werden, welche auch den hohen umwelttechnischen Anforderungen der Klasse RC-1 der Ersatzbaustoffverordnung entsprechen.

Der dabei entstehende Aufwand, der von Betreibern von Recyclinganlagen erbracht werden muss, um entsprechend hochwertige Produkte herzustellen, kann noch nicht exakt abgeschätzt werden.

5 Situationsaufnahme Bauschuttrecycling

Um einen Überblick über die Herstellung und den Absatz von RC-Produkten in Baden-Württemberg zu erhalten, wurden einige Bauschutt-Recycling-Firmen telefonisch befragt. Nicht alle der befragten Firmen haben sich der QRB Qualitätssicherung Recyclingbaustoffe angeschlossen.

Bei den telefonischen Gesprächen wurden die Firmen u.a. zu den folgenden Punkten befragt:

- Art und Zusammensetzung ihrer RC-Produkte, sowie deren Einsatzgebiete
- Umfang und Form der Güteüberwachung von RC-Produkten
- Explizite Verwendung von Mauerwerksbruch bzw. Ziegelbruch in RC-Produkten
- Vorgehen bei der Trennung von Bauschuttsorten im Zuge von Abbrucharbeiten
- Vorgehen bei der Aufbereitung von Hochbauschutt

Ergänzend dazu erfolgte ein Fachgespräch mit der FG Recycling des Industrieverbandes Steine und Erden Baden-Württemberg ISTE.

5.1 Herstellung und Absatz von Produkten im ungebundenen Bereich

Es ist davon auszugehen, dass von der Mehrzahl der Bauschuttaufbereiter vor allem einfache RC-Produkte hergestellt werden, die für Hinterfüllungen von Arbeitsräumen und als Aufstands-flächen für bspw. Hallenbauten genutzt werden. Nicht selten fehlt es in verschiedenen Regionen Baden-Württembergs für qualifiziertere Produkte an der grundsätzlichen Akzeptanz auf Seiten der Bauherren und damit an den Vermarktungsmöglichkeiten. Diese Situation ist unabhängig von den im Einzelnen tatsächlich erreichten Produktqualitäten, der eingerichteten Güteüberwachung und Zertifizierung sowie einem nach QRB erreichten Produktstatus.

Das zentrale Hemmnis für den Absatz von RC-Bauprodukten ist die mangelnde Akzeptanz auf Seiten der Bauherren. Dies gilt vor allem für den Straßenbau und damit die Institutionen der öffentlichen Hand.

Gerade bei etwas hochwertigeren Produkten, d.h. Produkten mit definierten Eigenschaften für den Straßenbau wird deshalb von den Recyclingbetrieben sehr streng darauf geachtet, dass sich in den Produkten keine Fehlanteile (bspw. organische Bestandteile) befinden, die die Materialeigenschaften negativ beeinflussen. Das Produkt muss zudem möglichst frei sein von Mauerwerksziegelschutt. „Rotes“ Anteile gelten als Indiz für ein minderwertiges Produkt.

Die Akzeptanz wird bei Kunden vermeintlich nur dadurch erreicht, dass das RC-Material frei ist von diesen bunten Bestandteilen. Gerade RC-Produkte für den Straßenbau werden daher vor allem aus reinem Altbetonbruch hergestellt.

Von keinem der befragten Betriebe wurden die durch die verschiedenen technischen Lieferbedingungen eingeräumten Verwertungsoptionen für die Verwendung von Mauerwerksanteil im RC-Produkt in Anspruch genommen. Die ermittelten Anteile an güteüberwachten Produkten für den Straßenbau lagen bei maximal 10% - und damit deutlich unterhalb der möglichen 30%.

Ein weiterer wesentlicher Grund für den weitgehenden Verzicht der Bauschuttrecycler, den RC-Produkten für den Straßenbau Gesteinskörnungen zuzugeben, ergibt sich aus der Produktionsweise der Unternehmen. Gerade die größeren Betriebe mit stationären Anlagen, die gütegesicherte Produkte für den Straßen- und Wegebau herstellen, vermarkten sowohl Schottertragschichten (STS) als auch Frostschutzschichten (FSS). Nicht selten werden diese ungebundenen Schichten gerade im kommunalen Straßenbau auch als kombinierte Schottertrag- und Frostschutzschichten (KFT) angefordert.

Bei den Bauschuttrecyclinganlagen werden jedoch faktisch keine oder kaum Anpassungen im Produktionsablauf in Abhängigkeit vom Produktionsziel vorgenommen. Im Wesentlichen wird ein Produkt für alle drei Absatzwege hergestellt. Damit müssen sich die Eigenschaften und die Qualität des Produktes zwangsläufig an den höchsten Anforderungen eines Absatzweges ausrichten – dies stellt die Schottertragschicht dar.

In der Regel wird von den Recyclingbetrieben nur ein Produkt für den Straßenbau hergestellt. Es wird demnach nicht nach Frostschutzschicht oder Schottertragschicht unterschieden. Da die Eigenschaften für Schottertragschichten nicht mit größeren Anteilen an Mauerwerkschutt in der Gesteinskörnung zu erreichen sind, werden die über die Richtlinien etc. eingeräumten Möglichkeiten nicht ausgenutzt.

Der hohe Stellenwert des Images des RC-Produktes und die fehlenden technischen Möglichkeiten sind ein weiterer Grund für die Zurückhaltung der Bauschuttrecycler gegenüber einer anteiligen Verwendung von Gesteinskörnungen aus Mauerwerksschutt. Im Gegensatz zu Betrieben aus der Primärsteinerzeugung verfügen RC-Betriebe nicht über die technischen Möglichkeiten (wie Dosiereinrichtungen) RC-Produkte aus abgestimmten Gesteinsmischungen herzustellen. Die Mischung erfolgt immer über die Beschickung der Brecher und ergibt sich damit aus den Erfahrungswerten der Radlader-Fahrer. Aufgrund der unterschiedlichen Kornrohdichte und damit verbunden der erreichten Korngrößenverteilung, lassen sich Gesteinsanteile aus Mauerwerk in den einzelnen Korngruppen nur schwierig vorausbestimmen. Kornabstufungen bzw. die Sieblinie können damit von Charge zu Charge deutliche Unterschiede aufweisen.

