



INSTITUT FÜR ENERGIE-  
UND UMWELTFORSCHUNG  
HEIDELBERG

---

# Untersuchungs- und Demonstrations- vorhaben zur Intensivierung der Verwen- dung von aufbereitetem Bauschutt als Betonzuschlagsstoff

Im Auftrag des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Ba-  
den-Württemberg

Florian Knappe, Joachim Reinhardt, Dr. Achim Schorb, Stefanie Theis

Heidelberg, Februar 2016

---



**In Zusammenarbeit mit:**



**Fa. Heinrich Feess Erdbau Kirchheim/Teck, Herr Apel, Herr Feeß, Herr Frey, Herr Fritz**



**Krieger Betontechnologiezentrum Remseck, Herr Dziadek, Herr Lieber, Herr Weiß**



**Institut Dr. Haag Kornwestheim, Herr Mändle**



**IAB Institut für angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Herr Landmann**



**TU Kaiserslautern, Herr Prof. Breit, Frau Scheidt**

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>1 Zusammenfassung</b>	<b>7</b>
<b>2 Aufgabenstellung</b>	<b>9</b>
<b>3 Bauprojekte als Impulsvorhaben</b>	<b>13</b>
3.1 Bauvorhaben in Weilheim a. d. Teck	13
3.2 Bauvorhaben in Mannheim-Neuostheim	17
3.3 Bauvorhaben in Stuttgart - Ostheim	19
3.4 Bauvorhaben in Winnenden	22
3.5 Weitere geplante Bauvorhaben	25
3.6 Ökologische Bewertung	27
3.7 Öffentlichkeitsarbeit	33
<b>4 Bauschuttrecycling – Begleitung eines Umstellungsprozesses</b>	<b>34</b>
<b>5 R-Beton - Bewertung des Status Quo</b>	<b>39</b>
<b>6 Aufbereitung auch dezentral</b>	<b>42</b>
6.1 Konzeption und Ablauf der Rückbaumaßnahme	45
6.2 Aufbereitung / Eignungsprüfung	50
6.3 Abwägung von Aufwand und Nutzen	55
6.4 Fazit / Schlussfolgerung	57
<b>7 Entwicklung neuer Betonrezepturen</b>	<b>59</b>
<b>8 Fachsymposium zum R-Beton (2015)</b>	<b>63</b>
<b>9 Exkursion in die Schweiz (2015)</b>	<b>67</b>
9.1 Besuch der Richi AG	67
9.2 Programmpunkt: Bauwerke aus R-Beton	70
<b>10 Fachsymposium R-Beton (2016)</b>	<b>73</b>
<b>11 Analyseprogramm</b>	<b>77</b>
11.1 Erste Untersuchungskampagne Fa. Feess, Werk Rabailen	78
11.2 Zweite Untersuchungskampagne Fa. Feess, Werk Rabailen	80
11.3 Untersuchungskampagne Fa. OTT Teerrecycling, Trochtelfingen	82
11.4 Erkenntnisse über alle Untersuchungskampagnen hinweg	84
<b>12 Ausblick</b>	<b>86</b>

12.1 Weiterer konkreter Handlungsbedarf	89
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>91</b>

# Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 3.1: Betonage der Bodenplatte	15
Abbildung 3.2: Wände und Stützen im Erdgeschoss	15
Abbildung 3.3: Einbau von R-Beton	16
Abbildung 3.4: Rede von Herrn Ministerialdirektor Meinel, UM BW	16
Abbildung 3.5: Bürogebäude Eastsite VIII	19
Abbildung 3.7: Herr Minister Untersteller vor dem Bauwerk	19
Abbildung 3.9: Baustellentermin	20
Abbildung 3.8: Ansicht Südost	21
Abbildung 3.10: Schnitt durch das Gebäude	22
Abbildung 3.12: Ansicht des Waagenhauses	24
Abbildung 3.13: Bauzustand zum Zeitpunkt der Besichtigung	24
Abbildung 3.16: Ökobilanz Betonherstellung	28
Abbildung 3.17: Zuordnung der spez. Lasten // Allokation	30
Abbildung 4.1: Zusammensetzung des Inputmaterial	34
Abbildung 6.1: Entwicklung des Zuwachses an Siedlungsflächen in Baden-Württemberg	42
Abbildung 6.2: Bevölkerungsprognose für die Kreise und kreisfreien Städte in Baden-Württemberg	43
Abbildung 6.3: Ideale Lage der Gesteinskörnungsherstellung am Beispiel Mannheim; Gesteinskörnung: Fa. Scherer + Kohl; Betonwerk: Fa. TBS	44
Abbildung 6.4: Zum Rückbau vorgesehene Gebäude in Denkendorf	45
Abbildung 6.5: Ausbau der Innenwände (Gipsdielen)	46
Abbildung 6.6: Abtragen der Abdeckung und Dämmung des Flachdaches	47
Abbildung 6.7: Ausbau der Innendämmung und Innenverkleidung	47
Abbildung 6.8: Ausbau der Fenster und Türen inkl. Zargen	47
Abbildung 6.9: Entfernen des Wärmedämmverbundsystems	48
Abbildung 6.10: Entfernen des Wärmedämmverbundsystems um die Balkone herum auch händisch	48
Abbildung 6.11: Rückbau und Unterdrückung von Staubemissionen	49
Abbildung 6.12: Getrennte Bereitstellung von Metallen und belasteten Materialien (in Big Bags)	50
Abbildung 6.13: Getrennte Bereitstellung von Holz	50
Abbildung 6.14: Sieblinie der Körnung 0/56mm	51
Abbildung 6.15: Im Jahr 2012 statistische erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle [Kreislaufwirtschaftsträger Bau 2015]	58
Abbildung 9.1: Konstruktion einer Werkshalle aus R-Beton mit großen Spannweiten und Absicherung mittels Stütze (ebenfalls aus R-Beton)	69
Abbildung 9.2: RC-Gesteinskörnung „M“ (Mischabbruchgranulat) in 0/16mm	69

Abbildung 9.3: Bauschutt / Mischabbruch	70
Abbildung 9.4: Bodenbearbeitung / Abtrennung einer Körnung durch eine Separatorschaufel	70
Abbildung 11.1: Beispiel einer Beeinflussung der Sulfatwerte durch die Aufbereitung von gemischtem Bauschutt guter Ausgangsqualität [IFEU et al. 2014]	85

# Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 3.1: Betonsorten R-Beton im Bauvorhaben Weilheim/Teck	16
Tabelle 3.2: Betonsorten R-Beton im Bauvorhaben Stuttgart-Ostheim	21
Tabelle 3.3: Rezepturen für Standardbeton vs. R-Beton (H. Aichele, 2015)	28
Tabelle 3.4: Massenbilanz im Vergleich von Standardrezeptur und Rezeptur für einen R-Beton	29
Tabelle 3.5: Anteil von Ziel- und Nebenprodukten mit den dafür erzielbaren Preisen	30
Tabelle 3.6: Treibhauseffekt für eine vereinfachte Aufbereitung von Primär- und Sekundärgesteinskörnung und für den Transport	32
Tabelle 6.1: Stoffliche Zusammensetzung im Baustoffgemisch 4/56 [Institut Dr. Haag, 2015]	52
Tabelle 6.2: Ergebnisse der chemischen Untersuchung des Materials und Bewertung gemäß des Erlass: „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“, des Umweltministeriums von April 2004 [Institut Dr. Haag, 2015]	53
Tabelle 6.3: Prüfung der stofflichen Zusammensetzung [Institut Dr. Haag, 2015]	54
Tabelle 6.4: Umwelttechnische Bewertung der Gesteinskörnung [Institut Dr. Haag, 2015]	55
Tabelle 7.1: Betonrezepturen außerhalb der Regelwerke; vollständige Substitution der GK > 2 mm [Lieber / Dziadek 2015]	60
Tabelle 11.1: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Altbeton	78
Tabelle 11.2: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Bauschutt	79
Tabelle 11.3: Untersuchungsergebnisse für das Endprodukt 2/16, Lieferkörnung Typ 2	79
Tabelle 11.4: Wertepaare nach den einzelnen Untersuchungsmethoden	80
Tabelle 11.5: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Altbeton	80
Tabelle 11.6: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Bauschutt	81
Tabelle 11.7: Untersuchungsergebnisse für das Endprodukt 2/16, Lieferkörnung Typ 2	81
Tabelle 11.8: Wertepaare nach den einzelnen Untersuchungsmethoden	82
Tabelle 11.9: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Altbeton	82
Tabelle 11.10: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Bauschutt	83
Tabelle 11.11: Untersuchungsergebnisse für das Endprodukt 2/16, Lieferkörnung Typ 2	83
Tabelle 11.12: Wertepaare nach den einzelnen Untersuchungsmethoden	84

# 1 Zusammenfassung

---

Baden-Württemberg hat mit seinen Projekten zur Entwicklung und Einführung des ressourcenschonenden Baustoffs R-Beton einen wichtigen Schritt zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bausektor gemacht, der bundesweit beachtet wird und Impulse gesetzt hat. Baden-Württemberg hat hier eine wichtige Vorreiterrolle eingenommen. Mit dem vorliegenden Bericht werden die jüngsten Aktivitäten in diesem Themenfeld dokumentiert.

Über dieses Vorhaben wurden die Bälle aus den vorangegangenen Projekten aufgenommen und die verschiedenen Handlungsstränge weitergeführt. Wie man anhand des Berichtes unschwer erkennen kann, ist mit diesem abgeschlossenen Projekte wieder ein weiterer wichtiger Schritt in Richtung Schließung von Stoffkreisläufen für mineralische Bauabfälle gelungen. Folgende Handlungsstränge wurden weiterverfolgt:

Der Impuls aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt für das Umweltministerium wurde aufgegriffen und damit die Idee, R-Beton mit Hilfe einer Gesteinskörnung (Liefertyp 2) herzustellen, die in Anteilen nicht nur auf gebrochenen Altbeton, sondern auch auf Mauerwerk zurückgreift. Ein wesentlicher Schritt zur Schließung von Stoffkreisläufen im Bau. Im Rahmen des nun abgeschlossenen Projektes wurden mehrere Bauvorhaben initiiert mit dem Ziel, diese weitere Innovation über die konkreten Praxisbeispiele auf dem Markt bekannt zu machen und einzuführen.

Dies ist sehr gut gelungen, wie auch aus dem abschließenden gezielten Nachfassen deutlich wurde. Die erfolgreiche Praxis animiert Bauschuttreycler und Betonwerke, in die Produktion einzusteigen. Sie hat aber auch Architekten und Bauherren dazu ermutigt, selbst ihre Bauvorhaben für diesen Baustoff zu öffnen. Ein prominentes Beispiel ist der Neubau der Kreisverwaltung Ludwigsburg, der deshalb im Rahmen des Fachsymposiums im Januar 2016 vorgestellt wurde.

Ein zweiter Handlungsstrang bestand darin, die Möglichkeiten zum Einsatz von RC-Gesteinskörnungen in Betonrezepturen über die geltenden Regelwerke hinweg auszuloten. Schon in den vorangegangenen Projekten wurde deutlich, dass dies in gewissem Umfang ohne Abstriche in den Betonqualitäten möglich ist. Im Rahmen dieses Projektes wurden diese Rezepturen nicht nur für ein konkretes Bauvorhaben weiterentwickelt und über eine Genehmigung im Einzelfall (ZiE) auch in dem Waagenhaus der Fa. Schief in Winnenden umgesetzt. Es wurden auch weitere Entwicklungen im Labor durchgeführt, die zeigen, dass bei einfachen Betonsorten 100% der Gesteinskörnung inklusive des Sandes durch RC-Material ersetzt werden kann. Ein deutlicher Fingerzeig, die geltenden Normen und Regelwerke zu überarbeiten.

Die Baustoffalternative R-Beton setzt sich umso einfacher auf dem Markt durch, umso mehr sich dies auch aus ökonomischer Sicht rechnet. Dies ist dann gegeben, wenn sich die RC-Gesteinskörnungen über kürzere Distanzen beziehen lassen als die dazu in Konkurrenz stehenden Natursteine. Ein Ansatz hierfür könnte sein, die Gesteinskörnung bereits auf den Rückbau-Baustellen herzustellen – Typ 1 aus Altbeton. Wie über das Projekt gezeigt werden konnte, ist dies auch in der konkreten Baupraxis ohne Abstriche in den Qualitäten



dann möglich, wenn der Rückbau entsprechend ambitioniert durchgeführt wird und das Gebäude in seiner Substanz aus geeignetem Ausgangsmaterial besteht.

Die Herstellung einer RC-Gesteinskörnung ist mit einigem Aufwand verbunden und bedeutet einige Umstellungen nicht nur in der Technik, sondern auch im Stoffstrommanagement. Dies gilt insbesondere dann, wenn man eine Gesteinskörnung nach Liefertyp 2 herstellen möchte, die in einem Anteil von bis zu 30% auf gebrochenes Mauerwerk zurückgreifen kann. Im Rahmen des nun abgeschlossenen Projektes wurde anhand eines konkreten Praxisbeispiels die Umstellung im Ansatz beratend begleitet. Dies kann ein wenig Richtschnur für weitere Betriebe sein, die ebenfalls eine derartige Umstellung ins Auge fassen.

Ein wichtiger Arbeitsschwerpunkt lag auch in der Öffentlichkeitsarbeit und hier insbesondere in der inhaltlichen Konzeption und Planung der beiden Fachsymposien. Dies im März 2015 und Januar 2016 durchgeführten Veranstaltungen hatten einen großen Zuspruch mit durchweg positiver Rückmeldung. Ergänzend zu der Veranstaltung wurden jeweils auch Fachexkursionen angeboten, die es ebenfalls zu planen und umzusetzen galt.

Im Rahmen des Projektes wurde zudem ein weiteres Problemfeld aufgegriffen und untersucht, das nicht in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Thema R-Beton steht. Es wurden Analysekampagnen gefahren mit dem Ziel, für eine beschränkte Parameterauswahl Paralleluntersuchungen nach zwei Analyseverfahren durchzuführen. Im Ergebnis zeigte sich, dass es eher keine Verhältnisse gibt, die eine Umrechnung der Analysewerte nach einem Verfahren zum Vergleich mit denen aus dem anderen möglich machen. Untersucht wurde nach dem derzeit gültigen Verfahren zur Bestimmung der umwelttechnischen Eignung und nach dem, das mit der neuen Verordnung (Mantelverordnung) zukünftig eingeführt werden soll.

## 2 Aufgabenstellung

---

Gemäß der Ausschreibung wurden mit dem Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben zur Intensivierung der Verwertung von aufbereitetem Bauschutt als Betonzuschlagsstoff konkrete Aufgabenstellungen und Projektziele verbunden, die auf den bisherigen Projekten zum Thema R-Beton aufbauten. Dem Umweltministerium ist es gelungen, den Ressourcenschutz in der Bauwirtschaft durch einige Initiativen und Projekte zur Entwicklung des innovativen Baustoffes R-Beton – Ressourcenschonender Beton – voranzubringen. Baden-Württemberg hat hier Pionierarbeit geleistet, was bundesweit große Beachtung gefunden hat. Darauf aufbauend sind in anderen Bundesländern ebenfalls derartige Initiativen gestartet worden.

In einem ersten wichtigen Schritt wurden Bauherren und Baustofflieferanten dafür gewonnen, in konkreten Bauprojekten R-Beton einzusetzen. Diese Projekte wurden wissenschaftlich und durch eine breite Öffentlichkeitsarbeit begleitet und dies mit nachhaltigem Erfolg. Erste Bauherren beschlossen, ihre Bauvorhaben auch weiterhin mit diesem Baustoff zu realisieren. Erste Baustofflieferanten (Betonwerke und Bauschuttzubereiter) nahmen dieses Bauprodukt in ihr Portfolio auf. In diesem ersten Schritt wurden die Rezepturen für R-Beton ausschließlich unter Verwendung einer RC-Gesteinskörnung nach Liefertyp 1 entwickelt. Diese Gesteinskörnung wird ausschließlich aus der Aufbereitung von Altbeton gewonnen.

Nach den geltenden Regelwerken (v.a. eine Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton) ist auch die Verwendung einer Gesteinskörnung nach Liefertyp 2 möglich. Diese darf bis zu maximal 30 % aus aufbereitetem Mauerwerk (vor allem Ziegel- und Kalksandsteine) bestehen und damit aus Material, das als Bestandteil von Produkten für den Straßen- und Wegebau (Frostschutz- und Schottertragschichten) nur schwer Akzeptanz und damit einen Absatz findet. Die mögliche Vermarktung einer Gesteinskörnung nach Liefertyp 2 an die Betonwerke findet daher bei Bauschuttrecyclern grundsätzlich ein höheres Interesse.

In einem weiteren Forschungsprojekt galt es daher, für Bauschuttrecycler geeignete Strategien zu entwickeln, diese Gesteinskörnung in der geforderten Zusammensetzung und in den geforderten ambitionierten Eigenschaften herzustellen. Zugleich wurden geeignete Betonrezepturen entwickelt und einer Eignungsprüfung unterzogen. Das Projekt konnte erfolgreich abgeschlossen werden. Die Ergebnisse wurden über eine Broschüre veröffentlicht und in einem ersten Fachsymposium vorgestellt.

Um weitere wichtige Impulse für einen verstärkten Einsatz von R-Beton zu geben, sollten mit dem aktuellen Projekt weitere Bauvorhaben als Untersuchungs- und Demonstrationsprojekte entwickelt und öffentlichkeitswirksam begleitet werden. Damit sollen die bisherigen Ergebnisse in der Baupraxis bestätigt und für diesen R-Beton GK Typ 2 geworben werden. Schon in den bisherigen Projekten kam die Rückmeldung aus den Betonlaboren der

beteiligten Betonwerke, dass die geforderten Eigenschaften eines Transportbetons<sup>1</sup> ohne Abstriche auch mit deutlich höheren Anteilen an Mauerwerkssplitt sichergestellt werden können. Hierfür die Möglichkeiten in der Praxis auszuloten, war deshalb ebenfalls Aufgabenstellung des Projektes.

Da sich diese Rezepturen außerhalb der geltenden Regelwerke befinden, musste für das Bauvorhaben bei der Landesstelle für Bautechnik (RP Tübingen) im Rahmen des Projektes eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) beantragt werden. Damit verbunden war auch die Erstellung einer fachgutachterlichen Stellungnahme.

Bauschutt als Rohstoff für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung fällt vor allem in den Städten und Ballungsräumen an und damit in den Räumen, auf die sich seit einigen Jahren die Bautätigkeit und damit die Betonnachfrage konzentrieren. Die Rohstoffversorgung der Betonwerke kann daher in Anteilen über kurze Transportdistanzen erfolgen. Die Abbaustätten für Kies oder Splitt liegen in aller Regel deutlich außerhalb der Ballungsräume. So kommt der Kies für die Region Stuttgart entweder aus dem Oberrhein oder aus Oberschwaben und auch Steinbrüche liegen in aller Regel weiter als 30 km entfernt. Diese kürzeren Transportdistanzen sind sowohl aus ökologischer als auch aus ökonomischer Sicht der entscheidende Vorteil gegenüber konventionellen Betonrezepturen.

Dieser spezifische Vorteil kommt in der Praxis derzeit aber nicht voll zum Tragen, da sich die Anlagen zum Bauschuttrecycling etwas außerhalb des Siedlungskerns befinden. Es stellte sich daher die Frage, ob die bei großen Abbruchvorhaben klassisch eingesetzten mobilen Aufbereitungsanlagen in der Lage wären, diese Gesteinskörnung in der geforderten Qualität bereits vor Ort herzustellen. Dies wurde im Rahmen des Projektes geprüft. Zudem wurde eine vergleichende ökologische Bewertung für die Baustoffalternativen R-Beton und konventioneller Transportbeton erstellt, die auch alle vorgelagerten Prozesse sowie die Transportketten umfasste.

Derzeit besteht in den technischen Regelwerken für RC-Gesteinskörnung eine die Prüfung der Umweltverträglichkeit betreffende Regelungslücke. Die Umweltverträglichkeit für die rezyklierten Gesteinskörnungen ist gemäß Bauregelliste B Teil 1, Anlage 1/1.3 nachzuweisen. Dies hat zur Folge, dass die Hersteller der Gesteinskörnung hierfür beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) in Berlin eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) beantragen müssen. Alle in das Projekt eingebundenen Bauschuttrecycler wurden entsprechend beraten und bei der Antragsstellung unterstützt. Da sich das Zulassungsverfahren als zeitintensiv erwies, musste für die konkreten Bauvorhaben in der Regel ebenfalls eine Zustimmung im Einzelfall (ZiE) eingeholt werden. Diese Anträge wurden jeweils durch das ifeu-Institut.

Alle Bauvorhaben wurden mit einer umfassenden Öffentlichkeitsarbeit begleitet. Hierzu wurden Architekten, Bauingenieure, Baufirmen, Bauherren, Betonwerke, Bauschutt-aufbereiter etc. pp. aus der jeweiligen Region zu Terminen eingeladen, die vor Ort die Bauvorhaben sowie die Baustoffhersteller und deren Produktion vorstellten. Diese Termine waren zugleich auch Presseterminen, zu denen entsprechende Pressemitteilungen erstellt und die örtliche sowie die überregionale Presse geladen wurden.

Als zentraler Baustein der Öffentlichkeitsarbeit wurden zwei Fachsymposien zum Thema R-Beton veranstaltet, die im Rahmen des Projektes inhaltlich entwickelt und organisiert wurden. Auch dies war u.a. mit der Erstellung einiger Fachartikel und Pressemitteilungen verbunden.

<sup>1</sup> An dieser Stelle und im Folgenden wird der Begriff „Transportbeton“ synonym auch für vor-Ort auf der Baustelle hergestellte Betone verwendet. Die in dieser Studie getroffenen Feststellungen können sich auf beide beziehen

Aufbauend auf den bisherigen Broschüren zum Thema R-Beton wurde aus den Erkenntnissen des Projektes heraus zudem ein weiterer Leitfaden erstellt.

Das Projekt und der Baustoff R-Beton fanden im Laufe des Projektes bei einigen Bauherren vertieftes Interesse, sodass zusätzliche Informationsgespräche in Karlsruhe, Ludwigsburg, Reutlingen und Stuttgart durchgeführt wurden.

Die Stoffströme von der Herstellung bis zum Einsatz im Beton sowie der Beton als solcher wurden analytisch begleitet und unterlagen einer entsprechenden Qualitätssicherung. Die Ergebnisse hieraus wurden im Projekt dokumentiert.

Darüber hinaus war im Rahmen des Projektes eine weitergehende analytische Begleitung durchzuführen. Das Material war über die einzelnen Produktionsschritte zur Herstellung der Gesteinskörnung hinweg auf sechs Umweltparameter hin zu untersuchen und zwar sowohl im 1:10-Eluat als auch nach dem Verfahren, das aller Voraussicht nach zukünftig in der Ersatzbaustoffverordnung festgelegt werden wird.

Angesichts dieser umfassenden Aufgabenstellung wurde das Projekt mit Unterstützung zahlreicher **Partner** durchgeführt. Dies waren:

Rückbau eines Gebäudes und dezentrale Aufbereitung vor Ort:

- **Heinrich Feess GmbH & Co. KG, Kirchheim unter Teck**

Produktion und Lieferung der RC-Gesteinskörnung Typ 2:

- **Heinrich Feess GmbH & Co. KG, Kirchheim unter Teck**
- **OTT Teerrecycling GmbH, Trochtelfingen**
- **Scherer & Kohl GmbH & Co. KG, Ludwigshafen (Standort Mannheim)**

Produktion und Lieferung des R-Betons:

- **Winnender Frischbeton GmbH & Co. KG**
- **Godel Beton GmbH, Stuttgart**
- **Holcim Kies und Beton GmbH, Werk Kirchheim unter Teck**
- **TBS Rhein-Neckar GmbH & Co. KG, Mannheim**

Entwicklung von Betonrezepturen für R-Beton über die geltenden Regelwerke hinaus:

- **Krieger Beton-Technologiezentrum GmbH, Remseck am Neckar**

Einbau von R-Beton bei Bauvorhaben der Firmen:

- **B.A.U. GmbH & Co. KG, Mannheim**
- **BWV Bau- und WohnungsVerein Stuttgart**

- **Kreisbaugenossenschaft Kirchheim-Plochingen eG**
- **Schief Entsorgungs- GmbH & Co. KG, Winnenden**

Wissenschaftliche Unterstützung gerade in der Frage der dezentralen Aufbereitung auf der Abbruchbaustelle sowie in der Beratung eines Recyclingbetriebes zur Weiterentwicklung der Aufbereitungsstrategie und –technik durch:

- **IAB Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH**

Analytische Begleitung:

- **Institut Dr. Haag GmbH, Kornwestheim**

### **Erweiterung der Aufgabenstellung**

In den beiden Regionen Nordbaden / Kurpfalz sowie Großraum Stuttgart ist die Innovation R-Beton im Ansatz auf dem Markt angekommen. Es gibt erste Betriebe, die die RC-Gesteinskörnung herstellen und in deren Lieferbereich Transportbetonwerke, die R-Beton in ihr Portfolio aufgenommen haben. Trotzdem gilt das auch in diesen Regionen noch nicht für alle Betriebe. Als hemmend erweist sich vor allem die Rohstoffversorgung der Betonwerke, d.h. die fehlenden Herstellungskapazitäten für RC-Gesteinskörnung. Im Rahmen des Projektes wurde in diesen Regionen mit den Herstellern von RC-Gesteinskörnung aber auch den Betonwerken das Gespräch gesucht mit dem Ziel, diese grundsätzlich zu informieren, ggf. hemmende Rahmenbedingungen zu identifizieren und im Idealfall Partnerschaften / Lieferbeziehungen zu initiieren.