Zur Herstellung definierter Produkt-Mischungen aus verschiedenen Gesteinskörnungen stehen Recyclingunternehmen keine Dosiereinrichtungen u.ä. zur Verfügung. Für definierte Produkte wird daher möglichst auf homogenes Ausgangsmaterial zurückgegriffen.

Gemischter Bauschutt mit hohen Anteilen an Mauerwerksziegeln kann angesichts dieser genannten Randbedingungen nur für Produkte verwendet werden, deren Produktspezifikationen einfach gehalten sind und bei denen in der Regel die gute Verdichtbarkeit des Materials im Vordergrund steht. Für diese Produkte besteht daher

nur eine sehr beschränkte Erlössituation. Die Kosten der Aufbereitung, die Abtrennung von Fehlanteilen und deren Entsorgung müssen über die Erlöse gedeckt werden, die über die Annahmepreise für derartige mineralische Abfallmassen erzielt werden.

Diese zur Kostendeckung benötigten Erlöse lassen sich nur erzielen, wenn mit einer Aufbereitung konkurrierende Entsorgungswege nicht preisgünstiger sind. Diese möglichen Kostenvorteile ergeben sich aus Unterschieden in den Annahmepreisen sowie aus unterschiedlichen Transportdistanzen und damit Transportkosten. Nicht selten lassen sich Bauschuttrecyclinganlagen antreffen, die nur vergleichsweise geringe Mengen an gemischtem Bauschutt aufbereiten. In manchen Fällen ist dies jedoch auch der Firmenstrategie geschuldet, d.h. es werden vergleichsweise hohe Annahmepreise festgesetzt, um diesen Materialstrom an den Anlagen vorbei zu führen.

Steigende Entfernung von Splitt-Herstellern und damit steigender Preisvorteil lässt die Bedenken gegenüber RC-Produkten schwinden. Dies gilt auch für Produkte mit höheren Anteilen an Mauerwerksschutt.

Die Preise für die RC-Produkte sind von zentraler Bedeutung. RC-Produkte lassen sich nur dann erfolgreich vermarkten, wenn die Produktpreise gegenüber Produkten auf Basis von Primärgestein deutlich günstiger liegen. Dies unabhängig von den erreichten Qualitäten. Die Investition in eine Behandlungstechnik zur Herstellung definierter Produkte lohnt sich demnach für einen recyclingbetrieb nur, wenn die Abbaustätten für primäre Rohstoffe nicht in unmittelbarer Nachbarschaft liegen.

5.2 Herstellung und Absatz im gebundenen Bereich

Weder in Asphaltschichten noch in Betonschichten werden in der Praxis RC-Gesteinskörnungen eingesetzt. Dies liegt zu einem erheblichen Anteil an den sehr hohen bauphysikalischen Anforderungen an die Produkte, die eine Verwendung von RC-Gesteine fast gänzlich ausschließen.

Eine Ausnahme wäre allein für Betontragschichten möglich. Hier dürften sich sogar RC-Gesteinskörnungen einsetzen lassen, die in Anteilen auf Mauerwerksschutt zurückgreifen. In der Praxis werden aber selbst die auf Großbaustellen des Straßenbaus anfallenden Altbetonmassen bestenfalls nur zur Verbesserung der Untergrundeigenschaften und dies ungebunden eingesetzt.

Die Herstellung hydraulisch gebundener Schichten (HGT) im Straßenbau wird in der Regel mit mineralischen Restmassen aus dem Straßenbau durchgeführt. Die hydraulische Einbindung zielt entweder auf chemisch eher problematische Stoffe oder dient der Verbesserung der physikalischen Eigenschaften. Mauerwerksschutt, der aus dem Hochbau stammt, wird sich daher nur selten in HGT-Schichten finden lassen.

Im Hochbau ist es über ein Impulsvorhaben des Umweltministeriums für den Raum Stuttgart gelungen, RC-Beton in ersten Ansätzen auf dem Markt zu etablieren. Zumindest die Betonwerke in Kornwestheim, Waiblingen und Winnenden der Krieger-Gruppe haben diesen Baustoff in ihr Portfolio aufgenommen. Es werden alle für den Hochbau gängigen Betonsorten geliefert, dazu Magerbetone u.ä., die nicht über die Norm bzw. Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton geregelt sind.

Für die Herstellung von RC-Betonen wird bislang aber ausschließlich auf Gesteinskörnung des Typs I zurückgegriffen und damit auf eine Gesteinskörnung, die nahezu vollständig aus aufbereitetem Altbeton beruht. Bei den Betonherstellern gibt es jedoch konkrete Überlegungen, sich auch der Gesteinskörnung Typ 2 zu öffnen und zunächst entsprechende Rezepturen zu entwickeln.

5.3 Herstellung und Absatz von RC-Produkten - Schlussfolgerungen

Die von den befragten Recyclingbetrieben hergestellten RC-Produkte enthalten wie bereits in Kapitel 3 beschrieben abhängig von ihrem Einsatzzweck unterschiedlich große Mengenanteile an Mauerwerksbruch bzw. Ziegelbruch.

Gemischtes Recyclingmaterial, welches keiner Güteüberwachung unterliegt und welches einer Verwendung im Erdbau zugeführt werden soll, kann in der Praxis teilweise bis zu 40 oder 50 M. % Ziegelmaterial enthalten. Die für einen Einsatz im ungebundenen Straßenbau als FSS oder STS produzierten, güteüberwachten RC-Baustoffe enthalten jedoch selten einen Anteil an Ziegelbruch der über 5 bis 10 M. % liegt.