Das Fachsymposium zum Thema Ressourceneffizienz in der Bauwirtschaft bzw. zum ressourcenschonenden Baustoff R-Beton, wurde im Januar 2016 zum dritten Mal durchgeführt. Im Rahmen des Projektes wurde hierfür zunächst die thematische Ausrichtung und darauf aufbauend die inhaltliche Feinplanung und die Gewinnung der Referenten durchgeführt. Zudem wurde eine Fachexkursion geplant und organisiert. Diese Aufgaben wurden gemeinsam mit der Umweltakademie Baden-Württemberg bearbeitet.

## 3 Bauprojekte als Impulsvorhaben

---

Schon zum Zeitpunkt des Angebots waren konkrete Bauvorhaben zu benennen, die im Rahmen des Projektes als Impulsvorhaben zum Einsatz von R-Beton zur Verfügung stünden. Daher wurden bereits im Vorfeld der Beauftragung Kontakt zu einer Vielzahl möglicher Bauherren aufgenommen wurde und im zweiten Schritt für identifizierte Bauvorhaben dann die geeigneten Baustofflieferanten angesprochen und für das Projekt und dessen Aufgabenstellung gewonnen.

Im Laufe des Projektes zeigte sich, dass sich für einige der angedachten Bauvorhaben der Bauzeitenplan soweit verändert hatte, dass deren Rohbauphase nicht mehr durch die Projektlaufzeit abgedeckt war. Erst im Laufe des Projektes wurde deutlich, dass auch bei einem Baustofflieferanten erst noch die Produktion schrittweise umgestellt werden musste. Um dies zu kompensieren wurden während der Projektlaufzeit weitere Akteure angesprochen und gewonnen.

Alle nachfolgend beschriebenen Bauvorhaben wurden in den zentralen Internetauftritt zu R-Beton [www.rc-beton.de](http://www.rc-beton.de) integriert. Unter „Pilotprojekte“ sind die Bauvorhaben als Steckbriefe aufgenommen. Unter „Downloads“ lassen sich zudem die Präsentationen der Fachsymposien finden und damit auch die Präsentationen der Bauherren sowie der Baustofflieferanten aus dem Projekt.

Eines der Impulsvorhaben wurde so konzipiert, dass auch Betonrezepturen über die geltenden Regelwerke hinaus entwickelt und eingesetzt wurden. Dies bedeutete die Notwendigkeit eines gesonderten Zustimmungsverfahrens (ZiE; Zustimmung im Einzelfall) sowie einer entsprechenden fachlichen Begutachtung. Hiermit wurde Herr Prof. Breit von der TU Kaiserslautern beauftragt.

Auch für nahezu alle anderen Bauvorhaben musste jeweils eine ZiE beantragt werden, hier allerdings nur zur Erbringung des Nachweises für die Umweltverträglichkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen. Nicht allen Bauschuttrecyclern lag rechtzeitig die notwendige allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) in Berlin vor.

### 3.1 Bauvorhaben in Weilheim a. d. Teck

In Weilheim an der Teck wurde ein Bauvorhaben der Kreisbau Kirchheim-Plochingen als Demonstrationsobjekt zum Einsatz von R-Beton zur Verfügung gestellt. Die Akteure waren:

- **Bauherr:**  
Kreisbau Kirchheim-Plochingen eG.  
Jesinger Straße 19; 73230 Kirchheim unter Teck, Telefon 07021/8007-0

- **Baufirma:**

Fa.: Bader Bau GmbH  
Max-Eyth-Weg 7/1, 72664 Kohlberg, Telefon 07025/910910

- **Betonwerk:**

Fa. Holcim, Werk Kirchheim/Teck  
Otto-Hahn-Straße 12, 73230 Kirchheim unter Teck, Telefon:07021/942121

- **Lieferant der RC-Gesteinskörnung:**

Fa. Heinrich Feess Erdbau GmbH & Co.KG  
Heinkelstraße 2, 73230 Kirchheim/Teck, Telefon: 07021/98598

Mit einer Bausumme von 2,3 Mio. € wurden 12 Genossenschaftswohnungen (2- und 3-Zimmer-Wohnungen) errichtet, die im Bestand der Kreisbaugenossenschaft Kirchheim-Plochingen eG verbleiben. Im Jahre 2012 aus der Fusion der beiden Genossenschaften Kreisbaugenossenschaft Nürtingen eG und Baugenossenschaft Plochingen eG entstanden, ist die Genossenschaft mit derzeit rund 1.550 eigenen Wohnungen und 1.200 verwalteten Eigentumswohnungen ein großer Bauherr in der Region. Das Vorhaben umfasst etwa 4.200 m<sup>3</sup> BRI, d.h. umbauten Raum.

Im Baubereich Materialkreisläufe zu schließen und ressourcenschonend auf R-Beton zurückzugreifen, wurde von der Baugenossenschaft gerne aufgegriffen. Nicht nur bei dem gewählten Bauvorhaben wurden auch mit anderen Maßnahmen hohe Standards im nachhaltigen Bauen und der energetischen Optimierung gesetzt. R-Beton soll auch bei künftigen Bauvorhaben eine Option darstellen bzw. eingesetzt werden.

Nahezu der gesamte Betonbedarf von etwa 350 m<sup>3</sup> wurde über R-Beton gedeckt und hier auch in Bereichen, die sehr hohe Anforderungen an die Betoneigenschaften stellen. So hat sich der Bauherr dazu entschieden, auch die Sichtbetonwände aus diesem Baustoff herzustellen. Das Kellergeschoss wurde aufgrund der Standortvoraussetzungen mit einem wasserundurchlässigen Beton (Weiße Wanne) ebenfalls in R-Beton ausgeführt. Die Geschossdecken wurden aus Filigrandecken hergestellt, ergänzt um R-Beton als Aufbeton.

Zum Zeitpunkt der Entscheidung zum Einsatz von R-Beton lag für die RC-Gesteinskörnung der Fa. Feess aus Kirchheim/Teck noch keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) des DIBt vor. Auf Basis der Antragsunterlagen und dem Nachweis der Umweltverträglichkeit für die rezyklierte Gesteinskörnung wurde durch das ifeu-Institut beim RP Tübingen, Landesstelle für Bautechnik, erstmals ein Antrag auf Zustimmung im Einzelfall (ZiE) gestellt.



Abbildung 3.1: Betonage der Bodenplatte



Abbildung 3.2: Wände und Stützen im Erdgeschoss





Abbildung 3.3: Einbau von R-Beton



Abbildung 3.4: Rede von Herrn Ministerialdirektor Meinel, UM BW

Tabelle 3.1: Betonsorten R-Beton im Bauvorhaben Weilheim/Teck

C 8/10	29 m <sup>3</sup>	Sauberkeitsschicht
C 12/15	26 m <sup>3</sup>	Bodenaustausch, Fundamentbeton
C 20/25 XC1	52 m <sup>3</sup>	Innenwände
C 20/25 XC3	18 m <sup>3</sup>	Bodenplatte
C 25/30 XC3, XF1	22 m <sup>3</sup>	Frost- und Fundamentriegel
C 25/30 XC3, XF1 WF	30 m <sup>3</sup>	Deckenplatte hWE, SB3
C 25/30 XC4	71 m <sup>3</sup>	Bodenplatte hWE
C 25/30 XC4, XF1	43 m <sup>3</sup>	Außenwände hWE
C 25/30 XC4, XF1, WF	55 m <sup>3</sup>	Sichtbeton SB3

Der Baustellentermin, verbunden mit einer Besichtigung bei der Produktion der Gesteinskörnung bei der Fa. Feess sowie des Betonwerkes der Fa. Holcim in Kirchheim/Teck, fand einen großen Teilnehmerkreis und großes Interesse.

Das Projekt war insofern sehr erfolgreich und dies unmittelbar, als die Fa. Holcim für ihr Werk in Kirchheim/Teck entschied, Transportbetone in den Standardrezepturen zukünftig möglichst immer als R-Beton zu produzieren und dies unter Verwendung der GK-Lieferkörnung Typ 2. Dies entspricht mittlerweile länger geübter Praxis. Das Betonwerk bezieht seit Monaten in großem Umfang RC-Gesteinskörnungen der Fa. Feess aus Kirchheim/Teck.

Nach Rückmeldung der Fa. Fees haben mittlerweile auch weitere Betonwerke im Raum Kirchheim/Teck Lieferungen der Gesteinskörnung erhalten und auch schon Baustellen mit R-Beton beliefert.

Bei den anderen Betonwerken im Raum Stuttgart ist dies nicht in dem Maße der Fall. Hier zeigt sich vor allem die ausreichende Versorgung mit RC-Gesteinskörnung als Problem. Es fehlen derzeit Produzenten mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch das DIBt.

## 3.2 Bauvorhaben in Mannheim-Neuostheim

In Mannheim Neuostheim wurde ein Bauvorhaben des Bauträgers B.A.U. als Demonstrationsobjekt zum Einsatz von R-Beton zur Verfügung gestellt. Die Akteure waren:

- **Bauherr:**  
B.A.U. GmbH & Co. KG  
Seckenheimer Landstraße 2, 68163 Mannheim, Telefon: 0621 / 418950
- **Baufirma:**  
Fa. Altenbach Hochbau GmbH  
Hans-Bunte-Straße 5/1, 69123 Heidelberg, Telefon: 06221 / 77401
- **Betonwerk:**  
Fa. TBS Rhein-Neckar GmbH & Co. KG  
Rheinvorlandstr. 5, 68159 Mannheim, Telefon: 0621 / 1234840
- **Lieferant der RC-Gesteinskörnung:**  
Fa. Scherer & Kohl GmbH & Co. KG  
Rheinhorststraße 63, 67071 Ludwigshafen, Telefon 06 21 / 67 15 0 - 16

Als Eastsite VIII ist dieses Bürogebäude in einen hochwertigen Büropark integriert. B.A.U. versuchte setzte wie auch bei den anderen Gebäuden Maßstäbe hinsichtlich Energieeffizienz und Ressourcenschonung. Die Verwendung von R-Beton passte daher gut in das Gesamtkonzept des Büroparks und in die Philosophie des Bauträgers B.A.U.

Das Gebäude weist eine Bürofläche von 2.000 m<sup>2</sup> auf und wurde in Sandwich-Bauweise errichtet und dies erstmalig auch unter Verwendung von Textilbeton. Die Sandwich-Bauweise gewährt eine gute Dämmung und zugleich Temperatenausgleich. Mit dem Textilbeton konnten deutliche Masseneinsparungen erzielt werden. Das Gebäude besitzt zudem eine Bauteiltemperierung u.a. durch mit Wasser durchströmten Geschosdecken, die für ein konstantes Raumklima sorgen.

Durch den hohen Anteil an Betonfertigteilen wurden nur das Kellergeschoss, die Stützen und Treppenhauswände sowie als Aufbeton auf Filigrandecken Transportbeton eingesetzt. Die Bodenplatte und die erdberührenden Wände wurden mit konventionellem Beton ausgeführt. Im Gebäude wurden dennoch etwa 750 m<sup>3</sup> R-Beton eingesetzt.

Folgende Betonsorten wurden für den Einsatz als R-Beton auf die Baustelle Eastsite VIII geliefert.

- C 8/10, X0 als Bodenaustausch
- C 12/15, X0 als Sauberkeitsschicht
- C 20/25 XC2, W0 für Innenwände und Decken
- C 25/30, XC4 XF1 WF für die Fundamente

Die Belieferung des Bauvorhabens mit R-Beton ist aufgrund der örtlichen Gegebenheiten als idealtypisch anzusehen. Die Baustelle befindet sich am Rande der Innenstadt Mannheims. Das gilt auch für das Betonwerk TBS, das mit seinem Standort in Mannheim Handelshafen nur wenige Meter vom Standort Mannheim der Fa. Scherer & Kohl entfernt liegt, die die RC-Gesteinskörnung als Rohstoff lieferte. Da der Handelshafen sich ebenfalls in Innenstadtnähe befindet, erfolgte auch die Belieferung des Bauschuttrecyclers mit mineralischen Bauabfällen über kurze Transportdistanzen aus den Städten Ludwigshafen und Mannheim.

Die Produktion der Gesteinskörnung Typ 2 erfolgt bei der Fa. Scherer & Kohl am Standort in Mannheim und zwar anfangs direkt aus ihrer Produktion von klassischen Baustoffen für den ungebundenen Einsatz im Straßen- und Wegebau (FSS; STS) heraus. Die Mischung der Gesteinskörnung erfolgt daher bereits vor dem Brecher und stellt die Mischung dar, die auch für die Baustoffe für den Straßenbau produziert wird. Es erfolgt mit der Absiebung im ersten Schritt von < 16 mm und im zweiten Schritt > 2 mm nur noch die Einstellung von Kleinst- und Größtkorn für die Betonindustrie.

Wie auch für die GK Typ 1 (produziert am Standort Ludwigshafen) wurde beim DIBt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Gesteinskörnung Typ 2 beantragt. Die Prüfzeugnisse zur umwelttechnischen Eignung der Gesteinskörnungen unterschreiten deutlich die in der DIN 4226-100 genannten Werte. Da diese auch aktuell als Maßstab für diese abZ herangezogen werden, dürfte in der ersten Jahreshälfte 2016 ein positiver Bescheid erteilt werden. Zum Zeitpunkt der Planung und Festlegung zur Belieferung mit R-Beton lag diese jedoch noch nicht vor, so dass beim RP Tübingen, Landesstelle für Bautechnik, eine Zustimmung im Einzelfall ZiE beantragt werden musste, bezogen allein auf die Frage der umwelttechnischen Eignung der Gesteinskörnung.

Der Baustellentermin, verbunden mit einer Besichtigung des Betonwerkes der Fa. TBS in Mannheim fand großes Interesse.



Abbildung 3.5: Bürogebäude Eastsite VIII



Abbildung 3.6: Herr Minister Untersteller vor dem Bauwerk

### 3.3 Bauvorhaben in Stuttgart - Ostheim

Der BWV Bau- und Wohnungsverein aus Stuttgart stellte bereits zum zweiten Mal ein Bauvorhaben als Demonstrationsprojekt zur Verfügung. Das erste Bauvorhaben war in der Raitelsbergstraße, bei dem erstmalig im Stuttgarter Raum R-Beton eingesetzt wurde, der nach den Vorgaben der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton mit Einsatz der Gesteinskörnung Liefertyp 1 produziert wurde. Beim Bauvorhaben Am Klingebach,

ebenfalls in Stuttgart – Ost gelegen, erfolgte nun erstmals für Stuttgart der Einsatz eines Betons, der auf die Gesteinskörnung im Liefertyp 2 zurückgreift.

Die Akteure waren:

- **Bauherr:**  
BWV Bau- und Wohnungsverein Stuttgart  
Schwabenbergstraße 64, 70188 Stuttgart, Telefon: 0711 / 94541100
- **Baufirma:**  
Fa. Gottlob Rommel GmbH & Co.KG  
Von-Pistorius-Straße 14, 70188 Stuttgart, Telefon: 0711 / 255650
- **Betonwerk:**  
Fa. Godel Beton GmbH  
Glemsgaustraße 95A, 70499 Stuttgart/Weilimdorf, Telefon: 0711 / 1399630
- **Lieferant der RC-Gesteinskörnung:**  
Fa. Heinrich Feess Erdbau GmbH & Co.KG  
Heinkelstraße 2, 73230 Kirchheim/Teck, Telefon: 07021/98598

Die Lieferdistanz zwischen dem Hersteller der Gesteinskörnung und dem Betonwerk ist nicht ideal und dem Umstand geschuldet, dass es derzeit nur zwei Lieferanten im Großraum Stuttgart gibt, die den Nachweis der Umweltverträglichkeit ihrer hergestellten rezyklierten Gesteinskörnung mit einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung erbringen können. Mit dem Rückgriff auf diese Gesteinskörnung konnte das Verfahren einer Zustimmung im Einzelfall ZiE für das Bauvorhaben umgangen werden.

Beim Bauvorhaben des BWV am Klingenbachpark handelt es sich um eine Ersatzbebauung. Es wurden alte nicht mehr sanierungsfähige Wohnblöcke rückgebaut und durch Neubauten ersetzt. Das im Rahmen des Projektes erbaute Gebäude war das letzte in dieser Reihe. Das Gebäude wird 14 Wohnungen mit 1.300 m<sup>2</sup> Wohnfläche aufweisen.



Abbildung 3.7: Baustellentermin

Sämtlicher Transportbeton in diesem Gebäude wird als R-Beton geliefert. Es handelt sich um einen C 20/25 in den für innenliegende Gebäudeteile typischen Expositionsklassen. Die

aufgehenden Wände wurden in der Regel mit Betonschalungssteinen gemauert und anschließend mit R-Beton vergossen. Bei den Decken handelt es sich um Filigrandecken, die mit R-Beton als Aufbeton ergänzt wurden. Insgesamt wurden folgenden Betonsorten n R-Beton eingesetzt:

Tabelle 3.2: Betonsorten R-Beton im Bauvorhaben Stuttgart-Ostheim

C 12/15	400 m <sup>3</sup>	Sauberkeitsschicht / Magerbetonauffüllungen
C 25/30 XC2, WF	55 + 5 m <sup>3</sup>	Fundamente + Fundamente Tiefgarage
C 30/37 WU XC2, WF	4 + 4 m <sup>3</sup>	Bodenplatte + Wände Aufzugsunterfahrt
C 25/30 XC2, WF	82 m <sup>3</sup>	Bodenplatte
C 25/30 XC3, XF1, WF	12 + 1 + 35 m <sup>3</sup>	Wände + Stützen Tiefgarage + Decke über Tiefgarage Außenbereich
C 25/30 XC2, WF	67 m <sup>3</sup>	Außenwände UG
C 25/30 XC1, WO	175 + 14 + 300 m <sup>3</sup>	Wände + Stützen + Geschossdecken im Innenbereich
C35/45 XD3, XC4, XF4, WA	8 m <sup>3</sup>	Wände im Außenbereich
C 25/30 XC3, WO	50 m <sup>3</sup>	Dachdecken inkl. Abdichtung und Dämmung
C 25/30 XC4, XF1, WF	21 m <sup>3</sup>	Balkone ungedämmt
C25/30	137 m <sup>3</sup>	Gisoton Füllsteine



Abbildung 3.8: Ansicht Südost

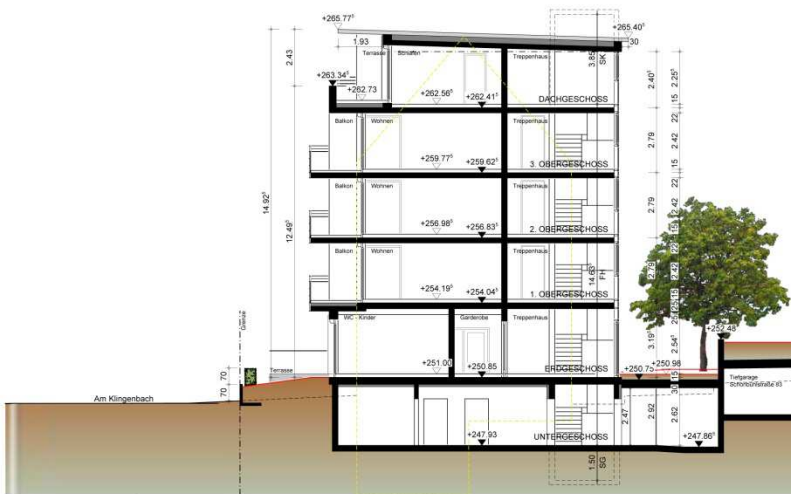


Abbildung 3.9: Schnitt durch das Gebäude

### 3.4 Bauvorhaben in Winnenden

In Winnenden wurde ein Bauvorhaben der Fa. Schief als Demonstrationsobjekt zum Einsatz von R-Beton zur Verfügung gestellt. Die Fa. Schief ist ein Betrieb aus der Abfallwirtschaft, der am Standort Winnenden Sortieranlagen insbesondere für Papier betreibt und auch andere Abfälle umschlägt und teilweise behandelt. Mit dem Einsatz von R-Beton die Kreislaufwirtschaft auf dem Bau zu fördern, passt daher gut in das Gesamtkonzept des Betriebes. Die Akteure waren:

- **Bauherr:**  
Fa. Schief Entsorgungs GmbH & Co.KG  
Daimlerstraße 14, 71364 Winnenden, Telefon: 07195 / 91100
- **Baufirma:**  
Fa. Erich Schief GmbH & Co.KG Bauunternehmen  
Wiesenstraße 20, 71364 Winnenden, Telefon: 07195 / 18010
- **Betonwerk:**  
Winnender Frischbeton GmbH & Co KG  
Daimlerstraße 18, 71364 Winnenden, Telefon. 07195 / 919140
- **Lieferant der RC-Gesteinskörnung:**  
Fa. Heinrich Feess Erdbau GmbH & Co. KG  
Heinkelstraße 2, 73230 Kirchheim/Teck, Telefon: 07021/98598

Das Bauprojekt in Winnenden zeigte eine für den Einsatz von R-Beton im Ansatz ideale Konstellation. Die Baustelle befand sich wenige Meter vom Betonwerk entfernt. Der Betrieb Fa. Schief Entsorgung bereitet bisher nur in geringem Umfang mineralische Bauabfälle auf und dies nur für einfache Anwendungszwecke. Sollte diese Aufbereitung erweitert und optimiert werden, läge zukünftig der Rohstofflieferant in direkter

Nachbarschaft zum Betonwerk. Die Fa. Schief hält sich diese Option offen. Nicht nur für dieses Bauvorhaben wird Winnender Frischbeton von der Fa. Feess aus Kirchheim/Teck mit Gesteinskörnungen beliefert.

Dieses Bauprojekt sticht deshalb aus der Reihe der weiteren Demonstrationsprojekte heraus, weil hier nicht nur regelkonformer, sozusagen Standard-R-Beton eingesetzt wurde. Durch die Erfahrungen und Erkenntnisse aus vorangegangenen Projekten zum Thema R-Beton und den entsprechenden Entwicklungen und Versuchen im Betonlabor in Remseck (<http://www.betonverbund.de/technologiezentrum.html>) gestützt, wurden für dieses Bauvorhaben Betonrezepturen entwickelt, die gezielt über die geltenden Regelwerke (Richtlinie des Dt. Ausschusses für Stahlbeton: „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen) hinaus RC-Gesteinskörnung verwendeten. Auf die Rezepte und die Ergebnisse der Eignungsprüfung wird an anderer Stelle (Kapitel 5) näher eingegangen.

Auch für dieses Bauvorhaben war eine Zustimmung im Einzelfall ZiE durch das RP Tübingen notwendig. In diesem Falle jedoch nicht in der Frage der umwelttechnischen Eignung der eingesetzten RC-Gesteinskörnung. Der Fa. Feess lag zum Zeitpunkt der Rezepturenentwicklungen bereits die abZ allgemeine bauaufsichtliche Zulassung durch das DIBt vor. Die ZiE war in diesem Falle wegen des geplanten Einsatzes eines nicht zugelassenen Baustoffes (R-Beton außerhalb der Regelwerke) notwendig. Der Antrag wurde auch hier durch das ifeu-Institut gestellt und letztendlich positiv beschieden. Hierfür war eine umfangreiche Begutachtung durch Herrn Prof. Breit (MPA der TU Kaiserslautern) notwendig, der aus dem Projekt heraus beauftragt wurde.

Im Rahmen des Projektes wurden Beton-Rezepturen für die Errichtung einer Stützmauer sowie für das Wiegehaus entwickelt.

Im Bauvorhaben Wiegehaus wurde Beton der Eigenschaften C 25/30 XC3, XF1 und XA1 eingesetzt und zwar etwa 150 m<sup>3</sup>. Für diese Betone war eine Betonrezeptur vorgesehen, für die in der Korngruppe 2/16 mm 100 % RC-Gesteinskörnung des Liefertyp 1 eingesetzt wurde. Entgegen der Vorgaben der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton würden somit anstatt der maximal möglichen 25 % bis 45 % nun 64 % der Gesteinskörnung Liefertyp 1 im Zuschlag eingesetzt. In Konsequenz wurde damit die gesamte Gesteinskörnung > 2 mm als RC-Gestein verwendet. Als primärer Rohstoff im Zuschlag blieb nur die Sandfraktion mit 36%.

Außerdem wurde eine Stützmauer erstellt, um mit 2,60 m Höhe den Hang gegen die unterhalb liegende Fahrbahn abzustützen. Die Betonfestigkeitsklasse wurde mit C30/37 vorgesehen in den Expositionsklassen XC4; XF2(LP); XD2; XA1. Alternativ dazu wurde eine weitere Rezeptur entwickelt mit einer Druckfestigkeit von C35/45 mit gleichen Expositionsklassen, allerdings ohne Verwendung von Luftporen (LP). Beide Sorten greifen ebenfalls mit der kompletten Kornfraktion 2/16 mm auf eine RC-Gesteinskörnung Liefertyp 1 zu.

Es wurde die RC-Gesteinskörnung Liefertyp 1 (und nicht Typ 2 wie bei den anderen Demonstrationsvorhaben) verwendet, da das Frischbetonwerk Winnenden schon seit längerer Zeit R-Beton mit dieser Gesteinskörnung produziert und somit auf die entsprechende Bevorratung zurückgegriffen werden konnte.

Mit dem Bau der Stützmauer war schon zum Zeitpunkt der Antragsstellung bzw. der Begutachtung durch Herrn Prof. Breit begonnen worden und zwar unter Verwendung eines konventionellen Betons. Letztendlich war es nicht gelungen, für den Einsatz der etwa 250



m<sup>3</sup> R-Beton rechtzeitig eine ZiE zu erhalten. Auf den Einsatz in der Stützmauer musste daher verzichtet werden.