Die gemäß den gängigen Regelwerken ermittelte maximal mögliche stoffliche Zusammensetzung von RC-Produkten von bis zu 30 M. % Ziegelbruch wird somit in der Praxis nur im Erdbau realisiert. Die anderen möglichen Einsatzbereiche für RC-Produkte aus Mauerwerksbruch mit einem möglichst hohen Ziegelanteil kommen auf dem Baustoffmarkt aus den zuvor genannten Gründen nicht zum Tragen. Die von den Recyclingbetrieben hergestellten RC-Produkte für den ungebundenen Straßenbau bestehen fast zur Gänze aus Betonbruch. Die geringen Mengenanteile an Ziegelbruch in diesen RC-Produkten sind außerdem zumeist keine beabsichtigten Stoffanteile sondern sind durch den Aufbereitungsprozess anfallende Beimengungen. Diese werden von den Recyclingbetrieben auch möglichst gering gehalten, um die für die Kunden wichtige Optik nicht negativ zu beeinflussen.

Von den befragten Recyclingbetrieben gaben die meisten an, den beim Aufbereitungsprozess separaten, reinen Betonbruch für ihre güteüberwachten Straßenbauprodukte einzusetzen. Bei diesen lag der Ziegelbruchanteil bei fast Null bzw. bei wenigen Prozentpunkten. Lediglich einige wenige Betriebe gaben an, auch für ihre güteüberwachten Straßenbauprodukte gemischten Bauschutt zu verwenden, dem je nach Aus-

gangsqualität noch Betonbruch zur Optimierung hinzugefügt wird. Bei diesen wiederum wurden die zuvor erwähnten 5 bis 10 M. % an Ziegelbruch festgestellt.

Eine dem Recyclingkreislauf entsprechende Verwendung von Mauerwerksbruch bzw. von Hochbauschutt mit einem höheren Ziegelbruchanteil konnte bei den Befragungen in der Praxis nicht festgestellt werden. Auch die gemäß den gängigen Regelwerke zulässigen höherwertigen Verwendungszecke für RC-Produkte aus Mauerwerksbruch, z.B. im ungebundenen Straßenbau, finden in der Praxis nicht statt.

Lediglich bei sogenannten Monochargen von dichten (nicht porösen) Ziegelmaterialien wie z.B. aus Dachziegeln werden von manchen Recyclingbetrieben separat aufbereitet und z.B. als RC-Baustoff für Dachbegrünungen verkauft. Da diese Chargen aber nur einen sehr kleinen Umfang aufweisen und für diese RC-Produkte auch keine Abbruchmengen aus „gemischtem“ Mauerwerksbruch eingesetzt werden können, wird dieser Verwendungszweck in dieser Untersuchung nicht weiter verfolgt.

6 Einsatzmöglichkeiten von Mauerwerksbruch – das Ideal

6.1 Stoffstrommanagement mineralischer Bauabfälle

Mineralische Bauabfälle sind eine Sammelbezeichnung für unterschiedliche ehemalige mineralische Baustoffe. Die Vielfalt der im Hochbausektor eingesetzten Bauprodukte ist groß. Sie hat in der jüngeren Vergangenheit noch deutlich zugenommen. Das ist möglicherweise ein Trend auch für die kommenden Jahre. Die Bauprodukte weisen definierte Eigenschaften auf, die sie für die einzelnen Einsatzgebiete und –zwecke in den Baukörpern prädestinieren.

Die Vielfalt der Bauprodukte wird in weitem Umfang bestimmt von der Heterogenität der mineralischen Bauabfälle. Der Versuch ist naheliegend, die Heterogenität aufzubrechen und Gruppen von Bauprodukten gemäß ihrer spezifischen Produkt- und damit im Ansatz auch Verwertungseigenschaften zusammen zu fassen und aufbereitet zu RC-Produkten in den Wirtschaftskreislauf zurück zu führen. Dies kann nicht immer gelingen und ist nicht unter allen Randbedingungen sinnvoll (bspw. bei kleinen Massenströmen), kann als Ideal aber die Leitlinie der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle darstellen.

Der größte Massenstrom mineralischer Bauabfälle ist mit Abstand die **Fraktion Boden und Steine** (vgl. auch Kapitel 2). Dieser gelangt derzeit noch häufig auf Deponien, entweder auf Bodendeponien zur Ablagerung oder auf Deponien anderer Deponieklassen insbesondere im Rahmen von Stilllegungs- und Rekultivierungsmaßnahmen. Dieser Entsorgungsweg wird zukünftig immer weniger zur Verfügung stehen. Dies gilt tendenziell auch für die im Zuge von Rekultivierungsmaßnahmen durchgeführten Verfüllungen von Abbaustäten (Steinbrüche, Gruben). Mit neuem Bodenschutzrecht werden hier zukünftig nur noch unbelastete Böden (Z0, Z0*) eingesetzt werden können, was

von Böden aus den erschlossenen Siedlungsbereichen in der Regel nicht eingehalten werden kann.

Auch Böden und hier insbesondere steinreiche Böden stellen eine Ressource dar, die genutzt werden kann. Gerade die Böden, die keine weiteren dezidierten bauphysikalischen Eigenschaften besitzen, sollten in Anwendungen gelangen, die genau auf dieses Profil zugeschnitten sind. Dabei handelt es sich um Verfüllungen, Hinterfüllungen und andere Maßnahmen aus dem Erd- und Tiefbau. Die gefragte Eigenschaft ist das zur Verfügung gestellte Volumen sowie eine möglichst gute Einbaubarkeit bzw. Verdichtbarkeit des Materials. Diese ist gerade bei bindigen Böden nicht immer gegeben. Bindige Böden müssen daher im Zweifel aufbereitet werden, wobei sich hierbei durchaus Massenströme einsetzen lassen, die in anderen Zusammenhängen bei der Aufbereitung anderer mineralischer Bauabfälle als Teilmengen anfallen, insbesondere (Brech)Sande oder Schroppen.

Die Heterogenität des Ausgangsmaterials **gemischter Bauschutt** und hier insbesondere die Kornformen sowie die Korngruppenverteilung machen dieses Material sehr geeignet für Aufstandskörper von Industrie- oder Gewerbegebäuden d.h. insbesondere Hallen. Das Material weist eine gute Verdichtbarkeit bei hoher Standfestigkeit bzw. Übernahme von Lasten auf. Aufbereitete Mauerwerksziegel eignen sich aber durchaus auch für hochwertige Verwertungen sowohl im Straßen- und Wegebau als auch als Zuschlag bei der Betonherstellung.