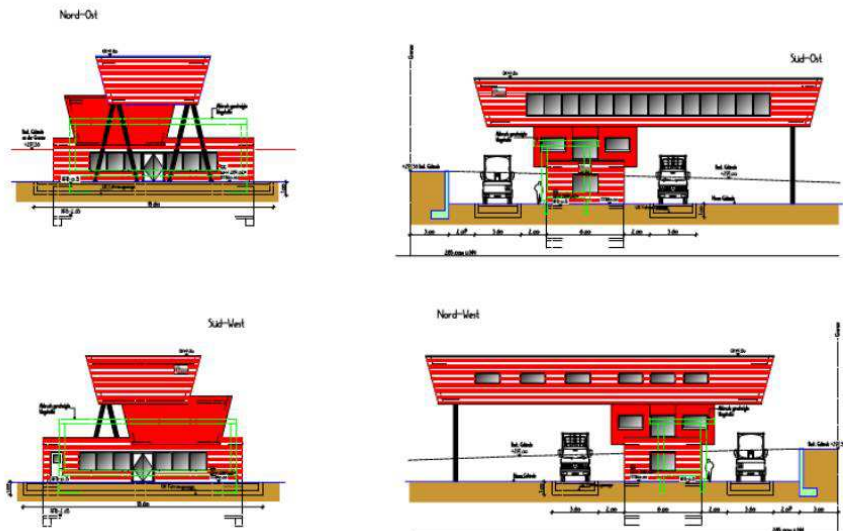


Abbildung 3.10: Ansicht des Waagenhauses



Abbildung 3.11: Bauzustand zum Zeitpunkt der Besichtigung

### 3.5 Weitere geplante Bauvorhaben

Zu Beginn des Forschungsprojektes war die Begleitung weiterer Bauprojekte geplant, deren Bauplanungen sich jedoch aus verschiedenen Gründen verzögert haben. Diese Gebäude werden zu einem späteren Zeitpunkt errichtet werden und zwar weiterhin unter Verwendung von R-Beton und der Gesteinskörnung nach Liefertyp 2.

#### **Bauvorhaben der Fa. Feess, Kirchheim/Teck**

Der Betriebsstandort Rabailen ist innerhalb weniger Jahren zu dem zentralen Standort zur Aufbereitung mineralischer Bauabfälle geworden. Diese zusätzlichen Aufgaben und der angewachsene Durchsatz sollen nun auch mit der Erweiterung um eine große Halle aufgefangen werden. Gerade für die Aufbereitung und Lagerung von Böden ist oftmals ein Witterungsschutz wichtig. Für das Sieben / Klassieren sollte das Material möglichst trocken sein. Diese zweite Halle auf dem Grundstück soll zudem das Grundstück gegenüber einer Straße hin abgrenzen und gleichzeitig für eine Verbesserung des Immissionsschutzes sorgen.

Der Eingangsbereich mit Büro und Fahrzeugwaagen befindet sich dann zwischen diesen beiden Hallen und soll in diesem Zusammenhang ebenfalls auf die gewachsenen Anforderungen hin angepasst werden. Eingangs- und Ausgangswaage sollen mit einem Bürotrakt überspannt werden, der in den Hallen verankert wird. Es ist angedacht, eines der beiden Geschosse als Versammlungsraum auszubauen und diesen auch für die Durchführung von Veranstaltungen zu nutzen oder zu vermieten.

Die Fa. Feess hat in den letzten Jahren ein Aufbereitungskonzept entwickelt und dies in entsprechenden technischen Lösungen umgesetzt, die über die Grenzen der Region hinaus auf große Aufmerksamkeit stoßen. Entsprechend groß ist schon heute das Besucheraufkommen. Es steht die Überlegung im Raum, den Standort auf dieser Basis zu einem Kompetenzzentrum / außerschulischen Lernort weiter zu entwickeln.

Bislang liegt für den Bau der Halle und die Erweiterung des Eingangsbereiches noch keine Baugenehmigung vor. Das Verfahren hat sich gegenüber den ursprünglichen Erwartungen deutlich verzögert. Nach derzeitigem Stand soll mit dem Bauvorhaben im Jahre 2016 begonnen werden können.

#### **Bauvorhaben der Fa. OTT, Trochtelfingen-Wilsingen**

In Wilsingen möchte die Fa. OTT Teerrecycling ihren Betriebsstandort deutlich ausweiten. Mit einem Massendurchsatz von etwa 20.000 Jahrestonnen handelt es sich um einen eher kleinen Betrieb, der bislang in der nicht einfachen Lage auf der Schwäbischen Alb in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem großen Steinbruchbetrieb und eher größerer Entfernung zu größeren Ballungsgebieten verfahrenstechnisch eher einfach aufgestellt war und ein eingeschränktes Produktportfolio aufweist. Die namensgebende Aufbereitung von teerhaltigen Straßendecken spielt keine größere Rolle mehr.

Um seine Position auf dem Markt zu festigen, soll der Betrieb schrittweise optimiert werden und um neue Produktionszweige wie insbesondere ein eigenes Transportbetonwerk erweitert werden. Unter anderem ist vorgesehen, mit dem Betonwerk R-Beton herzustellen und dieses mit einer am Standort produzierten Gesteinskörnung nach Liefertyp 2 zu beliefern. Derzeit erfolgt die entsprechende Umstellung des Aufbereitungsverfahrens.

Diese neue Ausrichtung des Betriebes ist auch mit baulichen Maßnahmen verbunden. Der gesamte Platz soll befestigt, für die unterschiedlichen Input- und Outputmassen sollen Boxen errichtet werden. Außerdem ist die Errichtung einer Halle vorgesehen, in der Fahrzeuge untergestellt werden können, in der aber auch Material gelagert und aufbereitet werden soll.

Der Bau dieser Halle stellt den Abschluss der betrieblichen Umstellung dar. Entgegen der ursprünglichen Erwartungen wird mit dem Bau dieser Halle, die mit Hilfe des im eigenen Transportbetonwerk hergestellten R-Betons errichtet werden soll, nicht mehr im Jahr 2016 zu rechnen sein. Die Umstellung des Betriebes wird noch einige Zeit in Anspruch nehmen.

### Weitere Planungen

Im Rahmen des Projektes wurde seitens weiterer Bauherren der Kontakt gesucht und um einen fachlichen Austausch gebeten. Teilweise wurde bei diesen Gesprächen bereits konkret der Einsatz von R-Beton in einzelnen Bauprojekten erläutert.

So möchte die **Kreissparkasse Esslingen** einen Teil ihres in der Innenstadt Esslingens gelegenen Hauptverwaltungsgebäudes zurückbauen und durch einen Neubau ersetzen. Die Planungen sind hierfür schon relativ weit vorangeschritten, so dass mit dem Beginn des Bauvorhabens spätestens 2016 zu rechnen ist.

Mit der **GWG Reutlingen**, einem kommunalen Wohnungsunternehmen, bestand schon vor ein paar Jahren Austausch zum Thema R-Beton. Dieser wurde durch die neue Geschäftsleitung im Anschluss an den Baustellentermin des Projektes in Weilheim/Teck erneut gesucht. Die GWG hat für die nächsten Monate zahlreiche Bauvorhaben in Reutlingen in der Planung, bei denen grundsätzlich gerne mit R-Beton gearbeitet werden würde. Bislang fehlt es hier vor allem an einer entsprechenden Belieferungsmöglichkeit durch Betonwerke, die vor allem aus der bislang fehlenden Rohstoffversorgung, d.h. der ortsnahen Belieferung mit RC-Gesteinskörnung, resultiert. Hier könnte die Fa. OTT Teerrecycling aus Trochtelfingen zukünftig eine größere Bedeutung bekommen.

Die **Stadt Stuttgart**, vertreten durch die unterschiedlichen Bauämter, hatte ebenfalls den fachlichen Austausch gesucht. In diesem Falle diente der fachliche Austausch zunächst einer grundlegenden Information über den Baustoff R-Beton, die geltenden Regelwerken und die Möglichkeiten der Gestaltung von Ausschreibungen und Leistungsverzeichnissen. Seitens der Stadt ist eine Informationsveranstaltung geplant, zu der alle Stellen und Ämter der Stadt geladen werden sollen, die in irgendeiner Form im Hochbau aktiv sind.

Die **Stadt Karlsruhe** hatte, in Reaktion auf ein Rundschreiben des Ministeriums, ebenfalls um ein Gespräch gebeten. Auch hier waren einige Ämter und Architekten mit dem Ziel geladen, sich zunächst ausführlicher über den Baustoff R-Beton und die geltenden Regelwerke informieren zu lassen. Als Ergebnis des Gespräches wurde die Absicht der Stadt festgehalten, in Ausschreibungen zukünftig explizit auf den gewünschten Einsatz von R-Beton zu verweisen und in naher Zukunft möglicherweise ein konkretes Bauvorhaben als Demonstrationsprojekt zu nutzen. Bislang wird R-Beton im Raum Karlsruhe noch nicht angeboten. Es sind jedoch einige größere Bauschuttrecycler vor Ort, die grundsätzlich zur Herstellung einer geeigneten Gesteinskörnung in der Lage sind und die Rohstoffversorgung sicherstellen könnten.

Wie zum Fachsymposium R-Beton im Januar 2016 berichtet werden konnte, hat sich die Stadt Karlsruhe mittlerweile entschieden, bei eigenen Bauvorhaben künftig R-Beton auszuschreiben.

Im Rahmen des Projektes erfolgte zudem ein Vortrag im Rahmen der Arbeitstagung der **Hochbauamtsleiter der Kreise** in Baden-Württemberg in Ludwigsburg. Das Thema stieß auf recht großes Interesse. Dem Vortrag schlossen sich einige Fragen und Diskussionsbeiträge an.

Nicht zuletzt dieser Impuls führte dazu, dass der Kreis Ludwigsburg wenige Monate später die Erweiterung der Kreisverwaltung in R-Beton ausgeführt hat und dies auch aus Sicht der Tragwerksplanung sehr ambitionierten Bauteilen. Mit den Treppenläufen wurden auch erstmals aus R-Beton hergestellte Betonfertigteile verwendet. Dieses Bauvorhaben wurde im Rahmen des Fachsymposiums R-Beton im Januar 2016 vorgestellt.

### 3.6 Ökologische Bewertung

Mit dem R-Beton ist ein wichtiger Weg zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft auf dem Bau erschlossen worden. Die Herstellung von R-Beton ist bislang die einzige Möglichkeit, auf Altmaterialien aus dem Hochbau zurückzugreifen und sie als Rohstoff wieder im Hochbau zu nutzen. Die Aufbereitung der Altmaterialien zu einer hochwertigen Gesteinskörnung ist mit einem nicht unerheblichen Aufwand verbunden. Es stellt sich daher die Frage der ökologischen Sinnfälligkeit d.h. die Frage, inwieweit dieser Aufwand in einem guten Verhältnis zu dem damit erreichten Nutzen (Substitution primärer Gesteinskörnung) liegt.

#### Systemgrenzen

Eine ökologische Bewertung des R-Betons muss daher die gesamte Produktionskette von der Aufbereitung der Materialien, der Herstellung und Konfektionierung der Produkte bis hin zur Belieferung der Transportbetonwerke und der Herstellung des Betons selbst umfassen. Der R-Beton unterliegt den gleichen Anforderungen und Regelwerken wie konventionell hergestellte Betone der gleichen Sorte. Der Einsatz im Bauvorhaben sowie die Nutzungszeit des Gebäudes muss daher nicht in die Bilanzgrenzen einer ökologischen Bewertung einbezogen werden.

Mit der Herstellung von R-Beton werden jedoch alle Aufwendungen substituiert, die für die Herstellung eines nutzgleichen konventionellen Betons zu Buche schlagen würden. Analog zum Produktionsprozess für R-Beton müssen daher auch hier die gesamten Produktionsprozesse von der Gewinnung der Gesteinskörnung bis hin zum eigentlichen Produktionsprozess im Betonwerk in die Bilanzierung und Bewertung einbezogen werden.

Über die Ökobilanz gilt es die Frage aus Sicht des Betonwerkes zu beantworten, mit welchem ökologischen Aufwand die Herstellung eines R-Beton im Vergleich zur Herstellung eines konventionellen Transportbetons verbunden ist.

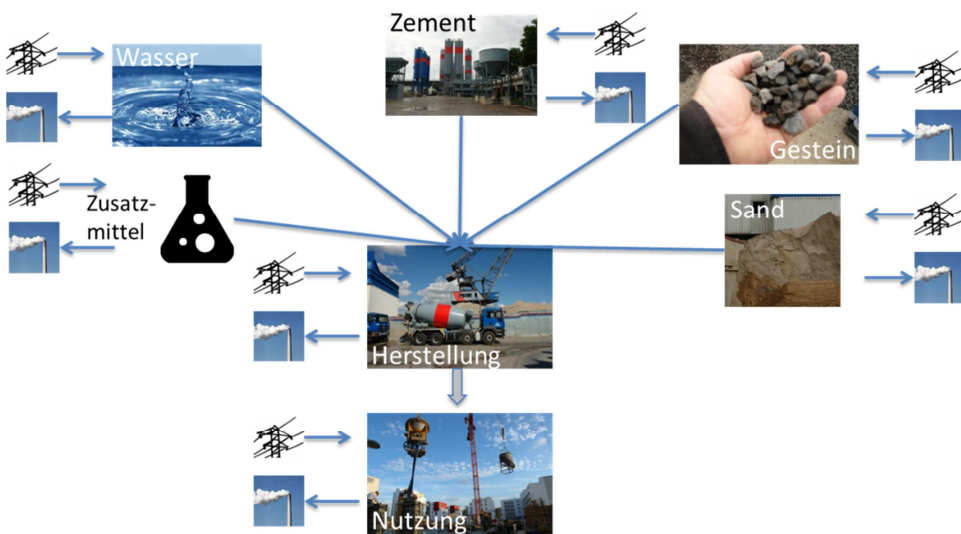


Abbildung 3.12: Ökobilanz Betonherstellung

### Stoffstrombilanz / Sachbilanz

Viele der verschiedenen Bestandteile einer Betonrezeptur ändern sich nicht dadurch, dass die jeweilige Betonsorte entweder als R-Beton oder als konventioneller Transportbeton hergestellt wird. Dies wird auch aus den Ergebnissen der Rezepturentwicklung der Fa. Holcim deutlich, die Herr Aichele im Rahmen des Fachsymposiums in Stuttgart vorgestellt hat.

Tabelle 3.3: Rezepturen für Standardbeton vs. R-Beton (H. Aichele, 2015)

	C20/25 XC3 F3 GK 22 mm		C20/25 XC3 F3 GK 16 mm	
	Standardbeton	RC-Beton	Standardbeton	RC-Beton
Zement	265 kg/m <sup>3</sup>	265 kg/m <sup>3</sup>	285 kg/m <sup>3</sup>	285 kg/m <sup>3</sup>
Flugasche	60 kg/m <sup>3</sup>	60 kg/m <sup>3</sup>	60 kg/m <sup>3</sup>	60 kg/m <sup>3</sup>
BV / FM	0,5% / -	0,5% / -	0,5% / -	0,5% / -
Sand 0/2	633 kg/m <sup>3</sup>	580 kg/m <sup>3</sup>	676 kg/m <sup>3</sup>	578 kg/m <sup>3</sup>
Kies 2/8	265 kg/m <sup>3</sup>	-	407 kg/m <sup>3</sup>	319 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 8/16	476 kg/m <sup>3</sup>	-	736 kg/m <sup>3</sup>	242 kg/m <sup>3</sup>
Splitt 16/22	476 kg/m <sup>3</sup>	588 kg/m <sup>3</sup>	-	-
<b>RC-Splitt 2/16</b>	-	<b>566 kg/m<sup>3</sup></b>	-	<b>547 kg/m<sup>3</sup></b>
Wasser	180 kg/m <sup>3</sup>	176 kg/m <sup>3</sup>	189 kg/m <sup>3</sup>	186 kg/m <sup>3</sup>

Nimmt man die Betonsorte C 20/25 in der Rezeptur mit einer Gesteinskörnung im Größtkorn von 16 mm (C 20/25 XC3 F3 GK 16 mm), so zeigen sich in der Massenbilanz keine Unterschiede im Einsatz von Zement oder Fließmitteln, sondern alleine im Einsatz von Gesteinskörnung und Sand, d.h. dem „Zuschlag“. Die aufgezeigten kleinen Differenzen im Einsatz von Wasser lassen sich vernachlässigen. Ebenso lassen sich die Körnungen > 2 mm aus Kies und Splitt (gebrochenem Primärgestein) an dieser Stelle vereinfachend zusammenfassen.

Wie aus der Gegenüberstellung deutlich wird, greift die Standardrezeptur auf eine höhere Sandmenge zurück sowie eine um 25 kg/m<sup>3</sup> höhere Menge Gestein > 2 mm. Da die Bezugsgröße jeweils 1 m<sup>3</sup> Beton darstellt, resultieren diese Massenunterschiede aus einem unterschiedlichen spezifischen Gewicht. Die Primärgesteinskörnung hat eine höhere Kornrohichte als die sekundäre Gesteinskörnung. Die höhere Menge an Sand resultiert daraus, dass die RC-Gesteinskörnung weniger gut einen absoluten Siebschnitt bei 2 mm erreicht, d.h. auch Anteile an Körnungen < 2 mm enthält.

Möchte man jetzt den spezifischen Aufwand der **Gewinnung und Herstellung** von Sand und Gesteinskörnung gegeneinander in Rechnung stellen, stellt sich zunächst die Frage, inwieweit der spezifische Aufwand der einzelnen Prozesse sich am durchgesetzten Volumen oder an der durchgesetzten Masse festmacht. Die Prozesse sind in einem Steinbruch im Prinzip dieselben wie bei einem Bauschuttzubereiter. Da die Energieverbräuche von Brechanlagen, Sieben, Förderbändern oder Radladereinsätzen sich jedoch aus den Betriebszeiten ergeben, gibt es eindeutig einen Volumenbezug. Der Radlader fährt dann, wenn die Schaufel voll ist, d.h. unabhängig von etwas unterschiedlichen spezifischen Gewichten. Die Produktion ist auf die Herstellung eines Haufwerkes, d.h. auf ein Volumen und nicht auf eine Masse hin ausgelegt.

Tabelle 3.4: Massenbilanz im Vergleich von Standardrezeptur und Rezeptur für einen R-Beton

	Standardbeton	R-Beton
Zement	-	-
Flugasche	-	-
Fließmittel	-	-
Sand 0/2mm	+ 98 kg/m <sup>3</sup>	
Körnung 2/16mm	+ 582 kg/m <sup>3</sup>	
RC-GK 2/16mm		+547 kg/m <sup>3</sup>
Wasser	+3 kg/m <sup>3</sup>	

Vereinfachend kann man davon ausgehen, dass die spezifischen Energieverbräuche an den einzelnen Aggregaten zur Produktion eines bestimmten Volumens an Gesteinskörnung bei beiden Systemalternativen gleich sind. Dabei gibt es aber sehr große Unterschiede in der Praxis. Diese machen sich jedoch nicht an den unterschiedlichen Produktionslinien Primärgestein oder sekundäre Gesteinskörnung fest, sondern im unterschiedlichen Alter der in den Betrieben eingesetzten Maschinen und Aggregate, deren jeweiligem Auslastungsgrad oder auch der Aufstellung der Aggregate auf den Betriebsstandorten und der damit verbundenen Notwendigkeit zur Logistik, d.h. Radladereinsätze oder Streckenlänge der Transportbänder.

Die Qualität des jeweiligen Ausgangsmaterials unterscheidet sich jedoch. Wird in beiden Fällen ein Produkt vergleichbarer Qualität hergestellt, ist dies mit Bauschutt als Ausgangsmaterial tendenziell mit anderen Aufbereitungsverlusten verbunden, als bei einer primären Gesteinskörnung.

Eine zentrale Kenngröße ist daher der unterschiedliche Aufbereitungsverlust / Produktionsrückstand bei einer Aufbereitung von Bauschutt im Vergleich zur Aufbereitung

von primärer Gesteinskörnung. Im Raum Stuttgart wird vor allem auf Muschelkalk als primärem Ausgangsmaterial zurückgegriffen. Für die RC-Gesteinskörnung wird eine Lieferkörnung Typ 2 (mit bis zu 30 % Anteil Mauerschutt) unterstellt.

Es stellt sich demnach die Frage, mit welchen Aufbereitungsverlusten / Produktionsrückständen die Aufbereitung dieser beiden Rohstoffe verbunden ist und welchen Wert (Nutzen) diese Materialien jeweils haben. Der Nutzen ergibt sich aus deren jeweiligem Einsatzbereich, der Wert lässt sich monetär ausdrücken.

Muss das Nebenprodukt entsorgt werden bzw. zu einem Erlös von 0 € „vermarktet“ werden, müsste die ganze ökologische Last des Aufbereitungsprozesses dem eigentlichen Zielprodukt zugerechnet werden. Hat auch das „Nebenprodukt“ einen positiven Marktwert, sind die Lasten im Verhältnis der unterschiedlichen Erlöse und Massenströme aufzuteilen. Das Zielprodukt trägt dann nur noch anteilig die ökologische Last des Aufbereitungsprozesses.

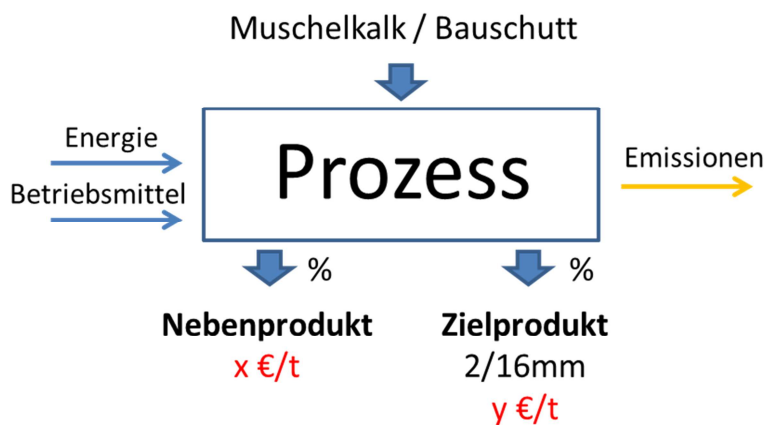


Abbildung 3.13: Zuordnung der spez. Lasten // Allokation

Für die Massenbilanzierung wird eine gute Ausgangsqualität des Bauschutts unterstellt. Diese Qualitäten unterscheiden sich von Betrieb zu Betrieb, resultierend aus den jeweils unterschiedlichen Randbedingungen im jeweiligen regionalen Markt. Mit dem Zielprodukt einer Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 muss in allen Fällen auf hochwertiges Ausgangsmaterial geachtet werden.

Tabelle 3.5: Anteil von Ziel- und Nebenprodukten mit den dafür erzielbaren Preisen

	Betonreicher Bauschutt <sup>a)</sup>		Muschelkalk <sup>b)</sup>	
Vorsieb	10 %	0 €/t	0 %	
Brechsand	30 %	3 €/t	20 %	9,80 €/t <sup>c)</sup>
Schropfen	0 %		0 %	
Zielprodukt	60 %	8 €/t	80 %	11,85 €/t <sup>c)</sup>

a) Annahme orientiert an Erfahrungswerten und diesem Projekt

b) Annahme

c) Beispielpreise von Baustofflieferant netto

Nach btu (2011) liegt der spezifische Energieeinsatz für Brechen und Klassieren bei 1,54 kWh/t Input. Vereinfachend wird angenommen, dass sich die Energieverbräuche für Förderbänder, Rüttler u.Ä. sowie der Dieselverbrauch für den Einsatz von Radladern/Baggern nicht stark unterscheiden und zudem sehr stark von den örtlichen Gegebenheiten abhängen. In diesem direkten Vergleich werden diese daher nicht berücksichtigt werden.

Im Ergebnis lässt sich aus diesen Überlegungen ableiten, dass der spezifische Energieaufwand für Brechen und Klassieren pro Masse Zielprodukt bei einem Muschelkalkbruch bei 1,93 kWh/t liegt und bei einem Hersteller einer sekundären Gesteinskörnung (Bauschuttzubereiter) bei 2,57 kWh/t, wenn dem Hauptprodukt jeweils der gesamte Energieaufwand angelastet wird. Wenn jedoch den jeweiligen Nebenprodukten aufgrund des durch sie erzielbaren Erlöses ein entsprechender Teil zugerechnet wird, verringert sich der Energieaufwand für das Zielprodukt im Falle des Muschelkalks auf 1,60 kWh/t und im Falle des Bauschuttzubereiters auf 2,16 kWh/t.

Neben den Aufwendungen für die Herstellung der Gesteinskörnung sind auch die **Transporte** im Vergleich der beiden Alternativen zur Herstellung von Transportbeton zu berücksichtigen. Von Interesse ist in diesem Zusammenhang alleine das Transportkettenglied zwischen Produktionsstätte der Gesteinskörnungen und dem Transportbetonwerk. Der Transport des Betons spielt in diesem Zusammenhang keine Rolle.

Die Rohstoffbezugsquellen für Betonwerke sind in den unterschiedlichen Regionen Deutschlands deutlich verschieden. In vielen Mittelgebirgslagen gibt es bspw. zahlreiche Steinbrüche, in den großen Flusstälern die Sand- und Kiesvorkommen. In vielen Regionen Deutschlands müssen Gesteinskörnungen aus größeren Entfernungen herantransportiert werden. Bekanntes Beispiel hierfür ist Berlin mit seinen Sandböden und damit fehlender Gesteinskörnung oder manche Teile von Oberschwaben mit seinen Kiesböden und damit reichen Vorkommen an Gesteinskörnung.