Auch im Straßen- und Wegebau verlagert sich die Bautätigkeit immer mehr weg von der Erschließung neuer Trassen hin zur Unterhaltung und Ertüchtigung der vorhandenen Straßenkörper. Wird ein Vollausbau durchgeführt, der bei einer Straße nach etwa 40 Jahren erfolgt, wird nicht nur die Asphaltschicht entfernt, sondern auch das Material aus den ungebundenen Schichten des Straßenoberbaus, d.h. aus den Frostschutz- und Schottertragschichten. Die Korngruppenverteilung bzw. die Sieblinie in diesen Produkten entspricht nicht mehr den Anforderungen. Die Körnungen selbst sind unbelastet und nach einer Absiebung der Überschussmassen an Feinanteil bestens für eine erneute Anwendung im Straßenbau und hier insbesondere für die Schottertragschichten geeignet, ergänzt um entsprechende Teilmengen an Primärmaterial oder Körnungen aus aufbereitetem Altbeton.

Für die Herstellung und den Aufbau von Frostschutzschichten eignen sich anteilig Körnungen aus Mauerwerksbruch. Da dies nur in Ausnahmefällen der derzeitigen Praxis entspricht und dies auch nur in kleinen Anteilen am Produkt, müssten zu einer praktischen Umsetzung höherer, nach TL SoB zulässiger Anteile, zunächst Erfahrungen gesammelt werden. Wahrscheinlich wird man derartige Mischungen definierter aus den einzelnen Ausgangskörnungen herstellen müssen, als dies bislang der Fall ist. Dies wird auch dann notwendig sein, wenn Gesteinskörnungen aus Mauerwerksziegel anteilig an der RC-Gesteinskörnung in die Betonherstellung integriert werden sollen.

Gesteinskörnungen aus aufbereitetem Altbeton sollten vorrangig wieder in die Betonherstellung zurückgeführt werden. Wie man Untersuchungen von dem Institut für ökologische Raumanalyse (iör) und dem Büro INTECUS (Deilmann et al, 2010) entneh-

men kann, gibt es derzeit schon Regionen in Deutschland, wo die maximal zulässigen Anteile an RC-Gesteinskörnungen in der Transportbetonherstellung aus aufbereiteten Altbetonen aus dem Hochbau abgedeckt werden könnten. Dies wird mittelfristig für alle Regionen Deutschlands zutreffen. Bei der Aufbereitung von Altbetonen entstehen in großem Umfang Brechsande, die entweder klassisch als Bettungsmaterial in Rohleitungsschächten eingesetzt werden können oder der Konditionierung bindiger Böden dienen könnten. Der hohe Anteil an Zementstein in diesen Brechsanden könnte die Verdichtbarkeit dieser Böden und damit deren Wiederverwertbarkeit erhöhen.

6.2 Die Möglichkeiten für Mauerwerksschutt

Mauerwerksschutt fällt vor allem beim Rückbau / Abbruch von Gebäuden an. Bei diesem Material handelt es sich um ein Gemisch aus allen Arten von mineralischen Baustoffen inklusive auch der Altbetone. Handelt es sich um Gebäude mit hohen Anteilen an Beton, sollten diese Altbetone immer getrennt gehalten und getrennt einer Verwertung in Recyclinganlagen zugeführt werden. Viele RC-Produkte sind auf die spezifischen Eigenschaften von RC-Körnungen aus Altbeton zugeschnitten.

Eine zentrale Weichenstellung für eine hochwertige Aufbereitung von Mauerwerksbruch ist der bereits in Kapitel 4.5 beschriebene selektive Rückbau von Gebäuden.

Hierdurch können die z.T. an Baustoffen anhaftenden Schadstoffe wie z.B. PAK oder Sulfat bereits vor dem eigentlichen Aufbereitungsvorgang aus dem Massenstrom abgeschieden werden. So lassen sich vor allem teerhaltige Anstriche durch Fräsen oder sulfathaltige Gipsplatten durch händische Demontage aus dem Massenstrom frühzeitig abtrennen. Sind Schadstoffe einmal im Zuge der Abbrucharbeiten in den Massenstrom gelangt, so lassen sie sich bei dem eigentlichen Aufbereitungsvorgang entweder gar nicht oder nur noch sehr schwer abtrennen.

Somit ist nicht nur eine qualitativ hochwertige Aufbereitung von Mauerwerksschutt, sondern auch bereits ein qualitativ hochwertiger Abbruch der Gebäude ausschlaggebend. Die Durchführung von (verhältnismäßig aufwändigen) selektiven Abbrucharbeiten lässt sich am effektivsten durch eine klare Beschreibung in den Ausschreibungsunterlagen erreichen. Zur Sicherung der Qualität der durchgeführten Arbeiten können bei einer Ausschreibung die Abbrucharbeiten von einem Gütezeichen abhängig gemacht werden. So kann z.B. ein Abbruch gemäß der Güteklasse Hochbauabbruch 3 (HA 3) nach RAL Gütegemeinschaft Abbrucharbeiten e.V. durchzuführen sein. Durch diese Klassifizierung des Abbruchs werden an das Personal, die Geräte, sowie die Durchführung besondere Anforderungen gestellt. Zusätzlich muss im Leistungsverzeichnis der Ausschreibung genau erläutert werden, wie mit dem abgebrochenen Material weiter zu verfahren ist. Die Materialien sollten bereits beim Abbruchvorgang möglichst sortenrein getrennt werden, um den Eintrag von Fremd- und Schadstoffen in das spätere RC-Produkt möglichst gering zu halten.

Um eine durchgehend qualitätsgesicherte Aufbereitung von Gebäuden zu gewährleisten, sind die beim Abbruch anfallenden Mauerwerksmassen anschließend einer stationären Recyclinganalage anzudienen. In der Anlage werden die anfallenden Massenströme je nach ihrer Art (Betonbruch, gemischtes Material) und Qualität aufbereitet.