Grundsätzlich liegen diese Vorkommen erschlossen eher außerhalb der großen Städte und Ballungsräume vor. Die Erschließung dieser Rohstoffvorkommen steht hier in starker Konkurrenz zu anderen Flächennutzungsansprüchen. Ihre Ausweisung ist im Planungs- und Genehmigungsprozess selten einfach durchsetzbar und darüber hinaus auch mit Widerständen der Anwohner vor Ort verbunden.

Der grundsätzliche spezifische Vorteil der RC-Gesteinskörnungen beruht darauf, dass Gebäude und andere Bauwerke dort rückgebaut werden, wo auch die Neubautätigkeit am größten ist. Das Bauen im Bestand führt dazu, dass der Errichtung eines Gebäudes immer der Rückbau einer Altbausubstanz vorangeht. Die Baustoffnachfrage ist daher immer mit einem Bauschuttanfall verbunden. Das als Rohstoff nutzbare Altmaterial fällt demnach idealerweise in unmittelbarer Nachbarschaft zum Betonwerk an.

Diese Situationen in den Transportdistanzen in Form von Mittelwerten in eine Bilanzierung und ökologische Bewertung einzubringen, ist nicht sinnvoll. Die Diskussion wird hier als break even-Analyse geführt. Interessant ist die Aussage, um wieviel weiter ein Hersteller einer primären Gesteinskörnung entfernt sein darf bis sein spezifischer Vorteil einer effizienteren Aufbereitung und Herstellung der Gesteinskörnung aufgebraucht wäre. Oder aus der Perspektive des Bauschuttrecyclers: um wieviel näher muss eine Recyclinganlage am Betonwerk liegen, um den erhöhten Aufwand bei der Herstellung der Gesteinskörnung zu kompensieren? Vereinfachend wird auch für das Primärgestein ein Transport mittels



Lastkraftwagen unterstellt, obwohl in der Praxis gerade bei sehr großen Distanzen auch Binnenschiff oder Bahn als Verkehrsträger genutzt werden.

Als spezifischer Energieverbrauch lassen sich für den Schwerlastverkehr 0,028 Liter Diesel pro Tonnenkilometer ansetzen.

Ein weiterer Schritt in der Herstellung von Beton ist selbstverständlich auch die eigentliche Betonproduktion im Betonmischwerk. Auch hier sind Mischvorgänge im Wesentlichen abhängig vom durchgesetzten Volumen (Beschickung und Mischvorgang). Der eigentliche Mischvorgang gestaltet sich leicht unterschiedlich, resultierend aus dem erhöhten Wasseranspruch des RC-Gesteins. Diese Unterschiede lassen sich dadurch mildern, dass das Gestein vorab befeuchtet wurde und damit wassergesättigt vorliegt. Die Zugabe des Wassers in den Mischprozess erfolgt zu etwas unterschiedlichen Zeitpunkten.

In Summe wird vereinfachend davon ausgegangen, dass sich die spezifischen Energieverbräuche im Betonmischwerk nicht wesentlich danach unterscheiden, ob in Anteilen auch RC-Gesteinskörnung in den Mischprozess gelangt.

### **Ökologische Bilanzierung**

Die ökologische Bilanzierung erfolgt daher 2-gestuft. In einem ersten Schritt werden die vereinfachten Aufbereitungsprozesse (Brechen / Klassieren) miteinander verglichen. Im zweiten Schritt erfolgt eine Break-even-Betrachtung hinsichtlich der Transportentfernungen.

In folgender Tabelle werden die Ergebnisse für die Kategorie Treibhauseffekt dargestellt. Aus der Differenz der zielproduktbezogenen, wie oben dargestellt allozierten Lasten der Bauschutttaufbereitung und derjenigen der Muschelkalkverarbeitung resultiert der Mehraufwand für das System Bauschutt. Wenn dieser Mehraufwand mit spezifischen Lasten für den LKW-Transport bezüglich eines Tonnenkilometers ins Verhältnis gesetzt wird, ergibt sich die Strecke, die der Muschelkalksplitt zusätzlich fahren kann, um den Vorteil seiner energieärmeren Erzeugung aufzubreuchen, zu 4,14 km. Folglich ist der Einsatz von Sekundärmaterial aus Sicht des Treibhauseffekts immer dann vorteilhaft, wenn die Recyclinganlage um mehr als 4,14 km näher am Betonwerk liegt als der Steinbruch.

Tabelle 3.6: Treibhauseffekt für eine vereinfachte Aufbereitung von Primär- und Sekundär-gesteinskörnung und für den Transport

	Treibhauseffekt (kg CO <sub>2</sub> -äq.)
Vereinfachte Aufbereitung Muschelkalk (pro t Zielprodukt)	1,01
Vereinfachte Aufbereitung Bauschutt (pro t Zielprodukt)	1,37
Δ Aufbereitung (pro t Zielprodukt)	0,36
Transport (pro tkm)	0,087

Neben den hier bilanzierten Effekten sind auch weitere ökologische Belange zu beachten. So geht Schwerlastverkehr einher mit entsprechenden Lärm-, Schadstoff- und Feinstaubemissionen und damit Umwelt- und Gesundheitslasten. Die Ergebnisse sind hier gleichgerichtet zu den Ergebnissen der Bilanzierung der Klimafolgen. Je größer die Transportentfernung, umso höher die Lasten.

Ein weiterer Aspekt ist der mit dem Abbau von Primärrohstoffen verbundene Eingriff in den Landschaftshaushalt (Wasser, Klima, Boden) und damit einhergehend auch der Eingriff in das Landschaftsbild.

### 3.7 Öffentlichkeitsarbeit

Die Öffentlichkeitsarbeit im Rahmen der Demonstrationsprojekte hatte zwei Zielrichtungen. Zum einen wurde das Fachpublikum aus der jeweiligen Region angesprochen und u.a. Besichtigungen der Baustellen ermöglicht. Zum anderen zielten diese Termine auch auf die breite Öffentlichkeit, unterstützt durch eine entsprechende Gestaltung als Pressetermin und prominente Beiträge der Hausspitze des Umweltministeriums. Die Termine wurden auf beide Zielrichtungen ausgerichtet.

Für alle Bauvorhaben wurden derartige Termine durchgeführt. In einem ersten Schritt galt es, die Einladungslisten zusammenzustellen und die entsprechenden Adressen zusammenzutragen. Eingeladen wurden Architekten, Ingenieure, Tragwerksplaner, Baufirmen, Bauschuttrecycler, Baustofflieferanten (v.a. Betonwerke), Städte, Stadt- und Landkreise sowie weitere staatliche Baubehörden.

Diese Zielgruppe sollte mit diesen Terminen über den Baustoff R-Beton informiert werden. Außerdem gab es die Gelegenheit zum fachlichen Austausch mit der Bauleitung vor Ort (v.a. Frischbetoneigenschaften) sowie den jeweiligen Beton- und Gesteinskörnungslieferanten. Die Baustellentermine waren möglichst auch mit Besichtigungen der verschiedenen Produktionsanlagen verbunden.

Parallel dazu wurden Pressemitteilungen herausgegeben und die örtliche Presse eingeladen. Aufgrund der größeren Bedeutung des Bauvorhabens in Winnenden war hierfür auch die für Öffentlichkeitsarbeit zuständige Abteilung im Ministerium eingebunden und dies mit entsprechendem Erfolg. Zu diesem Termin war auch der SWR und die dpa vertreten.

Darüber hinaus führten diese Termine teilweise auch zu direkten Kontaktaufnahmen vor allem von interessierten Bauherren. Teilweise entstand hieraus auch der Bedarf nach einem Gespräch, die oben benannt wurden.

Auch die Planung und Durchführung des Fachsymposiums war in größerem Stil mit Öffentlichkeitsarbeit verbunden. Hierauf wird in Kapitel 7 näher eingegangen.

## 4 Bauschuttrecycling – Begleitung eines Umstellungsprozesses

Mit der Fa. OTT Teerrecycling plant ein vergleichsweise kleines Recyclingunternehmen mit einem Durchsatz von etwa 20.000 Jahrestonnen die zukünftige Produktion einer Gesteinskörnung für die Betonherstellung. Die Zusammensetzung des Inputmaterials unterliegt von Jahr zu Jahr gewissen Schwankungen. Dies gilt insbesondere für die Anlieferung von Gleisschotter und teerfreiem Asphalt. Für das Jahr 2014 zeigt sich mit dem hohen Anteil an gemischtem Bauschutt und teerfreiem Asphalt eine eher problematische Ausgangslage, da beide Teilfraktionen nur in kleinerem Umfang in der Lieferkörnung Typ 2 enthalten sein dürfen (s. Abb. 4.1). Der gemischte Bauschutt wies ursprünglich zudem eine für dieses Produktionsziel und für Kleinanlieferungen typische eher problematische Zusammensetzung und wurde auch zusammen mit dem Asphalt aufgehaldet.

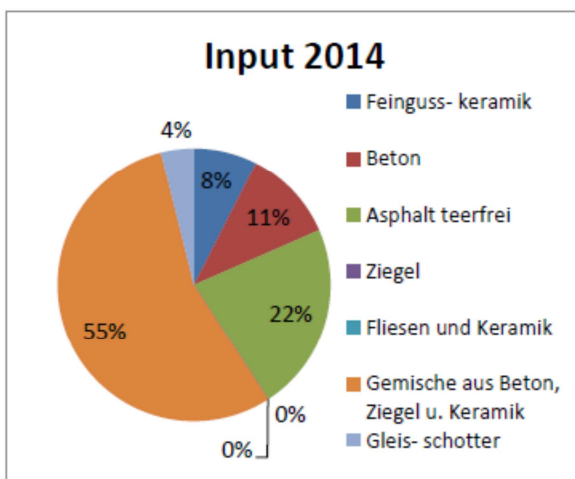


Abbildung 4.1: Zusammensetzung des Inputmaterial

Es bedarf daher einiger Umstellungen im Stoffstrommanagement und möglicherweise auch Anpassungen in der Technik, um diese Gesteinskörnung Liefertyp 2 in der geforderten Qualität produzieren zu können. Die Anpassungen müssen auf dem Hintergrund der vorhandenen Technik und des Anlagendurchsatzes (Randbedingungen des Marktes) schrittweise erfolgen.

In einem ersten Schritt wurden Optimierungen in der Steuerung des Inputmaterials sowie in der Aufbereitung vorgeschlagen und teilweise auch in die Praxis umgesetzt.

- Soweit vom Platzangebot möglich, sollten die Materialien je nach Zusammensetzung und Güte auf getrennten Haufwerken gehalten werden, möglicherweise auch verbunden mit einer Beschilderung; dies erleichtert die nachfolgende Aufbereitung. In Anlehnung an den Annahmekatalog sind dies maximal:

Altasphalt (teerfrei), Altbeton (mit geringen Feinanteilen), Bauschutt aus großen Anlieferungen mit wenig Feinanteil und Fremdbestandteilen (Leichtbaustoffe) und Verunreinigungen (Holz, Kunststoffe etc.), Bauschutt mit höheren Feinanteilen und Verunreinigungen (entsprechend der Inputzuordnung Annahmepreise), Anlieferung durch Containerdienste oder private Kleinanlieferungen, Gleisschotter (unbelastet, wenig Feinanteile), Gleisschotter (belastet, höhere Feinanteile), Dachziegel, sonstige bspw. industrielle Monochargen (ggf. aufgetrennt)

- Die Inputmassen sollten in ihrer Zusammensetzung und Qualität möglichst positiv beeinflusst werden. Dies kann über die Ausdifferenzierung der Annahmepreise erfolgen, so dass ein Anreiz geschaffen wird, bereits an der Anfallstelle des Abfalls, d.h. auf der Baustelle, problematische Bestandteile abzutrennen bzw. auf sauberes Material zu achten. Auf Basis der bis dato geltenden Preisliste wurde vorgeschlagen:  
Deutlicherer Preisunterschied zwischen den Fraktionen Altbeton (170101) und Bauschuttgemisch (170107), die nach Preisliste formulierte Unterscheidung nach Feinanteil und Verunreinigung auch in der Praxis umsetzen, Verweigerung einer Annahme von Verbundbaustoffen oder Zuordnung zu dem Inputaufwerk mit den problematischen Materialien (Containerdienste etc.)
- Gezielte Akquise und Ausweitung des Annahmekatalogs auf steinreiche Erden / Böden, d.h. natürliche nicht-bindige Böden mit einem entsprechend felsigen C-Horizont oder Aushub mit hohen Bauschuttverunreinigungen (typische Böden in den Ortslagen von Städten)
- Die Qualität der RC-Baustoffe sowohl in ihrer technischen Eignung als auch hinsichtlich der Umweltparameter ist deutlich über den Feinanteil bestimmt. Hier bietet sich ein Handling mit Sieblöffeln an den Radladern bzw. Baggern an, wobei die Siebweite bzw. die Intensität des Einsatzes sich sowohl aus den Anforderungen des Produktes (= Zielgrößen der Aufbereitung) als auch aus den Möglichkeiten der Entsorgung ergibt. Es wird vorgeschlagen, neben dem Vorsieb möglicherweise gezielt mit Separatorschaukeln zu arbeiten.

Auf dieser Basis erfolgte in einem zweiten Schritt ein erster Aufbereitungsversuch mit Altbeton. Die Prallmühle wurde daraufhin angepasst. Dies soll nur einen ersten Zwischenschritt darstellen hin zur Produktion einer Gesteinskörnung nach Liefertyp 2. Altbeton und Bauschutt sollen hierfür zukünftig getrennt aufbereitet werden, die Mischung des Produktes soll abschließend nach dem Brecher erfolgen. Da die Radlader nicht mit Waagen ausgestattet sind, müssen für die Mischungsverhältnisse über das Auswiegen mit der Fahrzeugwaage Erfahrungswerte ermittelt werden.

In einem ersten Schritt erfolgte eine Analyse und Bewertung der Eignung der Gesteinskörnung Typ 1, d.h. des getrennt aufbereiteten Altbetons. Nach den durch das Aalener Baustoffinstitut durchgeführten Untersuchungen ergab sich eine gute Übereinstimmung mit den Anforderungen an die Zusammensetzung und die Kornzusammensetzung sowie hinsichtlich der bautechnischen Eignung wie Kornrohichte, Wasseraufnahme, Widerstand gegen Zertrümmerung und Frost-Tau-Widerstand. Die umwelttechnische Prüfung erfolgte im Rahmen des Projektes durch das Institut Dr. Haag, die ebenfalls eine deutliche Übereinstimmung mit den entsprechenden Regelwerken ergab.

Im Rahmen des Projektes wurden auch schon erste Aufbereitungen der Gesteinskörnung Typ 2 durchgeführt. Das Material wurde erneut auf umwelttechnische Eignung untersucht. Die ermittelten "Schadstoffbelastungen" liegen weit unter den maximal zulässigen Werten

Die nächsten Schritte bestanden nun in folgenden Maßnahmen:

- Getrennte Aufhaltung von gutem Bauschutt nach der üblichen Einordnung an der Waage (wenig Feinanteil, wenig Fremdstoffe) und Getrennhaltung von den Anlieferungen, die vor allem aus den Containerdiensten kommen und hohe Anteile von Leichtbaustoffen oder Gips enthalten.
- Dieses gute Material soll dann später über ein Vorsieb gegeben, gebrochen und dann in einzelne Korngruppen abgesiebt werden. Das Material wird dann auf die entsprechenden Parameter untersucht, d.h. Zusammensetzung und bautechnische und umwelttechnische Eignung.
- Um zu prüfen, welche Strategie im Weiteren verfolgt werden soll, wurde folgendes Programm vorgeschlagen:

#### Untersuchungsprogramm 1

a) Aufhaltung einer größeren Menge „sauberen“ Inputmaterials, um für den Betrieb zu möglichst repräsentative Aussagen zu kommen, b) Absiebung über Vorsieb, c) Brechen und Absiebung auf 0/2, 2/16, >16 und alternativ auf 0/8, 8/16, >16, d) Repräsentative Probenahme und Analyse der Siebfraktionen 2/16 und 8/16 auf die Parameter nach DIN EN 12620 sowie auf die Zusammensetzung nach Gesteinskörnung Typ 2 sowie e) Erstellung einer Massenbilanz

Mit Hilfe des Untersuchungsprogramms soll geprüft werden, inwieweit sich aus dem Ausgangsmaterial „sauberer Bauschutt“ eine Gesteinskörnung erstellen lässt, die in Betonwerken eingesetzt werden darf. Analyseergebnisse für die Teilmenge „aufbereiteter Beton“ liegen vor, so dass abschließende Aussagen für die GK Typ 2 zumindest überschlüssig nach einer Mischungsrechnung gemacht werden können.

#### Untersuchungsprogramm 2

Im Beton wird tendenziell das größere Korn aus dem Mauerwerk eingesetzt, da unkritischer in seinen Eigenschaften. Deshalb stellt sich die Frage, ob für das Betonwerk nicht eine Körnung 8/16 hergestellt werden soll. Die verbleibende Körnung 0/8 dürfte sich zudem auch aufgrund geringerer Sulfat-Elutionswerte besser vermarkten lassen als der reine Brechsand 0/2.

Im Rahmen des Projektes wurden durch das Institut Dr. Haag in Kornwestheim Beprobungen und Analysen auf einen bestimmten Schadstoffkatalog hin durchgeführt. Es wurden für einen vorgegebenen Parameterkatalog Vergleichsanalysen nach den Elutionsverfahren Schütteltest und Säulentest durchgeführt. Beprobte und analysiert wurden das Inputmaterial sowie alle Outputströme. Dieses Analyseprogramm wurde genutzt, um diese genannte Aufbereitungsstrategie für die Fa. OTT aus umwelttechnischer Sicht beurteilen zu können. Auch diese Analysen zeigten eine gute umwelttechnische Eignung.

### **Verwertung von Gießereialsanden**

Auf dem Gelände der Fa. OTT lagert ein größeres Haufwerk an Gießereialsanden. Da auch zukünftig mit der Anlieferung von diesen industriellen Abfallmassen zu rechnen ist, stellte sich die Frage, inwieweit und in welcher Form diese in die Optimierung von Aufbereitung und Vermarktung einbezogen werden können. Die Recherche und Bewertung der rechtlichen Situation sowie die Probenahme und Analyse der Gießereisande erfolgte weitgehend durch IAB Weimar.

### **Einsatz als Sandsubstitut in der Betonproduktion**

Die Frage, inwieweit Gießereialsand in den Betonrezepturen eingesetzt werden kann, ergibt sich aus der DIN EN 12620. Hiernach ist Gießereialsand als industriell hergestellte Gesteinskörnung einzuordnen, bzw. „Gesteinskörnung mineralischen Ursprungs, die in

einem industriellen Prozess unter Einfluss einer thermischen oder sonstigen Veränderung entstanden ist“.

Nach einem Bericht für das Umweltbundesamt [DIBt 2005] dürfen nach der Anwendungsnorm DIN V 20000-102 zur europäischen Norm DIN EN 12620 nur natürliche Gesteinskörnungen sowie von den industriell hergestellten Körnungen nur Hüttensand nach DIN 4301, kristalline Hochofenschlacke und Schmelzkammergranulat eingesetzt werden. Werden andere Gesteinskörnungen eingesetzt, so ist die Umweltverträglichkeit durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung nachzuweisen.

Nach einer Analyse des Aalener Baustoffinstituts aus dem April 2014 weist der Gießereialsand eine Schadstoffbelastung auf, die eine Einstufung nach Z 1.1 ermöglichen würde. Materiell dürfte der angesprochenen Zulassung somit nichts im Wege stehen.

Durch IAB Weimar wurde eine Materialprobe (nicht repräsentativ und gemäß den Regelwerken) entnommen und in Weimar analysiert mit dem Ziel, einen ersten Eindruck von deren bauphysikalischer Eignung zu erhalten. Eine chemische Analyse mittels Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) bestätigt, dass der Hauptbestandteil aus Quarz besteht. Bentonitanteile konnten nicht festgestellt werden. Um jedoch quellfähige Tonminerale im Gießereialsand vollständig auszuschließen, sollte das Werk / die Gießerei, hierzu nochmals befragt und gebeten werden, entsprechende Analysen vorzulegen. Die Analyse auf Kornrohddichte ergab Werte von 2.570 bis 2.610 kg/m<sup>3</sup>. Die Wasseraufnahme WA (bezogen auf die Trockenmasse) lag nach 24 h im Mittel bei 0,54 %. Diese ersten Analyseergebnisse weisen darauf hin, dass sich der Gießereialsand technisch gut als Sandsubstitut in Betonrezepturen eignen würde.

Bisher liegen aber noch keine / wenige Erfahrungen zum Einsatz von Gießereialsand in Betonrezepturen vor. Es wird daher vorgeschlagen, diese Sande zunächst bei der vorgesehenen Produktion von Betonblocksteinen zur Eigenverwendung einzusetzen, entsprechende Rezepturen zu entwickeln bzw. anzupassen und erste Erfahrungen zu sammeln.

Möglicherweise schon parallel dazu könnte beim DIBt der Antrag auf allgemeine bauaufsichtliche Zulassung gestellt werden.

### Einsatz in der Klinkerproduktion

Nach dem Nachhaltigkeitsbericht der österreichischen Zementindustrie [VÖZ 2012] werden in Österreich jährlich bis zu 620.000 Tonnen Neben- und Reststoffe in der Klinkerproduktion eingesetzt. Zementklinker wird aus den mineralischen Rohstoffen Kalkstein, Ton und (Quarz-)Sand in genau definierter Mischung in Drehrohröfen verbrannt. Um die Rohstoffentnahmen aus der Natur möglichst gering zu halten, werden Sekundärrohstoffe eingesetzt. Der Nachhaltigkeitsbericht nennt beispielhaft neben Kiesabbrand, Walzzunder auch Gießereialsand. Es ist daher davon auszugehen, dass dieser Einsatz bereits in größerem Umfang erfolgt.

Auch in der Untersuchung des ifeu-Instituts für die ABAG [IFEU 2002], stellte die Verwertung von Gießereisanden eine klassische Option in der Entsorgung dieser Abfallmassen dar. Hierin wurde der Einsatz in der Zementindustrie im Vergleich zu anderen Entsorgungsoptionen als aus ökologischer Sicht durchaus günstig bewertet.

Als Fazit lässt sich festhalten: Gießereialtsande sind hochwertige sekundäre Rohstoffe, die sich sowohl bei der Zementherstellung als auch bei der Betonproduktion hochwertig und sinnvoll als Substitut für Quarzsand einsetzen lassen.

# 5 R-Beton - Bewertung des Status Quo

---

Im Rahmen des Projektes wurde darüber hinaus in den Regionen Nordbaden / Kurpfalz sowie Großraum Stuttgart das Gespräch mit Bauschuttrecyclern sowie Transportbetonwerken gesucht mit dem Ziel, hier die Innovation R-Beton weiter abzusichern. Aus diesen Gesprächen ergab sich folgender Status Quo.

## **Situation Transportbetonwerke**

Im Gespräch mit den Transportwerken zeigte sich unisono eine grundsätzlich große Bereitschaft, in die Produktion von R-Beton einzusteigen. Allgemein ist die Betonindustrie mittlerweile gut über den Baustoff und die geltenden Regewerke informiert. Auch wird generell die Einschätzung geteilt, dass die geforderten Qualitäten sowohl für den Frisch- als auch für den Festbeton problemlos erreichbar sind und dies bei nur geringer Anpassung in den entsprechenden Rezepturen.

Generell ist der Marktpreis für Transportbeton stark gesunken. Dies gilt sowohl für den Großraum Stuttgart als auch seit kurzem auch für Nordbaden / Kurpfalz. Über den Preiswettbewerb erfolgte eine Marktbereinigung, so dass sich kaum noch kleinere mittelständische Unternehmen finden lassen. Die finanziellen Spielräume sind daher begrenzt, die Rezepturen sind "Spitz auf Knopf" gestrickt.

R-Beton lässt sich nur über den Preis vermarkten, der Kunde ist nur bei den Demonstrationsvorhaben und daher im Einzelfall bereit, für einen ressourcenschonenden Baustoff einen etwas höheren Preis zu bezahlen.

Greifen die Betonwerke auf eine RC-Gesteinskörnung zurück, ist ihr Aufwand gegenüber dem Einsatz von primären Rohstoffen leicht höher. So ist der Prüfaufwand leicht erhöht und das Handling etwas aufwendiger. Zudem müssen gerade auch bei einer Gesteinskörnung Typ 2 in etwas größeren Umfang Fließmittel und andere tendenziell teure bauchemische Rezepturbestandteile eingesetzt werden. Auch wenn diese nur sehr kleine Massenanteile aufweisen, spielen sie in der Kostenbilanz eine Rolle.

Der Bezug der RC-Gesteinskörnung sollte daher für die Betonwerke gegenüber Naturstein etwas günstiger sein. Die Kosten ergeben sich in Summe aus dem Preis ab Produktionsort sowie dem Transportpreis. Im Moment werden die Splitte zu ca. 6 €/t vermarktet und damit zu einem Preis, der von den Recyclern nur schwer gehalten werden kann. Die Margen sind sehr gering. Der entscheidende Kostenvorteil für eine RC-Gesteinskörnung ist daher dann gegeben, wenn sich das Recyclingwerk möglichst in unmittelbarer Nachbarschaft zum Betonwerk befindet. Nicht von ungefähr sind die Werke von Holcim in Kirchheim/T und TBS in Mannheim Standorte mit dem größten Produktionsumfang, denn dort liegt diese günstige Konstellation vor.