Eine weitere Auftrennung innerhalb der Mineralik des gemischten Bauschutts ist nicht möglich bzw. der damit verbundene Aufwand steht in keinem Verhältnis zum erzielbaren Nutzen. Wichtig sind jedoch in allen Fällen eine sichere Abtrennung von Fremdbestandteilen wie bspw. Kunststoffen und Holz, aber auch von Gipsen und anderen problematischen mineralischen Bauprodukten.

Sollen hochwertige Produkte hergestellt werden bzw. aufbereitete Mauerwerksziegel in Anteilen in hochwertige RC-Produkte gelangen, ist eine Vorabtrennung der Feinfraktion notwendig. Dies kann entweder über ein Vorsieb erfolgen oder aber bereits auf der Abbruchbaustelle durch die Verwendung von Sieblöffelbaggern. In letzterem Fall würden diese Feinanteile – nicht selten auch Böden – vor Ort auf der Baustelle verbleiben und dort verbaut werden. Besteht ein guter Absatzweg für Fundationsschichten (oder auch Hinterfüllungen etc.), kann der Siebschnitt auch eher hoch angelegt und dieser Materialstrom als ein Ausgangsmaterial verwendet werden.

Mit diesen beiden Schritten verbleibt ein Ausgangsmaterial, das aus einem Gemisch aus gröberen Anteilen an Altbetonen und Mauerwerk besteht, das nach dem Brechvorgang Gesteinskörnungen verspricht, die eine hohe Kornrohdichte etc. aufweisen müssten, die einen Zusatz in Anteilen zu hochwertigen RC-Produkten gewährleisten sollte. Durch den Brechvorgang gehen die „weicheren“ Ausgangsmaterialien eher in die Feinfraktion über (Brechsand), während sich in den gröberen Körnungen das „härtere“ Ausgangsmaterial anreichern sollte.

Diese Körnungen können dann gezielt sowohl den Straßenbaustoffen bzw. insbesondere dem Produkt Frostschutzschicht (FSS) beigegeben werden oder in Anteilen der Gesteinskörnung, die als Zuschlag in Transportbetonwerken vorgesehen ist.

In beiden Fällen handelt es sich um RC-Gesteinskörnungen, die ausschließlich aus sekundären Rohstoffen hergestellt werden. In beiden Fällen werden die Hauptanteile durch gebrochenen und aufbereiteten Altbeton abgedeckt. Die Herstellung dieser Bauprodukte aus ausschließlich RC-Gesteinskörnungen steht demnach in Konkurrenz zu Produkten gleicher Qualität, die ausschließlich aus primären Gesteinskörnungen hergestellt wurden.

Für das Bauunternehmen bzw. den Bauherren ist jedoch in beiden Fällen entscheidend, ein Produkt in den nachgefragten Eigenschaften mit Gewährleistung aus der Gütesicherung in ausreichenden Mengen zur Verfügung gestellt zu bekommen. Ähnlich dem Herstellungsprozess Beton, bei dem die Abmischung des Endproduktes durch die Betonhersteller aus primären und sekundären Gesteinskörnungen erfolgt, wäre auch für die Bauprodukte für den Straßen- und Wegebau zu überlegen, inwieweit dies nicht auch hier in dieser Weise erfolgen könnte. Die Abmischung des Endproduktes könnte dabei entweder bei dem Bauschuttrecycler oder beim Primärsteinbetrieb erfolgen.

Die Produktion der RC-Gesteinskörnungen muss sich an den Anforderungen des Marktes bzw. den geforderten Produkteigenschaften ausrichten. Sowohl die Auswahl der Ausgangsmaterialien als auch die Konzeption der Aufbereitungsschritte bzw. die Wahl der Aufbereitungstechnik muss in Summe zu diesen geforderten Produktqualitäten führen. In vielen Fällen erfolgt die Aufbereitung ausschließlich aus dem Blickwinkel der Entsorgung, d.h. das Inputmaterial wird gebrochen und das entstehende heterogene Gemisch RC-Gesteinskörnung muss dann in Anwendungsbereiche hinein vermarktet werden, die weniger definierte Produkteigenschaften erfordern.

6.3 Die klassischen Hemmnisse

Die von den meisten Betrieben bemängelte Akzeptanz der Kunden bei Materialien mit einer „schlechten“ Optik ist u.a. auf die immer wieder beschriebene Verringerung der Qualität von RC-Produkten zurück zu führen. Von einzelnen Betriebe wurden aufgrund der fehlenden Akzeptanz von „rotem“ Material bei den Kunden vermehrt Informationskampagnen gestartet, bei denen die einzelnen Beteiligten wie Auftraggeber (öffentlicher und privater Hand), Auftragnehmer (Baufirmen) sowie überwachende Betriebe (Ingenieurbüros) an die „neuen“ Baustoffe herangeführt wurden. Hierbei wurden zumeist höhere Aufbereitungsleistungen und damit auch höhere Kosten für die RC-Produkte in Kauf genommen, um eine für den Kunden relativ gleichbleibende Qualität zu gewährleisten. Eine zertifizierte Güteüberwachung durch qualifizierte Überwachungsinstitute war zumeist jedoch nicht ausreichend, um die bestehenden Vorbehalte der Beteiligten zu zerstreuen. Hierzu waren zusätzlich Besuche der einzelnen Recyclingbetriebe von Nöten, um den Beteiligten die RC-Baustoffe persönlich vorzuführen und an die Hand zu geben.

Dieses Vorgehen wurde zwar nur von wenigen Recyclingbetrieben durchgeführt, hat jedoch durchaus Vorbildcharakter für die Recyclingbranche in Baden-Württemberg. Bis auf wenige Ausnahmen, bei denen die regional dominierende Natursteinindustrie einen höheren Preis von RC-Produkten ökonomisch nicht rechtfertigt, könnten die meisten Recyclingbetriebe diesen Ansatz umsetzen.