Die Standorte der Fa. Krieger in Waiblingen und Winnenden werden im Moment aus Kirchheim/T beliefert. Diese Lieferbeziehung ist unter den derzeitigen Marktverhältnissen kaum wirtschaftlich. Entsprechend kommt es derzeit auch immer wieder zu Engpässen in der Rohstoffverfügbarkeit bzw. zu der Situation, dass die Werke über längere Zeiträume



immer wieder keinen R-Beton produzierten. Die Fa. GWV, die ebenfalls über eine abZ allgemeine bauaufsichtliche Zulassung verfügt, hat sich jüngst wieder als Produzent einer Gesteinskörnung für die Betonindustrie platziert. Dies dürfte die Rohstoffversorgung der Betonwerke im Stuttgarter Raum etwas entspannen.

Aus diesen Randbedingungen heraus gibt es derzeit bei der Betonindustrie Überlegungen, eigene Strukturen zur Rohstoffversorgung aufzubauen. So berichten die Betonwerke von Überlegungen, an ihren Standorten entweder selbst in die Herstellung der RC-Gesteinskörnung einzusteigen oder in Kooperation mit einem Recycler entsprechende Lagerplätze und Aufbereitungsstrukturen zu schaffen.

Die Akzeptanz seitens der Kunden ist bis auf wenige Ausnahmen allgemein gegeben. Liegt kein offensichtlicher finanzieller Vorteil für die Transportbetonwerke vor, bedarf es zunächst eines Anstoßes aus dem Markt. Dies zeigt sich auch am Beispiel des Bauvorhabens des Kreises Ludwigsburg. Hier wird der Beton aus Werken geliefert, die in einen Verbund der Natursteinindustrie eingebunden sind.

Als Fazit lässt sich festhalten, dass in beiden Regionen die Betonwerke der Produktion von R-Beton gegenüber offen sind und sich teilweise auch schon entsprechend auf die Produktion vorbereitet haben. In die Produktion eingestiegen wird aber nur dann, wenn eine konkrete Nachfrage aus dem Markt vorliegt oder RC-Gesteinskörnung zu (deutlich) günstigeren Konditionen als natürliche Gesteinskörnung bezogen werden kann.

### Situation Bauschuttrecycler

Die wesentlichen Hemmnisse gegenüber einer breiteren Einführung und Etablierung von R-Beton auf dem Markt liegen auf Seiten der Bauschuttrecycler, d.h. der Hersteller der RC-Gesteinskörnung. Die Hemmnisse lassen sich auf folgende wesentliche Punkte zusammenführen.

Wie generell auf dem Rohstoffmarkt zu verfolgen, ist über die letzten Monate auch bei den Baurohstoffen ein deutlicher **Preisverfall** zu verzeichnen. Die Natursteinprodukte weisen im Moment ein mit in etwa 6 €/t ab Werk sehr niedriges Preisniveau auf. Diese Preise beinhalten kaum noch Margen und sind nur dadurch zu erklären, dass die Verfüllung der Gruben und Brüche mit Erdaushub mittlerweile ein sehr lukratives Geschäft darstellen. Diese Einnahmen liefern wesentlich den Deckungsbeitrag für die Unternehmen. Da RC-Produkte unabhängig von ihrer Qualität per se (signifikant) billiger angeboten werden müssen, stellt dies eine große Herausforderung dar. Die Bauschuttrecycler stehen hier unter ökonomischem Druck, auch wenn sie die Annahmepreise für ihr Ausgangsmaterial erhöhen konnten.

Die nur wenigen Ablagerungsmöglichkeiten für (unbelasteten) Erdaushub führen für Bauunternehmen zu einer Entsorgungsnot, die seitens der Natursteinindustrie zu **Koppelschäften** ausgenutzt wird. Die Annahme von Erdaushub wird vertraglich an die Abnahme von Natursteinprodukt gekoppelt und dies möglichst im Verhältnis 1:1. Größere Transportentfernungen zwingen zudem aus rein ökonomischen Gründen zur Übernahme von Rückfrachten.

Entsprechend zeigt sich überall eine sehr ähnliche Situation. Das Bauschutttaufkommen wächst an. Zugleich wird die Vermarktung der Produkte immer schwieriger, so dass die meisten Betriebe volle Lager an Ausgangsmaterial oder lieferbarem Material/Produkt aufweisen.

Die Herstellung einer RC-Gesteinskörnung unterliegt nach DIN EN 12620 den gleichen Anforderungen wie die entsprechende Gesteinskörnung aus Primärmaterial. Der Herstellungsbetrieb und sein Produkt müssen auf ein Produkt ausgerichtet werden, das eine CE-Kennzeichnung aufweist. Dies erfordert eine entsprechende technische Ausrüstung des Betriebes sowie ein lückenloses Netz aus werkseigener Produktionskontrolle und Fremdüberwachung. Selbst gegenüber einer Produktion von RC-Baustoffen für den Straßenbau nach TL SoB-StB (Frostschutz- oder Schottertragschichten) sind damit deutlich höhere Anforderungen verbunden. Es muss daher große Anreize für einen Recyclingbetrieb geben, diesen Schritt hin zu einer Zertifizierung zu gehen.

Die geschilderten Probleme in der Vermarktung ihrer Produkte und dies gerade in den klassischen Absatzbereichen macht die Option Betonzuschlag für die Betriebe immer attraktiver. Viele Betriebe haben sich daher bereits mit diesem Absatzweg auseinandergesetzt und sich informiert. Das zentrale Hemmnis stellt aber die derzeitige Lücke in den technischen Regelwerken zum Nachweis der Umweltverträglichkeit rezyklierter Gesteinskörnungen dar, für welche derzeit nach Bauregelliste B Teil 1, Anlage 1/1.3 eine abZ allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich ist. Obwohl die tatsächliche "Schadstoffbelastung" deutlich (meist um eine bis zwei Größenordnungen) unter den Grenzwerten liegt, ist dieses Verfahren für die Bauschuttrecycler aufwendig, mit nicht unerheblichen Kosten verbunden und zudem langwierig.

Entsprechend möchten viele Betriebe den Zeitpunkt abwarten, zu dem diese Regelungslücke geschlossen sein wird. Bis dato konnte davon ausgegangen werden, dass dies im Laufe des Jahres 2016 erfolgen wird. An dieser Stelle wird auf die Stellungnahme des DIBt ([https://www.dibt.de/de/Dibt/data/Zweite\\_Stellungnahme\\_EuGH\\_Urteil\\_C\\_100\\_13.pdf](https://www.dibt.de/de/Dibt/data/Zweite_Stellungnahme_EuGH_Urteil_C_100_13.pdf)) vom 17.12.2015 wie folgt verwiesen. „Die Gremien der Bauministerkonferenz bereiten derzeit eine Novellierung der Musterbauordnung vor. Danach können von der Bauaufsicht für Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung nach Bauproduktenverordnung (Verordnung (EU) Nr. 305/2011) keine nationalen Verwendbarkeits- und Übereinstimmungsnachweise verlangt werden. Demgemäß wird zukünftig bei allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen für Bauprodukte mit CE Kennzeichnung nach der Bauproduktenverordnung voraussichtlich die Funktion als Verwendbarkeitsnachweis im Sinne der Landesbauordnungen entfallen und die Verwendung des Ü-Zeichens nicht mehr zulässig sein. Nach derzeitigem Beratungsstand können die über diesen Zeitpunkt (15.10.2016) hinaus geltenden Zulassungen für ihre Restlaufzeit als technische Nachweise gegenüber der Bauaufsicht für nationale bauwerksbezogene Anforderungen herangezogen werden, wenn die nach harmonisierten Spezifikationen erklärten Leistungen diesen nationalen Anforderungen nicht entsprechen. Für eine Heranziehung als technischer Nachweis empfiehlt sich die Einhaltung der Regelungen zur Eigen- bzw. Fremdüberwachung, da nur so die Übereinstimmung des Bauproduktes mit den Regelungen der Zulassung sichergestellt werden kann. Anerkannte Stellen werden auch weiterhin - über den 15.10.2016 hinaus - für die in den Zulassungen vorgesehene Überwachung zur Verfügung stehen“.

Als Fazit lässt sich festhalten: In beiden Regionen stehen die Recycler „Gewehr bei Fuß“. Es ist zu erwarten, dass einige Betriebe in die Produktion einsteigen werden, sobald für die Herstellung der RC-Gesteinskörnung wieder ein umfassendes Regelwerk existiert.

## 6 Aufbereitung auch dezentral

### Hintergrund

Nach den verschiedenen politischen Zielen auf Bundes- und auf Landesebene soll sich die Bautätigkeit zunehmend in den Siedlungsbestand verlagern. So gilt für das Land Baden-Württemberg das Ziel „Netto-Null“ bis zum Jahr 2021 und damit ab diesem Zeitpunkt den weiteren Zuwachs von Siedlungs- und Verkehrsflächen zu vermeiden. Auf Bundesebene wurde für diesen Zeitpunkt eine Beschränkung auf 30 ha/Tag als Ziel formuliert.

Betrachtet man sich die Statistiken in Baden-Württemberg, ist seit den 90er Jahren in der Tat ein deutlicher Rückgang in der Zunahme der Siedlungs- und Verkehrsfläche zu erkennen. Der Zuwachs lag zur Jahrtausendwende noch bei etwa 12 ha/Tag und hat sich aktuell den 5 ha/Tag genähert.

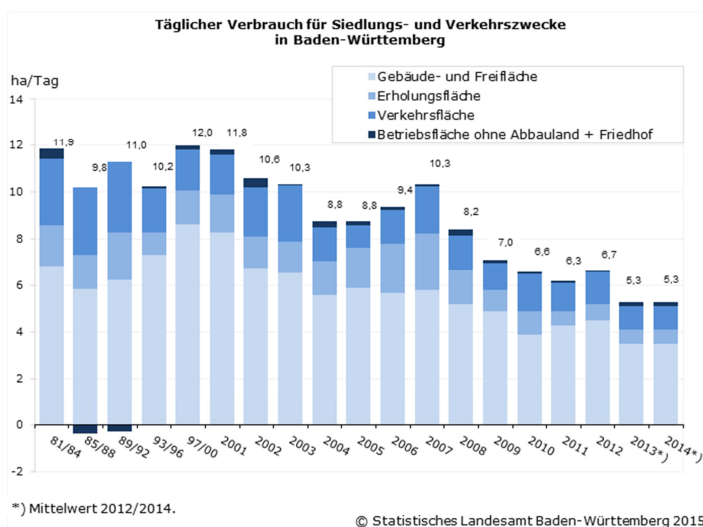


Abbildung 6.1: Entwicklung des Zuwachses an Siedlungsflächen in Baden-Württemberg

Die politischen Ziele sind damit ein Stück weit in der Realität umgesetzt. Dies resultiert nicht nur aus den von der Landespolitik gesetzten Rahmenbedingungen, sondern vor allem auch aus der Attraktivität, die das Wohnen in der Stadt in diesem Zeitraum gewonnen hat. Dies wird sehr gut aus den Zahlen zur voraussichtlichen Bevölkerungsentwicklung in den einzelnen Kreisen und kreisfreien Städten deutlich. Mit Abstand die höchsten Zuwächse sind auch weiterhin für die Stadtkreise postuliert, während für periphere ländliche Regionen auch weiterhin ein Bevölkerungsverlust prognostiziert wird, trotz landesweit wachsenden Bevölkerungszahlen (Zuwachs um 2,2 % bis 2030).

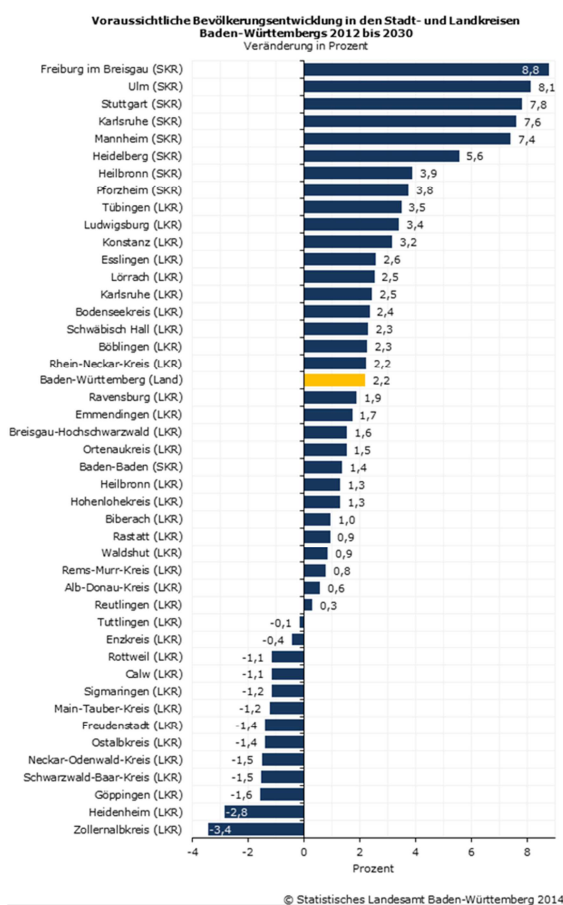


Abbildung 6.2: Bevölkerungsprognose für die Kreise und kreisfreien Städte in Baden-Württemberg

Dies hat Folgen für die zu erwartenden Bautätigkeiten und Massenströme. Das Bauen im Siedlungsbestand bedeutet in der Regel, dass Bauflächen erst vom Altbestand geräumt werden müssen. Der Baustoffnachfrage geht deshalb immer ein Bauschutttaufkommen voran. Die Bauschuttmengen fallen zudem in unmittelbarer Nachbarschaft zur Baustoffnachfrage an, so dass aufbereiteter Bauschutt der Baustoffindustrie als örtliche Rohstoffquelle zur Verfügung stehen kann. Primäre Rohstoffvorkommen liegen in der Regel in größeren Entfernungen zu den Ballungsräumen und Städten und müssen über größere Distanzen herangefahren werden.

Diese mögliche Minderung der Transportlasten macht sich sowohl ökonomisch als auch ökologisch bemerkbar. Die örtliche Verfügbarkeit des Rohstoffes ist der spezifische Vorteil der Baustoffalternative R-Beton.

Nicht immer liegen die Bauschuttrecyclinganlagen und damit die Produktionsanlage für die Gesteinskörnung so zentrumsnah wie im Beispiel Mannheim. Hier befindet sich der Standort (Fa. Scherer & Kohl) im Mannheimer Handelshafen und damit zudem in unmittelbarer Nachbarschaft zu einem Transportbetonwerk (Fa. TBS). Das Recycling von Bauschutt ist mit Lärm- und Staubemissionen verbunden, so dass schon Fragen des Immissionsschutzes eine innenstadtnahe Lage erschweren. Die benannte Attraktivität der Stadtlagen führt zudem zu hohen Grundstückskosten bzw. geringer Verfügbarkeit von geeigneten Grundstücken, da Gewerbe- und Industrieflächen umgewandelt werden.



Abbildung 6.3: Ideale Lage der Gesteinskörnungsherstellung am Beispiel Mannheim;  
Gesteinskörnung: Fa. Scherer + Kohl; Betonwerk: Fa. TBS

### Aufgabenstellung

Es stellte sich demnach die Frage, inwieweit es möglich ist, die Gesteinskörnungen in den geforderten Qualitäten bereits vor Ort auf der Baustelle mit dem Rückbauvorhaben unter Einsatz mobiler Geräte herzustellen und dies in einem guten Verhältnis von Aufwand und Nutzen, gerade auch im Vergleich zu einer stationären zentralen Aufbereitung.

Gerade bei größeren Rückbauvorhaben auf alten Industrie- und Gewerbeflächen erfolgt in der Regel eine Aufbereitung vor Ort auf der Baustelle. Der große Massenstrom macht die Bereitstellung einer mobilen Anlage wirtschaftlich. Die Größe des Grundstückes und die Lage in einem Industrie-oder zumindest Gewerbegebiet ermöglichen zudem den Einsatz von mobilen Brechern vor Ort auch aus Immissionsschutzgründen. In städtischer Lage mit Wohnbebauung im Umfeld ist eine derartige Praxis kaum möglich. Die so zerkleinerten Massen verbleiben vor Ort und werden dort in der Regel für eher untergeordnete Zwecke eingesetzt. Typisch sind die Verfüllung der Baugrube und das Anlegen von Schotterflächen.

Handelt es sich beim Rückbaumaterial um Betonbruch oder auch gutes Mauerwerkmaterial stellt sich die Frage, ob nicht ein Massenaustausch sinnvoller wäre. Das beim Rückbau anfallende und gebrochene Material wird direkt zu Straßenbaustellen abgefahren und dort als bspw. Frostschuttschichtmaterial direkt verwendet oder auch direkt ab Baustelle als Zuschlag an Betonwerke vermarktet. Im Gegenzug können für die gegebenenfalls benötigten Erdbaumaßnahmen Materialien aus den Aufbereitungsanlagen genutzt werden, die dort als bodenähnliches Material anfallen, die sich ausschließlich zum Einsatz in Erdbaumaßnahmen eignen. Nur über den Massenaustausch wird diesen Materialien eine Verwertung ermöglicht. Nur über den Massenaustausch können der Altbeton und das gebrochene Mauerwerkmaterial einer hochwertigen, den wertgebenden Eigenschaften entsprechenden Verwertung in der Bauindustrie zugeführt werden.

Um diese Möglichkeiten an einem konkreten Beispiel zu erproben, hat die Fa. Feess als Projektpartner ein Abbruchvorhaben in Denkendorf zur Verfügung gestellt. Die Entkernung und der Rückbau des Gebäudes wurden der Zielstellung angepasst. Das anfallende Materi-

al wurde vor Ort gebrochen und analysiert. Die Probenahme und Analyse des Materials erfolgte durch den Projektpartner Institut Dr. Haag aus Kornwestheim.

Bei dem Gebäude handelt es sich um das letzte Gebäude eines größeren Produktionsstandortes, das im Erdgeschoss die Firmenfeuerwehr und ansonsten Werkwohnungen beherbergte. Das Gebäude wurde mit 3.600 t mineralischen Massen abgeschätzt. Das Gebäude besteht aus Betonfertigteilen mit einigen Zwischenwänden aus Kalksandstein im EG und Gipsdielen in den Wohngeschossen.



Abbildung 6.4: Zum Rückbau vorgesehene Gebäude in Denkendorf

Folgende Aufgabenstellungen waren mit der Bereitstellung dieses konkreten Rückbauvorhabens verbunden:

- Konzeption eines geeigneten Gebäuderückbaus
- Prüfung, inwieweit sich dezentral hochwertige Gesteinskörnungen für den Straßen- und Wegebau bzw. als Zuschlag für die Betonindustrie herstellen lassen
- Abwägung von Aufwand und Nutzen

## 6.1 Konzeption und Ablauf der Rückbaumaßnahme

### Entkernung

Wie bei allen größeren Rückbaumaßnahmen üblich, wurde für das Gebäude vorab eine Begutachtung durchgeführt. Identifiziert wurden dabei Asbest-Bodenbeläge und Asbest-Fensterbänke sowie problematisches Dämmmaterial. Diese Begutachtung sowie die Entnahme dieser Materialien im Rahmen der Entkernung erfolgten unabhängig von der speziellen Aufgabenstellung des Projektes.

- Die Entkernung eines Gebäudes erfolgt grundsätzlich und dies auch dann, wenn das gebrochene Material letztendlich vor Ort verbleiben soll. Auch wenn es die Grundstücksgrenze nicht verlässt, muss das Rückbaumaterial den umwelttechnischen Anforderungen entsprechen, die für die Art des Einsatzes gefordert wird. Im vorliegenden Fall bedeutet dies, dass das Material, das zur Verfüllung der Keller volumens unter GOK und zur Errichtung einer unbefestigten Parkfläche vorgesehen ist, Höchstbelastungen einhalten muss, die Einsätze ohne Überdeckung mit Asphalt u. ä. sowie relative Grundwassernähe ermöglichen, also Z1.1-Qualität auf-

weisen muss. Zu beachten sind zudem auch bei einer derartigen Verwertung die nach TL Gestein maximal zugelassenen Anteile an Fremdbestandteilen, d.h. Anteilen an bspw. Holz und Kunststoffen. Dies erfordert die weitgehende Entnahme dieser nicht-mineralischen Bestandteile aus dem Gebäude vor dem eigentlichen Rückbau.

Das zumindest von der Fa. Feess üblicherweise praktizierte Vorgehen ist in diesem Fall der Abtrag des Flachdaches (Bitumenbahnen) samt der Unterkonstruktion und der Dämmung. Darüber hinaus werden die Gipskartonplatten (samt Innendämmung) entnommen sowie Türen und Fensterflügel entfernt.

Für das vorliegende Projekt und seine Aufgabenstellung – Herstellung eines qualifizierten Baustoffes für Betonwerke bzw. auch für Frostschutz- und Schottertragschichten im Straßenbau wurde entschieden, im Rahmen der Entkernung noch folgende Maßnahmen durchzuführen:

- Entfernen der abgehängten Decken im Erdgeschoss
- Rückbau des schwimmend verlegten Estrich samt Entfernung der Dämmung
- Ausbau sämtlicher nicht-tragender Leichtbauwände aus Gipsdielen
- Entfernung der Isolierung um Leitungsrohre und Kabelschächte; tlw. auch Rückbau der Leitungen selbst
- Ggf. Ausbau des Schornsteins



Abbildung 6.5: Ausbau der Innenwände (Gipsdielen)



Abbildung 6.6: Abtragen der Abdeckung und Dämmung des Flachdaches



Abbildung 6.7: Ausbau der Innendämmung und Innenverkleidung



Abbildung 6.8: Ausbau der Fenster und Türen inkl. Zargen





Abbildung 6.9: Entfernen des Wärmedämmverbundsystems



Abbildung 6.10: Entfernen des Wärmedämmverbundsystems um die Balkone herum auch händisch

### **Selektiver Rückbau**

Nach dem üblichen Vorgehen beim Rückbau eines Gebäudes werden die Fensterrahmen und Türzargen sowie andere gröbere Fremdstoffe händisch aus dem beim Rückbau entstehenden Haufwerk entfernt, und zwar durch die Person, die vor allem zur Niederhaltung der Staubemissionen (Sprühnebel mittels Schlauch) verantwortlich ist.

Eine Auftrennung in Mauerwerk und Beton erfolgt bei derartigen Gebäuden nicht. Die Nicht-Betonanteile sind hierfür zu gering. Die Innenwände aus Kalkstein im Erdgeschoss fallen nicht ins Gewicht. Auch sonst ist eine derartige Auftrennung im Rückbau nur schwierig möglich. Klassisch ist eine Getrennthaltung der Materialien dann, wenn ganze Bau-

werksteile als Monofraktion anfallen. Dies gilt insbesondere für Kellergeschosse, Bodenplatten und ähnliches. Diese werden auch dann zurückgebaut, wenn wie im vorliegenden Fall, das Material auf dem Gelände verbleibt und zur Verfüllung der Keller / der Baugrube verwendet wird. Das Grundstück soll ja verkehrsfähig und damit unmittelbar bebaubar sein.

In der Praxis füllt sich der Kellerraum während des Rückbaus mit Material: Dies ist durchaus gewollt, da die Fläche so für den Abrissbagger befahrbar wird. Ist das Gebäude gelegt, erfolgt im zweiten Schritt die Auskoffierung des Kellers, um dann abschließend die Kellerwände und den Kellerboden rückbauen zu können.

Immer dann, wenn der Bauschutt vom Gelände abtransportiert werden soll, wird abschließend bei der Beladung der Fahrzeuge ein Sieblöffel eingesetzt. Bei der Projektaufgabenstellung der Herstellung einer hochwertigen Gesteinskörnung bereits vor Ort, wird dieser Sieblöffel auch bei der Beschickung des Brechers eingesetzt. Damit soll der Produktmassenstrom von Feinmaterial entlastet werden, das bauphysikalisch eher problematisch ist. Der Einsatz eines Sieblöffels erfordert etwas mehr Zeit für die Beladung oder Beschickung, ersetzt beim Brechen vor Ort jedoch das Vorsieb.

Über das übliche Maß hinaus wird bei dieser Aufgabenstellung bei der Beschickung des Brechers mit einem Sieblöffel hantiert.



Abbildung 6.11: Rückbau und Unterdrückung von Staubemissionen



Abbildung 6.12: Getrennte Bereitstellung von Metallen und belasteten Materialien (in Big Bags)



Abbildung 6.13: Getrennte Bereitstellung von Holz

## 6.2 Aufbereitung / Eignungsprüfung

Das beim Rückbau eines Gebäudes anfallende Material muss auch dann gebrochen werden, wenn es vor Ort verbleibt und bspw. zur Verfüllung der Baugrube eingesetzt wird. Diese Zerkleinerung erfolgt zumindest bei der Fa. Feess auf jeden Fall mittels Prallmühle, so dass im ersten Schritt die Betone vorzerkleinert werden und die Bewehrung entfernt werden kann. Ein Backenbrecher könnte auch mit grobstückigeren Materialien arbeiten. Die Vorzerkleinerung erfolgt mittels Meißel oder einem sogenannten Pulverisierer und lässt eine Vermarktung der Metalle zu.

Erfolgt die Zerkleinerung allerdings mit dem Ziel, das Material vor Ort zu belassen, wird der gesamte Massenstrom mit einem geringeren Aufwand und mit einem deutlich größeren Größtkorn gebrochen, als für die Straßenbaustoffe oder gar die Vermarktung an Betonwerke benötigt.

Erfolgt der Rückbau des Gebäudes mit dem Ziel, vor Ort dezentral eine hochwertige Gesteinskörnung herzustellen, die sich ab Baustelle vermarkten lässt, kann von einem höheren Aufbereitungsaufwand ausgegangen werden. Bei gleichbleibender Aufbereitungstechnik (Brecher) müssen die Rückbaumassen in etwa zweimal durch den Brecher gegeben werden, um die für die Produkte notwendige Begrenzung des Größtkorns und die Korngrößenabstufung zu erzielen.