Die von den Betrieben immer wieder bemängelte Ausschreibungspraxis müsste durch klare Vorgaben der übergeordneten Verwaltungsstellen geändert werden. So sind z.B. durch Bezug auf die Regelwerke (u.a. TL-Gestein-StB, TL-SoB-StB) Verwertungsoptionen für den Einsatz von RC-Produkten zu schaffen. Anstatt wie bisher einen speziellen Naturstein auszuschreiben, dürften zukünftig nur noch Baustoffe gemäß den zuvor genannten Regelwerken („…Material der Körnung XY gemäß TL-Gestein-StB“) ausgeschrieben werden. Dies könnte zwar in einzelnen Fällen immer noch zu einer Bevorzugung von Natursteinen durch die ausführenden Baufirmen führen, von einem ökonomischem Standpunkt würden jedoch Nebenangebote der Wettbewerber für die zumeist leicht billigeren RC-Baustoffe erleichtert werden.

Bei zu ausgeprägtem Preisdumping auf dem Baustoffmarkt könnte sogar eine explizite Ausschreibung von RC-Baustoffen in den Ausschreibungstexten („…RC-Baustoff der Körnung XY oder gleichwertiges Material“) forciert werden.

Die zuvor beschriebenen Vorbehalte von Auftraggebern der öffentlichen Hand sollten außerdem durch eine vorhergehende Besichtigung von Recyclingbetrieben sowie den RC-Produkten zumindest gemindert werden.

Eine Steigerung der Akzeptanz von RC-Produkten auf dem Baustoffmarkt kann durch eine stärkere Kontrolle der eingesetzten RC-Baustoffe erreicht werden. So ist vor allem bei einem Abbruch von Gebäuden mit einer nachgeschalteten lokalen Aufbereitung des Hochbauschutts auf die hergestellten Produkte zu achten. Die vermutlich zumeist regelkonform durchgeführte Aufbereitung von Hochbauschutt durch mobile Brecheranlagen darf nicht durch einzelne Betriebe in Verruf geraten, welche eine qualitativ minderwertige Aufbereitung mit einem niedrigen Preis rechtfertigen können. Da die so hergestellten Bauschuttgemische zumeist für eine – gemäß den Regelwerken zulässige -Verfüllung im Erdbau eingesetzt werden, dürfen diese Massen nicht über Umwege in den qualifizierten Straßenbau gelangen.

Von den Recyclingbetrieben wurde häufig kommuniziert, dass eine Charge gering qualitativen Bauschuttmaterials alle Bemühungen der restlichen, güteüberwachten Betriebe bei den Auftraggebern zunichtemachen können.

Auch die von den Recyclingbetrieben häufig genannten Probleme mit bestehenden und zukünftigen Materialwerte für umwelttechnische Parameter können durch eine qualitativ hochwertigere Aufbereitung bzw. bereits durch einen differenzierten Abbruch der Gebäudeteile verbessert werden. Von manchen Betrieben die selbst Abbrucharbeiten anbieten wird diese Praxis bereits vorgelebt. So werden, je nach den örtlichen Gegebenheiten, bereits im Vorfeld der Abbrucharbeiten von Mitarbeitern Begehungen der Gebäude durchgeführt. Dabei werden in Zweifels- bzw. Verdachtsfällen Proben der Gebäudesubstanz entnommen und analysiert. Im Anschluss findet dann eine nach der Wertigkeit der Gebäudesubstanz (Betone, Hartziegel, Asphalte, Kalksandsteine, Putze, etc.) differenzierter Abbruch statt. Durch dieses Vorgehen bereits beim Abbruch und einer zusätzlich verbesserten Annahme bei Fremdanlieferungen konnten einige Recyclingbetriebe ihre Probleme mit in Gipsbaustoffen beinhalteten Parameter „Sulfat“ entscheidend verbessern.

7 Fazit und Ausblick

Die Verwertung / Entsorgung des beim Rückbau von Hochbauten anfallenden gemischten Bauschutts gestaltet sich problematisch. Alle Betreiber von Recyclinganlagen beklagen Schwierigkeiten beim Absatz dieser Materialien, manchmal temporär, oft jedoch grundsätzlich. Da das Aufkommen an Bauschutt im Verhältnis zur Baustoffnachfrage eher weiter zunehmen wird, müssen für diese Materialien Absatzwege erschlossen werden, die deren Produkteigenschaften entsprechen.

Wie die vorliegende Studie zeigt, gibt es im Baubereich diverse nachgefragte Produkte mit Eigenschaften, die den Möglichkeiten bzw. Verwertungseigenschaften von gemischtem Bauschutt entgegen kommen.

Stärkung vorhandener Absatzwege

Das „Absatzproblem“ für Produkte, die zumindest in Anteilen aus mineralischen Bauabfällen hergestellt werden, sollte sich in erheblichem Umfang durch eine Stärkung bereits bekannter und begangener Verwertungswege lösen lassen. In allen Fällen bedeutet dies Anstrengungen zur Verbesserung der Informationslage auf allen Seiten und vor allem zur Stärkung der Akzeptanz. Dies ist sowohl für den Absatz in Richtung Erdbau als auch in Richtung Straßen- und Wegebau wichtig.

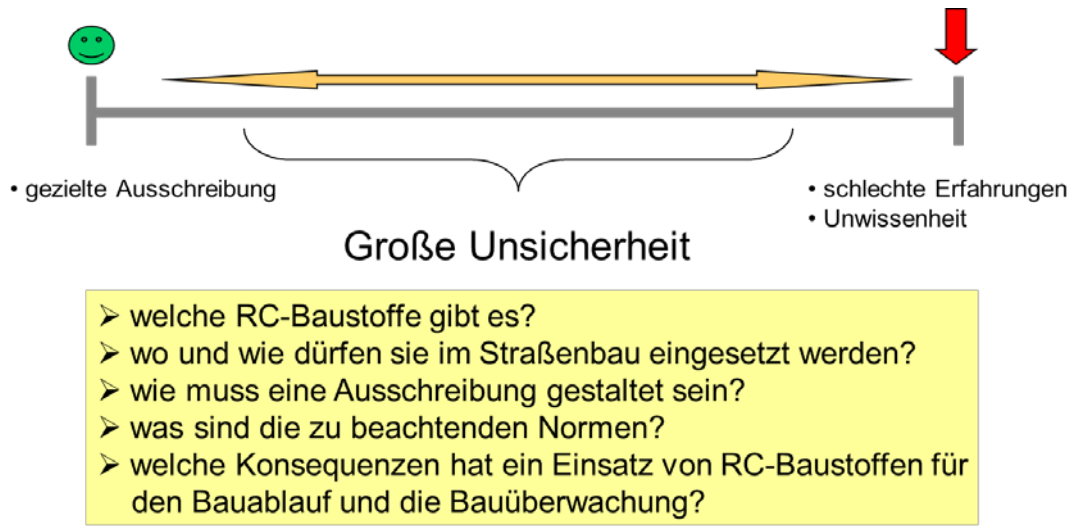

Abbildung 13: Situation bei den Abnehmern von RC-Baustoffen

Diese Akzeptanz ist nachhaltig nur dadurch zu erreichen, dass um gute Praxisbeispiele herum Fachgespräche bzw. Informationsveranstaltungen durchgeführt werden.

Für alle Absatzwege lassen sich nämlich in der Praxis gute Beispiele finden. So gibt es in Baden-Württemberg einige Straßenbaubehörden in Kommunen oder des Landes, die auf eine langjährige Praxis im Einsatz von RC-Baustoffen für Frostschutzschichten und eventuell auch für Schottertragschichten zurückblicken können. Die für die Aus-

schreibung, Angebotsbewertung und Bauüberwachung verantwortlichen Personen sind demnach sehr geeignete Gesprächspartner für Kollegen aus anderen Behörden. Auf der Ebene der Kollegen lassen sich bestens Erfahrungen austauschen. Idealerweise lässt sich eine derartige Veranstaltung mit einem Besuch bei einer Recyclinganlage verbinden, die im konkreten Fall die hochwertigen RC-Baustoffe für den Straßenbau auch tatsächlich herstellt. In vielen Fällen dürften Bauherren kein „Bild" von Recyclingbaustoffen vor Augen haben, sondern Haufwerke aus längst vergangenen Zeiten mit entsprechend hohen Anteilen an Fremdmaterialien etc. pp. Auch die derzeit übliche Praxis der Qualitätssicherung und Güteüberwachung dürfte nicht immer bekannt sein.

Empfehlung:

> Zur Stärkung des klassischen hochwertigen Absatzweges als Frost- oder Schottertragschicht im Straßen- und Wegebau sollten in den verschiedenen Regionen Baden-Württembergs Fachgespräche für die Verantwortlichen der Straßen- und Tiefbauverwaltungen durchgeführt werden. Über die Fachgespräche werden unter Kollegen gute Beispiele aus der Praxis vorgestellt und zum fachlichen Austausch genutzt.

Analog kann auch zum Thema Einsatz im Erdbau verfahren werden, hier verstärkt unter Einbeziehung der Bauindustrie.

Erschließung neuer Absatzwege

Gerade im „gebundenen Bereich" gibt es potenziell Absatzwege, die zulässig und von den Regelwerken ermöglicht sind, aktuell aber nicht begangen werden. Diese Absatzwege gilt es gezielt zu erschließen. Damit lässt sich das in einigen Regionen bestehende „Vermarktungsproblem" quantitativ in den Griff bekommen. Dieser Verwertungsweg eröffnet aber gerade auch für „höher belastete" Materialien, und hierzu zählen aus Akzeptanzgründen meist alle größer RC1 bzw. LAGA Z 1.1, ganz neue Chancen. Gebunden spielen die Fragen der Schadstoffgehalte zu Recht eine deutlich geringere Rolle.

Ein intelligentes Stoffstrommanagement bei den Recyclinganlagen könnte für Materialien im Spektrum Z 1.2 bis Z 2 erstmals hochwertige Absatzwege erschließen. Neben der klassischen HGT d.h. einer hydraulisch gebundenen Tragschicht im Straßen- und Wegebau könnte dies vor allem der Sektor Betonherstellung sein.

Ein Ansatzpunkt könnte hier in Anknüpfung an die guten Erfahrungen durch das Impulsvorhaben des Umweltministeriums zur Einführung von RC-Beton auf Basis der Gesteinskörnung GK Typ I im Raum Stuttgart ein analoges Impulsvorhaben sein, mit dem man nun für die Gesteinskörnung Typ II ein konkretes Bauvorhaben als Referenz auf den Weg bringt. Hierfür wäre ein Bauherr, ein Transportbetonwerk sowie ein Recyclingunternehmen zu gewinnen.

Ein anderer Ansatzpunkt könnte aber auch bei den Bauschuttrecyclingunternehmen selbst ansetzen. Zumindest bei den größeren Betrieben könnte sich die Erweiterung

des Betriebes um eine Betonproduktion anbieten. Diese kann technisch einfach gehalten und auf die Herstellung von Betonsorten, die nicht über Normen geregelt sind, ausgerichtet sein. Dies wären Magerbetone, Randsteinbetone und andere Sorten für den Erdbau und Garten- und Landschaftsbau. „Betontankstellen“ für Kleinmengen könnten hierfür sinnvoll sein, auch weil damit Nischen bedient werden, die nicht in Konkurrenz zur Transportbetonindustrie stehen müssen.

Empfehlung:

Die Produktion von Gesteinskörnung für die Herstellung von RC-Beton für den Hochbau sollte auf die GK II ausgeweitet werden mit Anteilen an Mauerwerksbruch bis 30% oder in höheren Anteilen für die Herstellung von einfachen Betonsorten. Hierzu müssen über konkrete Projekte entsprechende Impulse gesetzt werden.