**RC-Produkt für den Straßen- und Wegebau**

Das so produzierte Material wurde einer Eignungsprüfung unterzogen. Probenahme und Analyse erfolgte durch den Projektpartner, das Institut Dr. Haag aus Kornwestheim. Die nachfolgenden Ergebnisse sind deren entsprechendem Analysebericht [Institut Dr. Haag 2015] entnommen.

In einem ersten Schritt wurde das Material vor Ort zu einem Material aufbereitet, das als Frostschuttschicht im Straßen- und Wegebau eingesetzt werden könnte. Das Material wurde dementsprechend einem Eignungstest nach den Kriterien unterzogen, die die Technischen Lieferbedingungen für Schichten ohne Bindemittel TL SoB-StB 04 einfordern. Es wurde hierzu nicht weiter abgesiebt und klassiert, sondern das Material direkt aus dem Brecher beprobt. Um das Ergebnis vorweg zu nehmen: Das Material hat diesen Eignungstest bestanden. Dieser hochwertige Baustoff für den Straßenbau lässt sich auch vor Ort auf der Abbruchbaustelle herstellen.

Wie man der Grafik entnehmen kann, liegt die Korngrößenverteilung innerhalb der vorgegeben Sieblinie. Das Material enthält, der Aufbereitungssituation geschuldet, etwas geringe Anteile an feinem Material und dafür höhere Anteil im gröberem Spektrum (> 31,5 mm), ist aber als Frostschuttschicht gut geeignet.

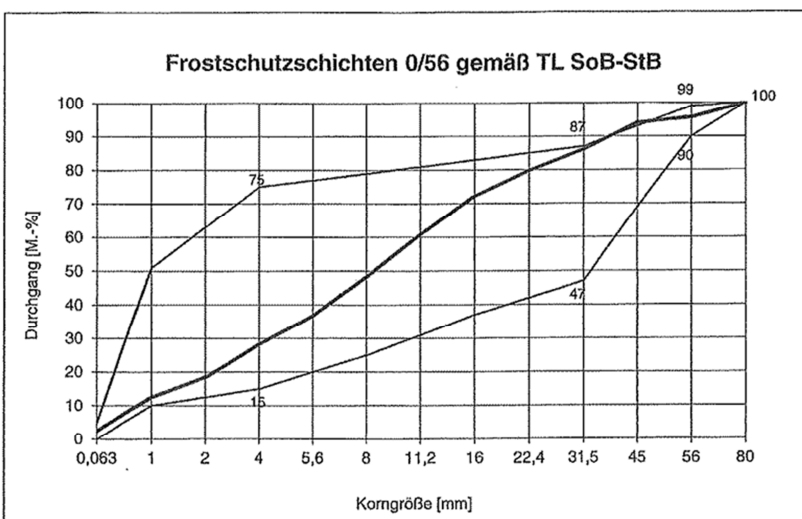


Abbildung 6.14: Sieblinie der Körnung 0/56mm

Die Prüfergebnisse auf Frostbeständigkeit zeigen zunächst für die Prüfkörnung (8/11) eine Abspaltung von 5,3 % Massenprozent und damit eine Überschreitung des

höchstzulassenen Wertes von 4 % zur Einordnung in die Kategorie F4. Gemäß TL SoB-StB 04 Abschnitt 2.2.1.2.2 ist eine Überschreitung bis auf 10 Massenprozent dann zulässig, wenn der Frostversuch an der Gesamtkörnung ( $> 0,063$  mm) eine Absplitterung  $< 2$  Massenprozent ergibt und zusammen mit dem Anteil  $< 0,063$  mm der Gesamtwert unter 5 Massenprozent liegt. Erreicht wurden 0,2 % und 2,7 %, so dass auch die Frostbeständigkeit des Materials bestätigt wurde.

Der maximal zugelassene Feinanteil (abschlämbare Fraktion  $< 0,063$  mm) von  $< 5$  % wurde mit 2,5 % deutlich eingehalten.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist die Widerstandsfähigkeit gegen Zertrümmerung. Die Prüfkörnung (8 / 12,5 mm) erreichte eine Rohdichte von  $2.581 \text{ kg/m}^3$  und einen Schlagzertrümmerungswert im Mittel von 23,5 % bei Einzelwerten zwischen 23,18 % und 23,74 %. Der Zielwert  $< 32$  % wurde damit deutlich erreicht.

Tabelle 6.1: Stoffliche Zusammensetzung im Baustoffgemisch 4/56 [Institut Dr. Haag, 2015]

	Ist [M.-%]	Soll [M.-%]
Naturstein	2,0	-
Kies	10,8	-
Betonbruch	84,3	-
Asphaltgranulat	1,7	$\leq 30$
Klinker, Ziegel und Steinzeug	1,0	$\leq 30$
Kalksandstein, Putze und ähnliche Stoffe	-	$\leq 5$
mineralische Leicht-/ Dämmbaustoffe (Gasbeton, Bimsbeton)	-	$\leq 1,0$
Holz, Gummi, Kunststoffe, Textilien	0,2	$\leq 0,2$

Wie angesichts der Gebäudecharakteristik zu erwarten, war die stoffliche Zusammensetzung des Materials (siehe Tab. 6.1) optimal. Es handelte sich quasi um reinen Altbeton, die limitierenden Anteile an Asphalt, Mauersteine aber auch mineralische Leichtbaustoffe wurden deutlich eingehalten. Der Analysewert für nicht-mineralische Fremdstoffe war mit 0,2 % überraschend hoch, was dem Material ansonsten nicht anzusehen war, so dass dieser Wert eher nicht repräsentativ erscheint.

Für den Einsatz als Frostschutzschicht ist auch der Wasserschluckwert ein wichtiges Kriterium. Bei einer Proctordichte von  $1.824 \text{ kg/m}^3$  und einem Wassergehalt von 13,6 % wurden ein Mittelwert von  $1,91 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$  erreicht, ein Wert deutlich über den Anforderungen von  $> 1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$ .

Die Prüfung der umwelttechnischen Eignung ergab eine Einstufung auf Z 1 gemäß des Recyclingerlasses des Landes Baden-Württemberg. Über nahezu alle Kriterien hinweg lagen die gemessenen Werte sehr deutlich unter den Zuordnungswerten Z 1.1 (Tabelle 6.2). Auffallend ist die etwas höhere Belastung für Chrom, resultierend möglicherweise aus dem Chromat des alten Zementes. Auffallend ist jedoch mindestens im gleichen Maße die sehr niedrige Belastung an Sulfat.

Die Sulfatwerte sind ein Indiz für die Erfolge der sehr ambitionierten Entkernung des Gebäudes, verbunden mit der Entnahme der Gipsbaustoffe. Angesichts dieses Wertes von  $18 \text{ mg/l}$  bei einem Zielwert von  $250 \text{ mg/l}$ , d.h. einer Unterschreitung in Höhe von einer Größenordnung bzw. Faktor 10, hätte man den Aufwand der Entkernung auch etwas niedriger halten können.

Tabelle 6.2: Ergebnisse der chemischen Untersuchung des Materials und Bewertung gemäß des Erlass: „Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial“, des Umweltministeriums von April 2004 [Institut Dr. Haag, 2015]

**Umweltrelevante Merkmale**

Die chemische Untersuchung wurde gemäß Erlass " Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial ", herausgegeben vom Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg (Erlass vom 13.04.2004, Az: 25-8982.31/37), durchgeführt.

Parameter	Dimension	Messwert				Zuordnungswert		
		Eignungsprüfung				Z 1.1	Z 1.2	Z 2
Kohlenwasserstoffe		EP/2015						
C <sub>10</sub> -C <sub>22</sub>	mg/kg	< 50				300	300	1000
*)C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub>	mg/kg	56				600	600	2000
PAK 16	mg/kg	3,4				10	15	35
EOX	mg/kg	< 0,50				3	5	10
PCB <sub>6</sub>	mg/kg	< 0,01				0,15	0,5	1
Arsen	µg/l	< 3,0				15	30	60
Blei	µg/l	< 10				40	100	200
Cadmium	µg/l	< 1,0				2	5	6
Chrom gesamt	µg/l	29				30	75	100
Kupfer	µg/l	< 10				50	150	200
Nickel	µg/l	< 10				50	100	100
Quecksilber	µg/l	< 0,1				0,5	1	2
Zink	µg/l	< 25				150	300	400
Phenole	µg/l	< 10				20	50	100
Chlorid	mg/l	< 3,0				100	200	300
Sulfat	mg/l	18				250	400	600
pH-Wert	-	12,3				6,5 -12,5	6,0 -12,5	5,5 -12,5
elektr. Leitfähigkeit **)	µS/cm	2600				2500	3000	5000
Vanadium	µg/l	-				-	-	-

**Anmerkungen:**

\*) Überschreitungen durch Asphaltanteile stellen kein Ausschlusskriterium dar (s. Vermerk vom 12.10.2004, UVM).

\*\*) Die Überschreitung des Zuordnungswertes für die elektrische Leitfähigkeit stellt kein Ausschlusskriterium dar, wenn der pH-Wert > 11,5 und die Werte für Sulfat und Chlorid eingehalten werden.

**Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 als Zuschlag für die Betonindustrie**

In einem nächsten Schritt erfolgte die Prüfung des Materials nach DIN EN 12620 und damit nach Eignung zur Verwendung in Transportbetonwerken. Die nachfolgenden Untersuchungsergebnisse sind dem Prüfzeugnis entnommen, das vom Projektpartner Institut Dr. Haag [Institut Dr. Haag 2015] erstellt wurde.

Um den Anforderungen der DIN EN 12620 zu genügen, musste das Material zunächst weiter aufbereitet werden. Die Aufbereitung bestand aus einer Absiebung des Feinanteils < 2 mm. RC-Sande dürfen in den Betonrezepturen nicht enthalten sein. Betonwerke sind zudem auf eine Beschränkung des Größtkorns angewiesen. Typisch ist der Einsatz einer Körnung 2/22 oder 2/16. Für das Projekt wurde eine Körnung 2/16 hergestellt. Die hierzu erforderliche Absiebung konnte aus technischen Gründen nicht mobil auf der Abbruchbaustelle durchgeführt werden. Zwei Lkw-Fuhren des Materials wurden daher nach Rabailen

auf die stationäre Anlage der Fa. Feess gebracht und dort abgesiebt. Die Siebung dort erfolgt jedoch mit mobilen Geräten, die Erkenntnisse lassen sich übertragen.

Auch hier lässt sich das Ergebnis vorweg nehmen. Das Material erfüllt die Anforderungen der DIN EN 12620 und dies deutlich. Untersucht wurde eine repräsentative Probenmenge von 36 kg Material.

So entsprach die Korngrößenverteilung sehr gut den Vorgaben. Die Kornrohichte des Materials lag mit  $2.350 \text{ kg/m}^3$  deutlich über den Mindestanforderungen von  $> 2.000 \text{ kg/m}^3$ . Auch die Wasseraufnahmefähigkeit war mit 3,8 % deutlich unter den maximal erlaubten 10 %. Der Frost-Tau-Widerstand bestätigte mit 2,2 % die Kategorie F4.

Die Gehalte an wasserlöslichen und säurelöslichen Chloriden lagen mit 0,0004 % und  $< 0,005 \%$  um Größenordnungen unter den erlaubten Werten von jeweils  $< 0,04 \%$ . Auch die Belastungen an säure- und wasserlöslichem Sulfat waren mit 0,36 % und 0,0103 % deutlich unter den noch erlaubten Werten von 0,8 % und 0,2 %. Eine Verunreinigung durch leichtgewichtige organische Bestandteile konnte nicht nachgewiesen werden. Der ambitionierte Sollwert von  $< 0,1 \%$  war daher gut eingehalten.

Angesichts der Charakteristik des Gebäudes war klar, dass die Gesteinskörnung der Lieferkörnung Typ 1 entsprach. Der Anteil an Altbeton und ungebundenen Gesteinskörnung (Rc + Ru) lag in Summe bei 97,1 %, die maximal zulässigen Verunreinigungen (Ra =Asphalt, X+Rg = mineralische Verunreinigungen und Glas, FL = schwimmendes Material im Volumen) wurden deutlich unterschritten. Der Anteil an Mauerwerk (Rb) lag mit etwa 1% deutlich unter den für die Gesteinskörnung Liefertyp 1 maximal erlaubten 10%.

Tabelle 6.3: Prüfung der stofflichen Zusammensetzung [Institut Dr. Haag, 2015]

Bestandteile	IST		Soll	
	M.-% <sup>1)</sup>	Kategorie	Typ 1	Typ 2
Rc + Ru	97,1	Rcu <sub>95</sub>	Rcu <sub>90</sub>	Rcu <sub>70</sub>
Rb	1,0	Rb <sub>10-</sub>	Rb <sub>10-</sub>	Rb <sub>30-</sub>
Ra	0,8	Ra <sub>1-</sub>	Ra <sub>1-</sub>	Ra <sub>1-</sub>
X + Rg	0,1	XRg <sub>0,5-</sub>	XRg <sub>1-</sub>	XRg <sub>2-</sub>
FL	1,0	FL <sub>2-</sub>	FL <sub>2-</sub>	FL <sub>2-</sub>

<sup>1)</sup> FL:  $\text{cm}^3/\text{kg}$

Die Prüfung der umwelttechnischen Eignung erfolgte nach DIN 4226-100 und damit nach dem alten Regelwerk, weil die DIN EN 12620 keine umwelttechnische Eignungsprüfung enthält. Die entsprechende Ergänzung des Regelwerkes soll im Jahre 2016 erfolgen. Bis dahin müssen die Produzenten der RC-Gesteinskörnung beim DIBt einen Antrag auf allgemeine bauaufsichtliche Zulassung abZ stellen. Für die ersten beiden Betriebe ist mittlerweile eine abZ ausgesprochen worden. Dies sind bislang in Baden-Württemberg nur Fa. GWV aus Remseck (für Typ 1) und Fa. Feess aus Kirchheim/T (für Typ 1 und Typ 2). In beiden Fällen erfolgte die Prüfung erneut nach Tabelle G.1 der DIN 4226-100 (Tabelle 6.4). Betrachtet man sich die Ergebnisse zeigt sich: Die zulässigen Höchstwerte wurden deutlich unterschritten, in vielen Fällen um eine bis zwei Größenordnungen (d.h. Faktor 10 bis 100).

Tabelle 6.4: Umwelttechnische Bewertung der Gesteinskörnung [Institut Dr. Haag, 2015]

		Ist	Höchstwerte
<i>Feststoff</i>			
Kohlenwasserstoffe (C <sub>10</sub> -C <sub>40</sub> )	mg/kg	< 50	1000 <sup>b</sup>
PAK nach EPA	mg/kg	0,223	75
EOX	mg/kg	< 0,5	10
PCB	mg/kg	n.n.	1
<i>Eluat</i>			
pH-Wert	-	11,57	12,5 <sup>a</sup>
elektr. Leitfähigkeit	µS/cm	744	3000 <sup>a</sup>
Chlorid	mg/l	6,2	150
Sulfat	mg/l	23,7	600
Arsen	µg/l	< 1	50
Blei	µg/l	< 1	100
Cadmium	µg/l	< 0,5	5
Chrom gesamt	µg/l	6,0	100
Kupfer	µg/l	4,0	200
Nickel	µg/l	< 1	100
Quecksilber	µg/l	0,1	2
Zink	µg/l	83	400
Phenolindex	µg/l	< 10	100
<sup>a</sup> Kein Ausschlusskriterium			
<sup>b</sup> Überschreitungen, die auf Asphaltanteile zurückzuführen sind, stellen kein Ausschlusskriterium dar			

### 6.3 Abwägung von Aufwand und Nutzen

Besteht der Referenzfall in der Aufbereitung des Abbruchmaterials und im Verbleib der Massen vor Ort, muss zum Ausgleich der Handlungsoption: Herstellung und Vermarktung von Gesteinskörnungen für die Betonindustrie oder von RC-Baustoffen für den Straßen- und Wegebau ein Massenausgleich erfolgen. Es müssen hierfür von extern Böden oder Erdbaustoffe bezogen werden, um vor Ort die Verfüllung der Baugrube und die Herstellung der Schotterfläche zu ermöglichen.

Bei der Diskussion der Handlungsoptionen soll bewertet werden, inwieweit der Aufwand zur Herstellung von hochwertigen Gesteinskörnungen und deren Vermarktung gegenüber der Referenzlösung angemessen ist. Dies bedeutet, dass auch im Falle einer Vermarktung das Abbruch-Grundstück in der beauftragten Form (verfüllte Baugrube, Schotterfläche) übergeben werden muss.

Wie die Untersuchungsergebnisse zeigten, lassen sich dezentral auf der Baustelle sowohl hochwertige Straßenbaustoffe als auch Gesteinskörnungen für die Vermarktung in Betonwerke (GK Typ 1) herstellen. Da vor Ort Material verbleiben muss, um das Gelände plan übergeben zu können, bietet es sich an, für diese Handlungsoption die Herstellung der GK Typ 1 anzunehmen. Nimmt man überschlägig einen Anteil Brechsand von 30 % an, könnten 2.500 Tonnen dieser Gesteinskörnung vermarktet werden, 1.100 Tonnen verbleiben als Brechsand oder Grobschlag auf der Baustelle.

Diese dezentrale Herstellung der hochwertigen Gesteinskörnung ist mit folgendem Mehraufwand verbunden:



- Zusätzlicher Aufwand in der Entkernung; dieser lag im Versuch mit 1,5 Personenmonaten sehr hoch; angesichts der erzielten Qualitäten wird hier ein Optimierungspotenzial unterstellt => 0,75 Personenmonate (5.000 €)
- Ein zweiter Durchgang durch den Brecher, um die geforderte Kornzusammensetzung / Sieblinie zu erreichen, der mit 2,25 €/t Durchsatz abgeschätzt werden kann (7.875 €)
- Bei der Entkernung des Gebäudes wurden zusätzlich die Gipsdielen (90 Tonnen) rückgebauten, die mit 70 €/t entsorgt werden mussten. Setzt man diese Massen ins Verhältnis zu den gesamten Abbruchmassen, müssten sich auch bei deren Verbleib im Massenstrom die Werte für Sulfat auch weiterhin deutlich einhalten lassen. Es wird unterstellt, dass auf einen derartigen separaten Rückbau verzichtet werden kann. Da Gips weich ist, reichert er sich auch weniger im groben, sondern im feinen auf der Baustelle verbleibenden Massenstrom an. Die seit Ende 2014 in Deißlingen, Landkreis Rottweil, bestehende Gipsverwertungsanlage der Firma STRABAG wurde im konkreten Vorhaben noch nicht berücksichtigt. Sie dürfte inklusive Transport zu etwas geringeren Entsorgungskosten führen.  
Die Entsorgung der Gipsdielen kann für die Bilanzierung ausgenommen werden.
- Angenommen, für die Maßnahme vor Ort wird die gesamte Abbruchmasse benötigt, muss für deren teilweise Vermarktung ein Massenausgleich erfolgen. Spricht man diesen für die Erdbaumaßnahmen benötigten Materialien ein Materialwert von 1 €/t zu und unterstellt eine Transportentfernung von 15 km und damit Transportkosten von 4 €/t, so führt dieser Massenausgleich (2.500 t) zu Kosten von 12.500 €.

Diesem Aufwand steht ein Nutzen gegenüber, der sich aus der Vermarktung der Gesteinskörnung ergibt:

- Setzt man einen Preis von 8 €/t an, ergibt sich aus den prognostizierten 2.500 Tonnen Material ein Erlös von 20.000 €.

Stellt man aus diesen Positionen den Aufwand und Nutzen für die Handlungsoption der Herstellung einer hochwertigen Gesteinskörnung gegenüber, ergibt sich folgendes Bild:  
Aufwand: 5.000 € (Entkernung), 7.875 € (Aufbereitung), 12.500 € (Erdbaustoffe) = 25.375 €  
Nutzen: 20.000 € (Vermarktungserlös)

Im Saldo wäre diese ambitionierte Lösung nicht kostendeckend. Es verbliebe eine Kostenunterdeckung von knapp 5.400 € verbunden

Nicht alle diese zum Abbruch anstehenden Gebäude bestehen aus Betonfertigteilen und weisen eine entsprechend hohe Materialqualität auf. Der Aufwand zur Herstellung einer hochwertigen Gesteinskörnung ist daher bei anderen Objekten tendenziell etwas höher.

Die Handlungsoption rechnet sich aber bspw. dann, wenn der Massenausgleich über eine andere Baustelle heraus erfolgen könnte, bei der ein Abtransport erfolgen muss und im Vergleich zum Antransport auf eine zentrale Aufbereitungsanlage die Anlieferung auf der Baustelle zudem kürzer ist.

Ist kein Massenausgleich notwendig, ist eine dezentrale Aufbereitung der Materialien zu einem qualifizierten Baustoff tendenziell immer dann gegenüber einem Abtransport zu einer stationären Aufbereitungsanlage vorteilhaft, wenn der eingesparte Transportaufwand den Aufwand zur Aufstellung eines mobilen Gerätes auf der Baustelle aufwiegt.

Die Anforderungen an den Immissionsschutz bzw. die Rahmenbedingungen auf der Baustelle dürfen nicht zu hoch sein. Das Gebäude muss zudem ausreichend groß sein, um einen entsprechenden Massenstrom zu bieten.

In diesem Falle bietet sich für die dezentrale Aufbereitung wahrscheinlich eher die Herstellung eines hochwertigen Straßenbaustoffes an, da hierüber die Gesamtkörnung (bspw. 0/45) vermarktet werden kann.

## 6.4 Fazit / Schlussfolgerung

Wie die Ergebnisse des Feldversuches zeigen, lassen sich auch dezentral bereits auf der Abbruchbaustelle hochwertige Gesteinskörnungen herstellen. Sowohl hinsichtlich bautechnischer Eignung als auch hinsichtlich „Schadstoff“-Belastung wurden hervorragende Ergebnisse erzielt.

Dies ist in Anteilen auch auf die gute Ausgangssituation mit einem eher unproblematischen Gebäude zurückzuführen. Wie die Ergebnisse zeigten, wäre die Entkernung des Gebäudes auch etwas weniger ambitioniert möglich gewesen, ohne diesen Erfolg zu gefährden.

Die Herstellung eines Produktes für den Straßen- und Wegebau lässt sich etwas einfacher umsetzen als die Herstellung einer Gesteinskörnung für Betonwerke. Der zusätzliche technische Aufwand ist geringer. Es lässt sich tendenziell der gesamte Massenstrom ab Baustelle vermarkten.

Für die Gesteinskörnung für Transportbetonwerke lässt sich kein Massenverhältnis zwischen den Fraktionen Altbeton und Altmauerwerk einstellen und damit Eigenschaften und Zusammensetzungen, auf die die Betonrezepturen ausgelegt sind. Die Zusammensetzung ergibt sich aus der Charakteristik des Gebäudes. Eine getrennte Aufbereitung und damit gezielte Mischung ist nicht durchführbar.

Die Aufbereitung vor Ort ist mit einem etwas höheren Aufwand verbunden. Sind die Randbedingungen vor Ort gegeben (Fragen des Immissionsschutzes, ausreichend Platz und Zeit, ausreichender Massendurchsatz), rechnet sich die dezentrale Aufbereitung immer, wenn dieser Mehraufwand durch Minderung der Transportlasten kompensiert wird.

Muss das Abbruchmaterial von der Baustelle entfernt werden, sollte immer die Möglichkeit einer Aufbereitung vor Ort geprüft werden.

Es wäre zu prüfen, ob in den Städten zentrale Plätze zur Verfügung gestellt werden können (bspw. alte Industriegelände zur Zwischennutzung), auf denen die Produkte zwischengelagert oder gar die eigentliche Aufbereitung erfolgen könnte.

In einigen Fällen wird das beim Rückbau anfallende Material vor Ort zumindest teilweise zur Verfüllung der Baugrube / Kellerräume und möglicherweise auch zur Geländeprofilierung benötigt.

Wird nur eine Teilmasse für diese Zwecke vor Ort benötigt, sollte eine Aufbereitung zu einer Gesteinskörnung für die Betonindustrie geprüft werden. Handelt es sich um ein Altbauwerk aus vornehmlich Altbeton, dürfte sich die Qualität der Gesteinskörnung ohne allzu großen Mehraufwand bei Rückbau und Aufbereitung herstellen lassen, so das Gebäude einen ausreichenden Massenstrom bietet.

Die Brechsande verbleiben vor Ort, die Körnung wird vermarktet.

Da unter diesen Randbedingungen auf jeden Fall ein Brechereinsatz notwendig wäre, dürfte die mit einem etwas höheren Aufwand verbundene Herstellung der Gesteinskörnung auch aus immissionsschutzrechtlicher Sicht kein Problem darstellen.

Eine Gewerbeabfallverordnung bzw. eine mit der Abbruchgenehmigung verbundene entsprechende Auflage zur Getrennthaltung und Verwertung der Massenströme könnte hierbei hilfreich sein.

Der Einsatz eher feiner Materials kommt der Aufgabenstellung des Erdbaus entgegen. Ein hoher Feinkornanteil unterstützt die Tragfähigkeit und Standfestigkeit des Materials. Werden die Arbeitsräume bzw. Kellergeschosse verfüllt, muss das Material gut verdichtbar sein, ggf. eine hohe Scherfestigkeit und geringe Wasserdurchlässigkeit aufweisen. Diese Eigenschaften werden eher nicht durch Schottermaterial erzielt. „Steine“ sollten daher möglichst anderweitig eingesetzt werden.