8 Literatur

8.1 Regelwerke

- Arbeitsentwurf (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV) Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken vom 06.01.2011
- DAfStb-Richtlinie 2010, Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620
- DIN 4226-100, Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen
- DIN 19529 Elution von Feststoffen - Schüttelverfahren zur Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen Stoffen mit einem Wasser-Feststoff-Verhältnis von 2 l/kg; September 2007
- DIN 19528 Elution von Feststoffen – Perkolationsverfahren zur gemeinsamen Untersuchung des Elutionsverhaltens von anorganischen und organischen Stoffen; Juli 2008
- EN 933-11, Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 11: Einteilung der Bestandteilen von recycliertem Grobkorn
- EN 12620:2002+A1, Gesteinskörnungen für Beton
- EN 13285, Anhang A, Ungebundene Gemische – Anforderungen
- EN 13242:2002+A1, Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für den Ingenieur- und Straßenbau
- M TS E, Merkblatt über die Bauweisen für die technischen Sicherungsmaßnahmen beim Einsatz von Böden und Baustoffen mit umweltrelevanten Inhaltsstoffen im Erdbau

- Merkblatt zur Wiederverwendung von Beton aus Fahrbahndecken
- Merkblatt über die Behandlung von Böden und Baustoffen mit Bindemitteln zur Reduzierung der Eluierbarkeit umweltrelevanter Inhaltsstoffe
- MRC, Merkblatt über die Wiederverwertung von mineralischen Baustoffen als Recycling-Baustoffe im Straßenbau
- Protokoll des Fachgesprächs „Geringfügigkeitsschwellenwert Vanadium“ im Umweltbundesamt in Berlin, vom 11. Dezember 2008
- RiStWag, Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wasserschutzgebieten
- RuA-StB 01, Richtlinien für die umweltverträgliche Anwendung von industriellen Nebenprodukten und Recycling-Baustoffen im Straßenbau
- TL BuB E-StB 09, Technische Lieferbedingungen für Böden und Baustoffe im Erdbau des Straßenbaus
- TP-Gestein-StB 04, Teil 3.1.5, Technische Prüfvorschriften für Gesteinskörnungen im Straßenbau
- TL SoB-StB 04, Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau
- TL G SoB-StB 04, Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Teil: Güteüberwachung
- TL Gestein-StB 04, Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau
- UVM-BaWü-QRB-Erlass, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg: “Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“ vom 13. April 2004
- Verordnung über den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV), Arbeitsentwurf vom 13.11.2007, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin 2007
- Verordnung über den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technischen Bauwerken (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV), Zweiter Arbeitsentwurf vom 06.01.2011, Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU), Berlin 2011
- ZTV E-StB 09, Zusätzliche Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau

8.2 Literaturverzeichnis

DESTATIS Statistisches Bundesamt Deutschland, Pressemitteilung Nr.384 vom 14.09.2004

DESTATIS Statistisches Bundesamt Deutschland, Pressemitteilung Nr.384 vom 26.09.2006

Diedrich, R., et al. Rückenstützenbetone mit Recyclingzuschlägen aus Bauschutt, MPA Bremen, Bremen 2001

Eifert, H., et al., Straßenbau heute. Betondecken, herausgegeben vom Bundesverband der Deutschen Zementindustrie, Düsseldorf 2004

EMPA Zürich / Fa. Eberhard Oberglatt / LPM Beinwil, Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch, Studie im Auftrag des Amt für Hochbauten der Stadt Zürich, Zürich 2004 (Bericht Nr. 203600)

EMPA Untersuchung der Grundwasserverträglichkeit von Magerbeton aus RC-Material, Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt, Bericht-Nr. 203600.1, Zürich 2006

F.Schultmann, DFIU Karlsruhe in „Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe“, Institut für Ökologische Wirtschaftsforschung 2008

IFEU / IÖW / Öko-Institut, Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe, Studie im Auftrag des Umweltbundesamtes, Dezember 2008

IFEU, Optimierung der Verwertung mineralischer Bauabfälle, im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, Heidelberg 2010

Kollar, J. Eignung von ziegelreichen Recycling-Baustoffen für Tragschichten ohne Bindemittel, Ruhr-Universität Bochum, Institut für Straßenwesen und Eisenbahnbau 2004

Lippok, J., Korth, D., Abbrucharbeiten. Grundlagen, Vorbereitung, Durchführung, Köln 2007

LUBW Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial, Karlsruhe 2003 bis 2009

LUBW Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, analytische Untersuchung von Bauschuttrecyclingmaterial auf Sulfat und PAK, Karlsruhe 2003

LUBW Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg, Steckbrief: Gipshaltige Produkte aus dem Baubereich, Karlsruhe 2007

Statistischen Landesamtes Baden-Württemberg, Die Abfallwirtschaft in Baden-Württemberg 2010, Stuttgart 2011

Schulz, et al., Gipsaufkommen in Bauabfällen, Bauhaus Universität Weimar, Weimar 2011

Weimann, et al., Optimierung des Rückbaus/Abbruchs von Gebäuden, Bundesanstalt für Materialforschung, Berlin 2011

8.3 Verzeichnis der befragten Recyclingbetriebe in Baden-Württemberg

- AVB GmbH & Co. KG; Berglen-Kottweil
- SRT Bader, Grafenberg
- Baustoff-Recycling-Wyhlen GmbH, Grenzach-Wyhlen
- BAVAK Bauschutt und Holz Verwertungs-Anlage, Karlsruhe
- BBO Bodensee/Hegau GmbH & Co KG, Steißlingen
- Berger GmbH, Plankstadt
- Josef Biechele GmbH & Co. KG, Biberach
- BWG Bauschutt Recycling GmbH, Baden-Baden
- M.Engelhorn GmbH & Co. KG, Leimen
- Heinrich Feess GmbH & Co. KG, Kirchheim/T
- FWA Fischer Weilheim Abbruch GmbH, Weilheim/T
- FEBA Freiburger Erdaushub- und Bauschuttaufbereitungs GmbH, Freiburg
- HBR Heibronner Baustoff-Recycling GmbH & Co. KG, Heilbronn
- InduRec GmbH, Weinheim
- Leis GmbH, Walldürn
- RBW Wiernsheim GmbH, Wiernsheim
- RTBR Reutlinger Tübinger Baustoff-Recycling GmbH, Reutlingen
- SEBA Sekundärbaustoff-GmbH, Lottstetten
- Scherer + Kohl, Mannheim
- Herbert Ubl. Gesellschaft für Baustoff-Recycling mbH, Ubstadt-Weiher
- VBM Recycling, Heddesheim
- Gebrüder Wacker GmbH, Filderstadt-Sielmingen