Angesichts der Mengenströme, die bspw. im Monitoringbericht des Kreislaufwirtschaftsträgers Bau aufgeführt sind, und deren Verbleib wird die Notwendigkeit deutlich, für einfache mineralische Abfallfraktionen Verwertungswege zu erschließen, die über die Verfüllung von Abgrabungen und Baumaßnahmen auf Deponien hinaus Einsatzzwecke aufweisen, die mit einer Substitution von Primärmaterialien verbunden sind. Die Substitution der beim Abbruch anfallenden „Steine“ und die Erschließung von hochwertigen Absatzwegen im Baubereich für diese Fraktion sind mit diesem Nutzen verbunden. Zudem werden dadurch Absatzwege für die Feinmaterialien erschlossen.

Statistisch erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle 2012

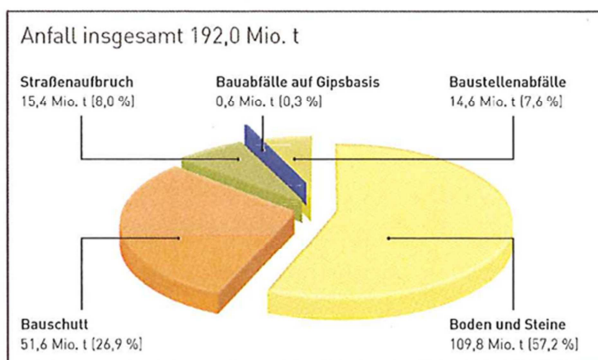


Abbildung 6.15: Im Jahr 2012 statistische erfasste Mengen mineralischer Bauabfälle [Kreislaufwirtschaftsträger Bau 2015]

Aus umwelt- und ressourcenpolitischer Sicht sollten die Rohstoffpotenziale möglichst gehoben werden und ein Massenaustausch stattfinden. Um dies zu ermöglichen, bedarf es

- einer guten Erlössituation für die den Anforderungen der TL SoB-StB oder der DIN EN 12620 entsprechenden Gesteinskörnungen
- möglichst geringer Transportaufwendungen für das Handling der Ausgleichsmassen (regionale Zusammenarbeit)
- höhere Ablagerungsgebühren auf den Deponien, da nur so die Einsparungen der Entsorgungskosten einen wichtigen Faktor in Grenzkostenüberlegungen darstellen

## 7 Entwicklung neuer Betonrezepturen

---

Bereits mit dem ersten durch das Umweltministerium Baden-Württemberg beauftragten Projekts zu R-Beton [ifeu et al. 2013] wurden im Rahmen der Entwicklung und Prüfung von Betonrezepturen die derzeit geltenden Regelwerke in ihren materiellen Vorgaben hinterfragt. Diese ersten Erkenntnisse aus Laborversuchen wurde in dem aktuellen Projekt wieder durch das Betontechnologiezentrum der Fa. Krieger in Remseck aufgegriffen und zur Herstellung von Rezepturen für ein konkretes Bauvorhaben weiterentwickelt.

Die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Beton nach DIN EN 2016-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ wurde aus den Erkenntnissen eines großen Forschungsvorhabens abgeleitet, das sich in den 90er Jahren erstmalig der Thematik R-Beton (damals: Recyclingbeton) auseinandersetzte. In diesem Zusammenhang wurde mit der Waldspirale in Darmstadt ein erstes Gebäude errichtet. Zu dem damaligen Zeitpunkt war die Bauschutttaufbereitung in Verbindung mit der Selektivität des Rückbaus von Gebäuden deutlich unter dem heutigen technischen Niveau. Die Spezifikationen der RC-Gesteine bzw. die erreichten Qualitäten entsprachen noch nicht dem heutigen Stand. Auch die Zusatzmittel (Betonverflüssiger, Fließmittel usw.) die zum damaligen Zeitpunkt entwickelt waren, hatten lange nicht die Leistungsfähigkeit, wie sie die heutigen Zusatzmittel aufweisen. Entsprechend sahen die damaligen Rezepturen recht hohe Zementgehalte vor bzw. entsprechend vorsichtig wurden die Rahmenbedingungen hinsichtlich zugelassener Betonsorten und zulässiger Höchstanteile an RC-Gesteinskörnung gesetzt.

Auch die Praxiserfahrungen aus der Schweiz sind Indiz dafür, dass höhere Anteile an RC-Gesteinskörnung bzw. höhere Anteile an „Mischabbruchgranulat“ in den Rezepturen möglich sind. Wie auch von Herrn Weiß, Fa. Krieger Beton, im Jahre 2013 auf einer Tagung vorgestellt [H. Weiß 2013]<sup>2</sup>, lagen die Druckfestigkeiten mit einer 100 % RC-Gesteinskörnung > 2 mm in der Rezeptur in der Eignungsprüfung nach 7 Tagen etwas geringer und hatten aber nach 28 Tagen wieder vergleichbare Werte zu konventionelle Rezepturen.

Im aktuellen Projekt für das Umweltministerium wurden durch den Projektpartner Fa. Krieger bzw. das Betontechnologiezentrum in Remseck folgende Ziele verfolgt:

- Erhöhung des Anteiles der RC-Gesteinskörnung in den Rezepturen von den nach der Richtlinie des DAfStB zulässigen Anteilen von 25 % bis 45 % des Zuschlages auf 60 % (bei Größtkorn 16 mm) oder 64 % (bei Größtkorn 22 mm) und damit auf einen Anteil, in dem für die gesamte Gesteinskörnung > 2 mm eine RC-Gesteinskörnung verwendet wird.  
**Substitution von 60 % bis 64 % des gesamten Zuschlages durch RC-Material**  
Darüber hinaus wurden hierbei Rezepturen entwickelt, die zusätzlich in den Druckfestigkeiten und in den Expositionsklassen teilweise außerhalb der Regelwerke lagen (s.u.).

---

<sup>2</sup> Hans-Jörg Weiß, Beton aus rezyklierten Gesteinskörnungen mit 30% Mauerwerkbruch – Projektergebnisse aus Baden-Württemberg, Vortrag auf der Tagung R13, September 2013, Weimar

- Nach der Richtlinie des DAfStB muss der Sand, d.h. der Anteil im Zuschlag <2mm vollständig aus Primärmaterial bestehen. Dieser Sand wird in Versuchen ebenfalls vollständig durch RC-Sand substituiert, so dass das gesamte Zuschlagsmaterial aus RC-Material besteht

**Substitution von 100 % des gesamten Zuschlages durch RC-Material**

- Herstellung von Betonen mit höherer Druckfestigkeitsklassen als C 30/37 hier: C 35/45

In allen Fällen wird auf eine Gesteinskörnung Typ 1 (> 90 % Altbeton, < 10 % Mauerwerk) zurückgegriffen.

**Für die erste Zielstellung** wurden folgende Rezepturen entwickelt, die zugleich auch für das Bauvorhaben der Fa. Schief eingesetzt werden sollten.

Tabelle 7.1: Betonrezepturen außerhalb der Regelwerke; vollständige Substitution der GK > 2 mm [Lieber / Dziadek 2015]

	Beton 1		Beton 2		Beton 3	
	C 25/30 XC4, XF1, XA1		C 30/37 XC4, XD2 (LP), XF4, XA1		C 35/45 XC4, XD2, XF4, XA2	
Sand	40,3 %	691 kg	38%	646 kg	40,3%	685 kg
RC-Sand						
RC GK 2/16mm	59,7%	1.024 kg	62%	1.053 kg	59,7%	1.015 kg
CEM II/B-M (V-LL) 42,5 N-AZ		290 kg				
CEM I 42,5 N-NA				370 kg		
CEM II/B-M (V-LL) 42,5 R-AZ						380 kg
Wasser		191 kg		174 kg		186 kg
Powerflow 5100		2,3 kg		3		3,8 kg
Centrament Re- tard 371						0,8 kg
Powerment		70 kg				20 kg
Kalksteinmehl		20 kg				20 kg
Mikrohohlkugeln				3,5 kg		

Da diese Rezepturen in der Praxis eingesetzt werden sollten, erfolgte eine Erstprüfung und eine parallele Begutachtung durch Prof. Breit, MPA der TU Kaiserslautern. Die nachfolgenden Ergebnisse sind dieser Begutachtung [Breit 2015] und dem Vortrag von Herrn Dziadek [Lieber / Dziadek 2015] auf dem Fachsymposium zu R-Beton am 23. März 2015 in Stuttgart entnommen.

Wie unter Kap. 3.4 geschildert, kamen die Betone 2 und 3 nicht zum Einsatz, da die ZiE nicht rechtzeitig zur Verfügung stand und der Bau der Stützmauer schon abgeschlossen war.

Die angestrebten Frischbetoneigenschaften wurden bei den Vorversuchen und der Erstprüfung nicht immer sicher erreicht. Bei einer Charge trat eine deutlich zu fließfähige Konsistenz auf, was besonderen Umständen im Betriebsablauf geschuldet war.

Die angestrebten Festbetoneigenschaften wurden erreicht.

Die Druckfestigkeiten lagen für den C 25/30 nach 28 Tagen im Mittel bei 41,3 N/mm<sup>2</sup> (Zielwert 40 N/mm<sup>2</sup>), für den C 30/37 LP bei 46,4 N/mm<sup>2</sup> (Zielwert 47 N/mm<sup>2</sup>). Trotz dieser leichten Unterschreitung werden die Zielwerte der Norm für die Festigkeitsklasse jedoch erreicht. Für den Beton C 35/45 wurden mit einer Druckfestigkeit von 66,5 N/mm<sup>2</sup> (Zielwert 55 N/mm<sup>2</sup>) deutlich zu hohe Werte erreicht.

Ein weiteres wichtiges Kriterium ist der Frost-Tausalz-Widerstand des Betons. Mit der Zuordnung des Betons 1 (C25/30) und seiner Zuordnung zur Expositionsklasse XF1 ergibt sich die Anforderung an die Gesteinskörnung F4. Dies wurde für die RC- Gesteinskörnung der Fa. Feess erreicht. Die beiden anderen Betone müssen für den Einsatz in der Stützmauer die Expositionsklasse XF4 und XF 2 erfüllen, was sich nur direkt am Beton durch einen CDF-Test (Kapillares Saugen von Taumittellösungen und Frost-Tau-Wechsel-Versuch) prüfen lässt. Die Ergebnisse dieser Prüfung sind sehr erfreulich. Die ermittelten Abwitterungswerte liegen bei 0,303 kg/m<sup>2</sup> bis 0,442 kg/m<sup>2</sup> und damit weit unter den Grenzwerten von 1,5 kg/m<sup>2</sup> nach 28 Tagen Frost-Tau-Wechsel für LP-Beton oder 1,2 kg/m<sup>2</sup> für Beton mit Mikroholzkugeln. Prüfungen auf Kriechen und Schwinden wurden nicht durchgeführt, da dies für das geplante Bauvorhaben nicht relevant ist.

Die R-Beton-Rezepturen, die zu 60% am gesamten Zuschlag auf eine RC-Gesteinskörnung zurückgriffen und damit weit über die Vorgaben der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton hinausgingen, erfüllten die wesentlichen Prüfungskriterien und dies bei Festbetoneigenschaften deutlich. Diese guten Ergebnisse wurden selbst für Betonrezepturen erzielt, die Druckfestigkeiten und Expositionsklassen einforderten, die ebenfalls weit über die Regelungen der Richtlinie hinausgehen. **Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass die geltenden Regelwerke auf den aktuellen Stand der Technik angeglichen werden müssen.**

**Für die zweite Zielstellung** – Erhöhung des RC-Anteils am Zuschlag auf 100 % durch Einsatz von RC-Sand – wurden nur Laborversuche [Lieber / Dziadek 2015] durchgeführt. Die Entwicklung der Rezepturen erfolgte ohne einen konkreten Bezug auf ein Bauvorhaben.

Für den Versuch wurden drei verschiedene RC-Brechsande zunächst auf ihre Eigenschaften geprüft:

- RC-BS1: Brechsand, der bei der Herstellung der Gesteinskörnung des Liefertyps 1 (d.h. im wesentlichen Altbeton) anfiel  
Abschlämmbare Bestandteile: 3,6 %; Wasseraufnahme nach 30 Minuten: 30 %
- RC-BS1, gew.: Es handelt sich um die gleiche Art Brechsand aus der Herstellung des Liefertyps 1, allerdings gewaschen  
Abschlämmbare Bestandteile: 1,8 %; Wasseraufnahme nach 30 Minuten: 27 %
- RC-BS2: Brechsand, der bei der Herstellung der Gesteinskörnung des Liefertyps 2 anfiel  
Abschlämmbare Bestandteile: 3,6 %; Wasseraufnahme nach 30 Minuten: 31 %

Diese drei Sandfraktionen wurden in Betonrezepturen verarbeitet, in denen der übrige Zuschlag > 2 mm zunächst mit Muschelkalk als Primärgestein abgedeckt wurde. Die Rezepturen wurden mit 320 kg/m<sup>3</sup> CEM //A-LL 42,5 R und 1,9 kg Fließmittel angesetzt.

Bei den Frischbetoneigenschaften zeigen sich Ergebnisse nahe an einer konventionellen Betonmischung. Auch die Vorversuche zur Druckfestigkeit zeigen für die Rezeptur mit gewaschenem RC-Brechsand deutlich bessere Ergebnisse als für die Rezepturen mit ungewaschenen RC-Brechsanden. Der 28-Tage-Wert von etwa 23 N/mm<sup>2</sup> bleibt allerdings deutlich unter dem Wert von 34 N/mm<sup>2</sup> für die Referenzrezeptur.

Für die Herstellung von Betonen und ihre Einungsprüfung wurde dann auf den gewaschenen Sand zurückgegriffen. Er weist von den drei analysierten die besten Eigenschaften auf.

Für diese abschließenden Untersuchungen wurden folgende Varianten gegenüber gestellt:

- Betonrezeptur mit RC-Gesteinskörnung Typ 1 und der Fraktion < 2 mm als Rheinsand.
- Betonrezeptur mit RC-Gesteinskörnung Typ 1 und einem gewaschenen Brechsand aus der Aufbereitung der Gesteinskörnung Typ 1.

Da es sich bei Typ 1 vornehmlich um aufbereiteten Altbeton handelt, besteht der Brechsand zu hohen Anteilen aus Zementleim.

**Diese ersten Ergebnisse sind durchaus ermutigend.** Im Rahmen von umfassenden Forschungskampagnen müsste mit den RC-Brechsandgehalten variiert werden, um geeignete Anteile an RC-Brechsand an der Sandfraktion zu ermitteln. Derartige Untersuchungen werden unter anderem in dem aktuellen vom BMBF geförderten Forschungsvorhaben von Heidelberger Zement / TU Kaiserslautern „R-Beton; Ressourcenschonender Beton – Werkstoff für die nächste Generation“ durchgeführt werden.

## 8 Fachsymposium zum R-Beton (2015)

---

Im Jahre 2014 wurde ein erstes Fachsymposium zum Thema R-Beton in den neuen Räumlichkeiten des Ministeriumsbaus in Stuttgart durchgeführt. Dieses Fachsymposium stieß auf große Resonanz. Mit diesem Fachsymposium gelang es, die Rolle des Landes Baden-Württemberg im Themenfeld Ressourcenschutz im Bausektor deutlich zu machen.

Die Impulse aus der Schweiz aufgreifend hat das Land eine wichtige Vorreiter- und Vorbildfunktion nicht nur in der Einführung des Baustoffes R-Beton gefunden. Im Südwesten Deutschlands ist es aufgrund der durch das Umweltministerium angestoßenen Bauvorhaben gelungen, diese Baustoffalternative bekannt zu machen und in Ansätzen auf dem Markt einzuführen. In den ersten Projekten und Bauvorhaben erfolgte dies auf Basis der Gesteinskörnung nach Liefertyp 1, d.h. unter Verwendung von gebrochenem Altbeton. Durch ein weiteres eher auf Forschung ausgelegtes Vorhaben gelang es zudem, einen aus ökonomischer wie ökologischer Sicht wichtigen Schritt weiter zu gehen, um bei der Herstellung von Transportbeton auf die Lieferkörnung Typ 2 zurückzugreifen. Damit verbunden war die Entwicklung und Erprobung einer Strategie zur Aufbereitung des Bauschutts und zur Herstellung dieser definierten Mischung. Zugleich mussten auch erstmals entsprechende Betonrezepturen entwickelt und auf ihre Eignung hin untersucht werden. Die daraus gewonnenen Erkenntnisse wurden zusammen mit einigen Bauvorhaben zu R-Beton im Rahmen des ersten Fachsymposiums im Jahre 2014 vorgestellt.

An dieses Grundkonzept wurde auch für das zweite Fachsymposium im März 2015 angeknüpft. Kern des Fachsymposiums sollte die Präsentation der Ergebnisse und Erkenntnisse aus dem laufenden Vorhaben des Umweltministeriums sein. Über externe Vorträge wurden jedoch auch Themen aufgegriffen, die zu diesem Zeitpunkt stark diskutiert und andernorts schon aufgegriffen wurden.

Für das Fachsymposium wurde folgendes inhaltliches Konzept gewählt:

**Themenkreis 1:** Mineralische Bauabfälle als sekundäre Rohstoffe – Nachhaltigkeit und Ressourcenschutz im Bausektor

Mit diesem Themenkreis 1 sollte die Bedeutung des Themas Ressourcenschutz im Bausektor aufgezeigt werden sowie die Notwendigkeit, mineralische Bauabfälle als sekundäre Rohstoffe zu verstehen und möglichst vollständig und gemäß ihrer Eigenschaften hochwertig zu nutzen. Hierzu wurden in der Vergangenheit im Raum Zürich grundlegende Arbeiten gemacht. So wurden die im Baukörper vorhandenen Massen (Stadt als Rohstofflagerstätte) erhoben, das zukünftige Aufkommen an mineralischen Bauabfällen sowie die zukünftige Nachfrage nach Baustoffen prognostiziert.

In einem Vortrag durch Herrn Dr. Rubli, der diese Untersuchung verantwortlich durchgeführt hat, wurden darauf aufbauend auch die entsprechende Strategie „Kies für Generationen“ dargestellt und die Rolle des R-Betons darin.

Dieser Vortrag wurde ergänzt durch einen Vortrag des Geschäftsführers des regional bedeutenden Baukonzerns Wolff & Müller, der die Bedeutung der Nachhaltigkeit der Bauwirtschaft aus seiner Sicht beleuchten konnte.



### **Themenkreis 2:** Erfahrungen im Einsatz von ressourcenschonendem Beton

Im Rahmen dieses Themenkreises wurden vor allem die Bauvorhaben vorgestellt, die durch das Projekt des Umweltministeriums angestoßen wurden und die auf den unter Verwendung der Gesteinskörnung Liefertyp 2 hergestellten R-Beton zurückgegriffen haben oder zurückgreifen werden. Die Präsentation erfolgte jeweils zweigeteilt. So wurde zum einen durch den Bauherren das eigentliche Bauvorhaben vorgestellt, durch den jeweiligen Betonlieferanten die dazugehörigen Betonrezepturen und die Ergebnisse aus den Eignungsprüfungen. Mit diesen Vorträgen und Stellungnahmen aus der Baupraxis wurde nochmals eindrücklich unterstrichen, welchen Stellenwert dieser Baustoff gerade in Baden-Württemberg mittlerweile auf dem Markt gefunden hat.

Welche weiteren Schritte notwendig werden und welche Rahmenbedingungen notwendig sind, wurde durch den Vortrag von Herrn Eberhard thematisiert, einem Pionier zum Thema R-Beton aus der Schweiz. Herr Eberhard war als Referent in seiner Funktion als Leiter der Fachgruppe Technik des Baustoffverbandes gebeten einen Überblick über die in der Schweiz vorhandenen Lieferwerke von R-Beton zu geben. Zum anderen wurde dargelegt, wie sich dieser Erfolg begründen lässt, welcher Bedeutung die öffentliche Hand in ihrer Vorbildfunktion zukommt und wie wichtig die Aufnahme von R-Beton in die Zertifizierung nach Minergie-Eco hatte.

### **Themenkreis 3:** Aufbereitung von Bauschutt zu einer Gesteinskörnung für die Betonindustrie

Auch in diesem Themenkreis stand zunächst ein Erfahrungsbericht der Bauschuttreycler im Vordergrund, die im Rahmen des Vorhabens des Umweltministeriums ihre Praxiserfahrungen darstellten. Die beiden Firmen Fa. Feess und Fa. Scherer + Kohl verfolgen dabei unterschiedliche Strategien. Während in einem Fall eine getrennte Aufbereitung von Mauerwerk und Altbeton erfolgt und eine abschließende Mischung in den Mengenverhältnissen des Liefertyp 2 über den Einsatz von Radladern, wird im anderen Fall diese Gesteinskörnung aus der Produktion von Straßenbaustoffen heraus erzeugt. Die Mischung erfolgt über die Ausgangsmaterialien und damit vor dem Brecher. In Frostschutz- oder Schottertragschichten können ebenfalls bis maximal 30 % Mauerwerksanteile enthalten sein.

Mit der Fa. OTT ist ein weiteres Unternehmen in das Vorhaben des Umweltministeriums eingebunden, das wesentlich kleinere Jahresdurchsätze aufweist und zudem noch über keine Praxiserfahrungen aus der Herstellung dieser Gesteinskörnung berichten konnte. Gerade in diesem Fall war es interessant zu erfahren, wie die schrittweise Umstellung des Aufbereitungs- und Produktionsprozesses erfolgen soll und aus welcher Motivation heraus.

Der Einsatz dieser RC- Gesteinskörnung ist vor allem dann wirtschaftlich interessant, wenn diese Produktionsstätten deutlich näher an den Betonwerken liegen als die Steinbrüche und Gruben für Primärgestein. In Kombination mit geringeren Transportkosten ergeben sich für dieses Produkt ökonomische Vorteile. Die Nähe zur Baustoffnachfrage ist grundsätzlich der spezifische Vorteil für diesen Rohstoff. Durch die Verlagerung der Bautätigkeit in den Siedlungsbestand fallen hier im Vorgriff auf Neubauvorhaben immer zunächst Bauschuttmassen zur Entsorgung an. Dieser Vorteil könnte demnach dann deutlich genutzt werden, wenn es gelänge, die Gesteinskörnung in der geforderten Qualität schon auf der Abbruchbaustelle herzustellen. Dass dies in Kombination mit einem entsprechend selektiv gestalteten Rückbau möglich ist, konnte im Rahmen des Vorhabens gezeigt werden.

Ein zentrales Moment, das derzeit einer Produktion einer RC-Gesteinskörnung für die Betonindustrie entgegensteht, ist die derzeitige Rechtslage. Hier ist für die Bewertung der umwelttechnischen Eignung der Gesteinskörnung eine Regelungslücke entstanden, die in der Praxis dazu führt, dass Recyclingwerke als Produzenten einer Gesteinskörnung nach DIN EN 12620 derzeit beim Deutschen Institut für Bautechnik in Berlin eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beantragen müssen. Dies ist ein vergleichsweise aufwendiges und teures Verfahren. Diese wird für einen Zeitraum von 5 Jahren erteilt und erlaubt dann die unbeschränkte Belieferung der Betonwerke. Besteht diese Zulassung nicht, muss für eine Zustimmung im Einzelfall beantragt werden und zwar für jedes Vorhaben gesondert. Dieses Verfahren im Detail darzulegen und die Planungen zur Schließung der Regelungslücke (Stand 2014/Anfang 2015) aufzuzeigen, Gegenstand eines Vortrages des DIBt.

#### **Themenkreis 4:** Blick in die Zukunft – Entwicklungen und Strategien

Mit diesem Themenkreis sollte ein Blick in die Zukunft gewagt und die Stränge aufgezeigt werden, die zur Optimierung der Kreislaufwirtschaft Bau aufgegriffen werden müssen.

Das Bauschutttaufkommen und vor allem seine Zusammensetzung werden sich durch die verbreitete Nutzung von Verbund- und Leichtbaustoffen in Zukunft ändern. Das Institut IAB aus Weimar widmet sich der Frage, wie die Aufbereitungstechnik auf diese neue Aufgabenstellung angepasst werden muss. Die Strategie liegt in der selektiven Zerkleinerung mittels bspw. Attritionstrommeln und einer Selektion der störenden Bestandteile im Produktmassenstrom durch Technologien wie NIR, die sich bereits in anderen abfallwirtschaftlichen Bereichen bewährt haben.

Schon heute stellen die Feinmaterialien ein größeres Entsorgungsproblem dar. Dies gilt für die bei der Aufbereitung anfallenden Brechsande, vor allem jedoch für das Vorsiebmaterial und die zur Entsorgung anstehenden "Böden". Die Fa. Feess hat hierauf eine Strategie gefunden und wird eine nassmechanische Technik in ihre Aufbereitungsstrategie einbinden. Die in Kirchheim/Teck errichtete Anlage dient zunächst der Demonstration und wird im Probetrieb schrittweise auf die spezifische Aufgabenstellung hin weiterentwickelt und technisch optimiert werden. Trotzdem liegen bereits erste und sehr ermutigende Ergebnisse aus der Aufbereitung von Bauschutt und Böden vor.

Eine weitere Lösungsstrategie kann auch darin bestehen, über die derzeit geltenden Regelwerke hinaus RC-Materialien in Betonrezepturen einzusetzen. Dies wäre dann vor allem interessant, wenn hier genau diese Materialien eingesetzt werden könnten, die sich für einen ungebundenen Einsatz weniger eignen bzw. auf dem Markt bislang nur eingeschränkt Akzeptanz finden. So wäre bspw. ein verstärkter Einsatz von "rotem" Material hilfreich. Durch die Fa. Krieger wurden entsprechende Betonrezepturen für ein konkretes Bauvorhaben in Winnenden (BV Waagenhaus der Fa. Schief) entwickelt. Da dabei die geltenden Regelwerke für Beton verlassen wurden, musste hierfür bei der obersten Baubehörde des Landes eine ZiE beantragt werden. Darüber hinaus wurden auch Rezepturen entwickelt, bei denen die Sande in Anteilen durch Brechsande aus der Aufbereitung von Altbeton substituiert wurden.

#### **Unterstützung in der Bewerbung der Veranstaltung**

Während die inhaltliche Gestaltung der Symposien vertragsgemäß von ifeu wahrgenommen wurde, erfolgte die Organisation der Veranstaltung durch die Umweltakademie und damit auch das Layout und der Druck des Programms und dessen Versand. Seitens des ifeu-Institutes erfolgte für die Bewerbung der Veranstaltung folgende Unterstützung:

Für das Programm sowie die Einladungsschreiben wurden die Texte verfasst. Zudem wurden die Fachzeitschriften sowie Veranstaltungskalender mit den entsprechenden Kontaktdaten zusammengestellt.

Darüber hinaus wurden im Vorfeld der Veranstaltungen in Fachzeitschriften aus den Branchen Abbruch und Recycling, Betonherstellung und der Wohnungswirtschaft größere Fachartikel platziert, über die unter anderem auch für dieses Fachsymposium geworben wurde.

Zudem wurden Pressemitteilungen geschrieben und hier nicht nur in der Bewerbung der Veranstaltung, sondern auch zur Bewerbung der Baustellentermine, die während der Rohbauphasen der Bauvorhaben durchgeführt wurden.

## 9 Exkursion in die Schweiz (2015)

---

Das Fachsymposium im März 2015 wurde um eine Exkursion in den Großraum Zürich ergänzt. Ausgehend von der Stadt Zürich ist der ressourcenschonende Baustoff R-Beton mittlerweile in fast allen Kantonen auf dem Markt angekommen. Seit über 10 Jahren werden alle Bauvorhaben der Stadt Zürich gezielt mit R-Beton ausgeschrieben und gebaut. Entsprechend groß sind hier die Erfahrungen, entsprechend zahlreich die Bauvorhaben.

Es bot sich daher an, den mit dem Fachsymposium intendierten Austausch über die mittlerweile in Baden-Württemberg erreichten Erfolge mit einer Exkursion in den Raum Zürich zu verbinden. Damit war die Möglichkeit verbunden, im Austausch mit zentralen Akteuren auf Seiten der Baustoffherstellung als auch auf Seiten der Bauherren in Verbindung mit der Besichtigung von Praxisbeispielen von den dortigen Erfahrungen zu profitieren.

Die mit dem Forschungsprojekt verbundene Zielsetzung und damit auch der thematische Schwerpunkt des Fachsymposiums war die Verwendung einer Gesteinskörnung Liefertyp 2 und damit der Einsatz nicht nur von Gesteinskörnungen aus Altbeton sondern in Anteilen auch aus gebrochenem Mauerwerk. Auch dieser Verwendung von „Mischabbruchgranulat“ ist im Raum Zürich schon seit längerem Praxis. Dies wurde für die Exkursion auch in der Auswahl der Praxisbeispiele berücksichtigt.

Die inhaltliche Planung und die Einbindung der Experten vor Ort erfolgten aus dem Projekt heraus. Die faktische Organisation der Exkursion lag in den Händen der Akademie für Natur und Umweltschutz (Umweltakademie) des Landes.

### 9.1 Besuch der Richi AG

Die Richi AG ([http://www.richi-weiningen.ch/default.asp?V\\_SITE\\_ID=5](http://www.richi-weiningen.ch/default.asp?V_SITE_ID=5)) stellt auch für Schweizer Verhältnisse einen Vorzeigebetrieb dar. An dem Beispiel dieser Firma wird deutlich, wie sich ausgehend von den Nachfrageimpulsen der Stadt Zürich und den ersten Erfahrungen auf Seiten der Baustoffhersteller (Fa. Eberhard, Oberglatt) sich die Baustoffhersteller auf diese neuen Anforderungen des Marktes ausgerichtet haben. Die Richi AG ist zudem in Verbindung mit weiteren Aktivitäten ein beispielgebender integrierter Betrieb.

Der Betrieb hat sich aus einem landwirtschaftlichen Betrieb im Großraum Zürich heraus entwickelt, der auf seinen Flächen sukzessive auf die Kiesgewinnung und die eigene Belieferung des Züricher Marktes umgestellt hat. Angesichts begrenzter Kiesreserven erfolgte mit der Zeit eine Erweiterung des Betriebes um eine Aufbereitung mineralischer Bauabfälle. Zudem wurde als weiterer Schritt in der Baustoffproduktion am Standort auch ein eigenes Betonwerk errichtet. Die Firma hat zudem ein weiteres Geschäftsfeld im Abbruch / Rückbau von Gebäuden.

Hier fallen nicht nur mineralische Bauabfälle zur Entsorgung an, sondern auch weitere Bauabfälle und hierunter auch Holz. Während die mineralischen Bauabfälle in die eigene

Baustoffproduktion eingebunden sind, werden Althölzer in einem eigenen auf dem Standort befindlichen Biomassekraftwerk genutzt. Die hier als Nebenprodukt anfallende Wärme kann in einem kleineren Umfang in der Baustoffproduktion genutzt werden. Die Abwärme soll zukünftig jedoch vollständig durch Gewächshäuser genutzt werden, die auf den ehemaligen Kiesabbauflächen errichtet werden sollen. Die Richi AG greift damit ihre landwirtschaftlichen Wurzeln in der Firmengeschichte wieder auf.

Die Aufbereitung von Bauschutt / mineralischen Bauabfällen erfolgt in Deutschland in der Regel ausschließlich über trockene Aufbereitungserfahren. Eine nassmechanische Aufbereitung wird kaum und in der Regel nur für bestimmte Teilmassenströme wie die Behandlung von Böden aus Altlasten oder die Wäsche von Gleisschotter praktiziert. Die Fa. Feess aus Kirchheim/Teck, ein ebenfalls sehr ambitioniertes Unternehmen aus dem Stuttgarter Raum, hat mittlerweile eine nassmechanische Aufbereitung mit einer Schwertwäsche mit dem Ziel in Betrieb genommen, diese gezielt zur Aufbereitung der Teilfraktionen einzusetzen, die sich nur in dieser Weise klassieren oder von einer höheren Belastung an Schadstoffen befreien lassen.

Bei der Richi AG wird ein erheblicher Anteil des Bauschutts nassmechanisch aufbereitet und in die Betonproduktion eingebracht. Dies gilt sowohl für Betongranulat als auch für Mischabbruchgranulat. Am Standort in Weiningen werden ausschließlich R-Betone hergestellt und dies in dem gesamten Spektrum von einfachen Sorten wie bspw. Magerbetonen bis hin zu Konstruktionsbetonen und hier auch WU-Betone oder Betone mit anspruchsvollen Expositionsklassen. Wie man auch an den eigenen Gebäuden, Hallen, Funktionsbauten und Verwaltungsgebäude sehen kann, erfolgt dies auch in durchaus ambitionierten Einsatzbereichen wie bspw. Decken mit großer Spannweite.

Das Verwaltungsgebäude der Richi AG (das "Richi-Haus") ist vollständig aus R-Beton hergestellt, der in der Gesteinskörnung zu 75 % auf Mischabbruchgranulat zurückgreift. Verarbeitet wurden 2.400 m<sup>3</sup> R-Beton. Fertigstellung war im Jahr 2010.

Eine wesentliche Voraussetzung für die erfolgreiche Einführung von R-Beton auf dem Markt ist nach Aussage von Herrn Richi die Kombination aus einem Ablagerungsverbot für verwertbare Abfälle und der Besteuerung des Schwerlastverkehrs, die in Abhängigkeit der Transportentfernung erfolgt und unabhängig von der Kategorie der befahrenen Straße. In Folge dessen hat sich gerade für mineralische Baustoffe ein immer sehr lokaler Markt herausgebildet und damit der spezifische auch ökonomische Vorteil, in Nachbarschaft zu Ballungsräumen wie Zürich auf mineralische Bauabfälle als sekundäre Rohstoffe zurückzugreifen.



Abbildung 9.1: Konstruktion einer Werkshalle aus R-Beton mit großen Spannweiten und Absicherung mittels Stütze (ebenfalls aus R-Beton)



Abbildung 9.2: RC-Gesteinskörnung „M“ (Mischabbruchgranulat) in 0/16mm



Abbildung 9.3: Bauschutt / Mischabbruch



Abbildung 9.4: Bodenbearbeitung / Abtrennung einer Körnung durch eine Separatorschaufel

## 9.2 Programmpunkt: Bauwerke aus R-Beton

Die Stadt Zürich ist quasi der Leuchtturm für den Einsatz von R-Beton. Es dürften nirgends so viele Gebäude aus R-Beton (oder Recyclingbeton nach der Schweizer Bezeichnung) errichtet worden sein, wie in Zürich. Dies gilt auch für den Einsatz von Mischabbruchgranulat in den Betonrezepturen, d.h. einer Gesteinskörnung, die in erheblichem Anteil aus gebrochenem Mauerwerk besteht, und auch dies schon seit längerer Zeit und in größerem Umfang.

Die Stadt Zürich hat einen Impuls aus Deutschland aufgegriffen, der in den 90er Jahren unter Beteiligung einer Vielzahl von renommierten Hochschulen gesetzt wurde. Zu nennen sind hier Prof. Reinhardt, Universität Stuttgart, Teilnehmer am Fachsymposium oder Herr Prof. Schnell, heute TU Kaiserslautern, der das Fachsymposium moderiert hat und damals an verantwortlicher Stelle beim Baukonzern Fa. Philipp Holzmann beschäftigt war. Der Baukonzern hat im Rahmen dieses Forschungsprojektes das erste Gebäude aus Recyclingbeton errichtet – die Waldspirale in Darmstadt als letztes Projekt des Architekten Hundertwasser.

Das Beispiel der Waldspirale aufgreifend hat das Amt für Hochbauten der Stadt Zürich beschlossen, zukünftig bei allen eigenen Bauvorhaben gezielt Recyclingbeton auszuschreiben und dies auch in der Praxis entsprechend so umgesetzt. Seit etwa knapp 15 Jahren sind in Zürich zahlreiche Gebäude der Stadt aus R-Beton entstanden, wie bspw. Schulen, Kindergärten, Verwaltungsgebäude oder auch Projekte des sozialen Wohnungsbaus. Die ersten Bauvorhaben wurden durch die EMPA der ETH Zürich in großem Umfang wissenschaftlich (Betonforschung) begleitet. Pionier unter den Baustofflieferanten war die Fa. Eberhard aus Oberglatt. Heute ist R-Beton (Recyclingbeton) auf dem Schweizer Markt angekommen. Auf Seite der Stadt Zürich spielte Herr Hofmann als damaliger Leiter Technik des Amtes für Hochbauten der Stadt eine wichtige Rolle und war eine der zentralen Figuren in dieser Erfolgsgeschichte.

Herr Hofmann wurde für die Leitung der Exkursion vor Ort und Vorstellung der Praxisbeispiele verpflichtet. Folgende Bauprojekte wurden für die Exkursion ausgewählt:

#### **Wohnsiedlung Werdwies, Zürich-Altstellen**

Es handelt sich um ein preisgekröntes Beispiel für gemeinnützigen Wohnungsbau mit gelungener sozialer Durchmischung. Errichtet wurden 7 Wohnhäuser in jeweils 8 Vollgeschossen mit 152 Wohneinheiten. Bausumme 71 Mio. CHF. Fertigstellung 2006

In diesen Gebäuden wurde erstmals R-Beton als Konstruktionsbeton in tragenden Wänden des 5. bis 7. Geschosses eingesetzt, der in erheblichem Umfang auf Mischabbruchgranulat als Gesteinskörnung zurückgreift. Auch die übrigen Konstruktionsbetone wurden als R-Beton geliefert. Der Anteil an R-Beton liegt bei 75 %.

#### **Wohnsiedlung Brunnenhof, Zürich Nord**

Die Wohnsiedlung Brunnenhof ist ein Wohnungsbau der städtischen Stiftung Wohnungen für kinderreiche Familien, das auch architektonisch sehr gelungen ist. Die besondere Ausstrahlung der neuen Wohnsiedlung beruht nicht zuletzt auf ihrer raffinierten und vielschichtigen Fassadengestaltung, die von der Schichtung umlaufender Geschossplatten und von farbigem Glas bestimmt wird. Das Gebäude ist nach Minergie-Eco zertifiziert.

Errichtet wurden in R-Beton 72 Wohneinheiten mit Gemeinschaftsraum, Kindergarten und Hort. Fertigstellung 2007, Bausumme 60 Mio. CHF. Der Anteil R-Beton beträgt 90 %.

#### **Schulanlage Im Birch**

Es handelt sich um eine Schulanlage mit 36 Klassenzimmern, 4 Kindergärten und einer 3-fach Turnhalle, Bausumme 65 Mio. CHF, bezogen im Jahr 2004

Fast die gesamten Ort betonbauteile (85 %) wurden aus R-Beton hergestellt. Besonders bemerkenswert sind die Innenräume mit großen Flächen aus Sichtbeton, die Errichtung



des Untergeschosses als Weiße Wanne, die Konstruktion mit sehr schlanken Bauteilen sowie die Verwendung von vorgespanntem Beton zur Überwindung von 36 m Spannweite in der Turnhalle. Diese Unterzüge wurden vor Ort ebenfalls aus R-Beton hergestellt.

# 10 Fachsymposium R-Beton (2016)

---

## Veranstaltungsprogramm

Das Fachsymposium wurde inhaltlich konzipiert, die Themenblöcke entwickelt und hierzu geeignete Referatsthemen herausgearbeitet und Referenten gewonnen. Die Veranstaltung hatte folgende Ausrichtung: „Optimierung der Ressourceneffizienz in der Bauwirtschaft: R-Beton hilft Stoffkreisläufe schließen“.

Die Einführung in die Veranstaltung erfolgte durch Herrn Minister Untersteller, ergänzt um einen Vortrag von Frau Lemaitre von der Deutschen Gesellschaft für nachhaltiges Bauen. Leider spielt die Verwendung von RC-Baustoffen in der Nachhaltigkeitsbewertung der DGNB keine (relevante) Rolle. Frau Lemaitre sprach in ihrem Vortrag aber einen weiteren für die Optimierung der Kreislaufwirtschaft wichtigen Punkt an - die recyclingorientierte Konstruktion von Gebäuden bzw. die Verwendung von recyclinggerechten Baustoffen. Der immer umfassendere Einsatz von Verbundbaustoffen wird die Kreislaufwirtschaft in Zukunft vor sehr große Probleme stellen. Die im Bau gewählten Verbundkonstruktionen werden einen selektiven Rückbau sehr erschweren.

Der Vortrag von Hr. Dr. Haase "Innovative Ansätze für ressourceneffiziente Gebäude" stellt einige Arbeiten und Forschungsansätze des ILEK der Universität Stuttgart dar. Als keynote speech wurde das ganze Spektrum an Handlungsansätzen in der Gebäudekonstruktion und in der Baumaterialauswahl aufgezeigt, in dem sich auch R-Beton einordnen lässt.

Themenkreis 1 widmete sich dem Einsatz des R-Beton, d.h. in der Schilderung der derzeitigen Situation. In einem ersten Vortrag wird ein Überblick über die in den letzten Jahren im Auftrag des Umweltministeriums durchgeführten Projekte zum Thema R-Beton gegeben, zum einen in der Weiterentwicklung und Erprobung der Produktion der RC-Gesteinskörnungen als auch der R-Betone selbst. Vor allem handelte es sich aber um die Initiierung und Begleitung konkreter Bauvorhaben, mit denen der Baustoff R-Beton in Baden-Württemberg bekannt gemacht und im Markt eingeführt werden sollte.

Dies ist im Ansatz auch gut gelungen und dies gerade im Raum Stuttgart. Durch die Erfahrungen und Erfolge in Baden-Württemberg ermuntert, ist R-Beton auch schon in einem ersten Bauvorhaben in Berlin im Hochschulbau eingesetzt worden und soll zukünftig in allen Bauvorhaben des Landes Berlin standardmäßig verwendet werden. Weitere Initiativen gibt es in Thüringen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz sowie auch in Bayern.

Die bisherigen Pilotprojekte zu R-Beton wurden in der Regel in Zusammenarbeit mit kommunalen oder genossenschaftlichen Wohnungsgesellschaften durchgeführt. Mit dem Bauvorhaben in Vaihingen zeigt das Land, dass es diese Innovation auch für eigene Bauvorhaben aufnimmt. PEGASUS in Vaihingen ist das dritte Bauvorhaben des Landes mit R-Beton. Das erste war ein Verwaltungsgebäude auf der ehemaligen Sonderabfalldeponie in Malsch, das zweite Gebäude ist ein Serverhaus in der Universität Tübingen.

Die Produktion und der Einsatz von R-Beton wird derzeit deutlich durch eine Lücke im Regelwerk gehemmt. Die Produktion der Gesteinskörnung erfolgte in der Vergangenheit nach der DIN 4226-100. Dieses Regelwerk ist in die DIN EN 12620 überführt worden, die

jedoch keine Regelungen zur Prüfung der Umweltverträglichkeit der Gesteinskörnung beinhaltet. Dies hat zur Folge, dass die Bauschuttreycler beim DIBt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Herstellung einer RC-Gesteinskörnung für die Betonindustrie beantragen müssen und zwar nur für die Frage der umwelttechnischen Eignung der Gesteinskörnung. Dies ist für die Hersteller mit einigen Kosten und Aufwand verbunden (das Verfahren langatmig). Wie dem Vortrag des DIBt entnommen werden konnte, soll diese Regelungslücke möglichst schnell geschlossen werden.

In den Niederlanden sind die Produktion und Einsatz von R-Beton weit verbreitet. Durch die Kombination von festen Vorgaben hinsichtlich des Recyclinganteils bei der Betonherstellung und vergleichsweise großen Freiheiten bei der Betonzusammensetzung haben die Niederlande R-Beton auf dem Markt etablieren können. (Wieder ein Fingerzeig, dass unser Regelwerk dringend überarbeitet werden muss - siehe Themenkreis 2). An dieser Stelle soll jedoch über einen Vortrag gezeigt werden, wie man auch aus anderen Abfallmassenströmen (teerhaltiger Straßenaufbruch) hochwertige Gesteinskörnungen gewinnen kann, die man bspw. auch in der Betonproduktion (aber auch in Asphaltwerken) einsetzen kann.

Mit Themenkreis 2 sollte für den R-Beton ein erster Ausblick auf weitere Entwicklungen gegeben werden. Durch Herrn Hinz (Büro Werner Sobek Stuttgart GmbH) wurde die Tragwerksplanung bei einem Bauvorhaben des Kreises Ludwigsburg durchgeführt. Bei diesem Erweiterungsbau für die Kreisverwaltung (mit dem Rohbau wurde vor Kurzem begonnen) wird R-Beton eingesetzt. Das Bauvorhaben sticht aus der Vielzahl der R-Beton-Bauvorhaben dadurch heraus, dass der R-Beton hier auch in Bereichen eingesetzt wird, die über die Standardanwendungen hinausgehen und gezielte Berechnungen bspw. des E-Moduls erforderten. Zudem wurde auch erstmalig Fertigbetonteile mit R-Beton hergestellt.

Das Krieger Betontechnologiezentrum hat das Thema R-Beton über die letzten Jahre wesentlich begleitet und vorangebracht. Das Betonwerk in Waiblingen (TBW) war das erste Betonwerk im Stuttgarter Raum, in dem R-Beton für die ersten Pilotvorhaben produziert wurde und das R-Beton in ihr Portfolio aufgenommen hat. Die Entwicklung der Rezepturen etc. erfolgte im Betontechnologiezentrum in Remseck. Im Betontechnologie-Zentrum wurden auch erstmals Rezepturen entwickelt und erprobt, die auf eine RC-Gesteinskörnung Typ 2 zurückgreifen, d.h. eine Mischung aus Altbeton und Altmauerwerk im Verhältnis 70/30. Von Krieger wurden auch die ersten Pilotbauvorhaben mit diesem R-Beton (Typ 2) beliefert.

Zuletzt wurden Rezepturen für R-Beton entwickelt und erprobt, die weit über die Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton hinausgehen. So wurde in einigen Rezepturen der gesamte Zuschlag > 2 mm über RC-Gesteinskörnung abgedeckt. Die Ergebnisse hierzu konnten bereits im letzten Fachsymposium vorgestellt werden. Mittlerweile sind auch die Versuche abgeschlossen, in denen unterschiedliche RC-Brechsande (< 2 mm) in Betonrezepturen erprobt wurden, die jetzt vorgestellt werden können. Die Ergebnisse sind ein deutlicher Fingerzeig, dass in diesem Feld weitere Forschungen wichtig sind mit dem Ziel, das derzeit geltende Regelwerk deutlich umfassender einer RC-Gesteinskörnung zu öffnen.

Durch Frau Professor Stürmer von der Hochschule Konstanz wird ein neues Forschungsprojekt vorgestellt. Wenn R-Beton auf dem Markt eine Zukunft hat, dann nur, wenn eine Gesteinskörnung Typ 2 d.h. mit Anteilen an Mauerwerk eingesetzt wird. Die Hochschule Konstanz und IAB (sowie das ifeu-Institut Heidelberg) haben mit einem von der DBU geförderten Forschungsvorhaben begonnen, das die Herstellung dieser Gesteinskörnung und dessen Qualitätskontrolle sowie die Herstellung und Qualitätskontrolle der Betone weiterentwickeln soll. Hierzu gehört auch die Analyse und Bewertung von Bauteilen aus R-

Betonen, die schon ein paar Jahre auf dem Buckel haben. Hierzu werden die Betonblöcke herangezogen, die von der Fa. Feess (Exkursionsziel) seit einigen Jahren hergestellt werden und zwar mit einer Rezeptur, bei der der Zuschlag inkl. Sand zu 100 % aus Recyclingmaterial besteht.

Im Themenkreis 3 galt es, weitere Neuentwicklungen und innovative Ansätze rund um den ressourcenschonenden Beton vorzustellen. R-Beton ist nur ein (kleiner) Baustein zur Optimierung der Ressourceneffizienz im Bau. Gerade beim Baustoff Beton, dessen Herstellung mit hohen Umweltlasten verbunden ist, sind weitere Optimierungen notwendig. Zwei Ansätze wurden mehr oder minder exemplarisch durch zwei Vorträge vorgestellt: eine umweltfreundlichere Produktion des Zementes und eine Minderung des spezifischen Betoneinsatzes. Der Ansatz der Textilbewehrung wird dabei aus Abfallsicht aber durchaus kritisch gesehen. Bisher ist nicht klar, wie dieser Altbeton später recycelt werden kann, da sich die Bewehrung nicht wie beim Stahl einfach abtrennen lässt. Zwei weitere gute Beispiele aus Baden-Württemberg und Ansätze aus der konkreten Baupraxis zur Optimierung der Ressourceneffizienz von Beton.

### **Fachexkursion im Raum Stuttgart**

Die Fachexkursion wurde ebenfalls im Rahmen des Projektes geplant und organisiert. In Anbetracht des Wintereinbruchs und des verzögerten Baufortschritts im Bauvorhaben Kreishaus Ludwigsburg musste das Programm immer wieder angepasst werden. Die letzte Anpassung erfolgte am Veranstaltungstag selbst, in dem das zwischenzeitlich im Rohbau fertiggestellte Bauvorhaben Am Klingenbach des BWV Bau- und Wohnungsvereins als Programmpunkt aufgenommen wurde.

Das Bauvorhaben PEGASUS ist eine Gebäudeerweiterung zur Errichtung von 488 m<sup>2</sup> Labortrakt sowie 232 m<sup>2</sup> Bürotrakt. Diese Flächen sind auf 3 Geschosse (OG, EG, UG tlw. überdeckt) verteilt. Das Gebäude hat einen BRI von 7.345 m<sup>3</sup>. Nach Auskunft des Bauherren werden für das PEGASUS-Vorhaben etwa 180 m<sup>3</sup> R-Beton für Wandbauteile und 510 m<sup>3</sup> R-Beton für Deckenbauteile eingesetzt, wobei das UG in Normalbeton ausgeführt wurde. Betonlieferant ist TBW Transportbeton Waiblingen (Krieger-Gruppe), die Gesteinskörnung wurde von Fa. Feess aus Kirchheim/Teck geliefert (abZ liegt vor).

Im Bauvorhaben Am Klingenbach des Bau- und Wohnungsvereins (BWV) wurde in einem Bauvorhaben in Stuttgart erstmals mit RC-Gesteinskörnung nach Typ 2 gearbeitet. Entgegen der ursprünglichen Planung handelt es sich um ein reines Wohngebäude. Sämtlicher Transportbeton in diesem Gebäude wird als R-Beton geliefert. Es handelt sich um einen C 25/30 in den für innenliegende Gebäudeteile typischen Expositionsklassen. Die aufgehenden Wände wurden in der Regel gemauert. Bei den Decken handelt es sich um Filigrandecken, die mit R-Beton als Aufbeton ergänzt werden. Die Betonlieferung erfolgte durch die Fa. Godel. Die Gesteinskörnung wurde von Fa. Feess aus Kirchheim/Teck geliefert (abZ liegt vor).

Die Fa. Feess ist neben einem Containerdienst sowohl im Abbruch, im Erdbau als auch im Bauschuttrecycling tätig. Der Standort Rabailen in Kirchheim/Teck ist einer von zwei Recyclingstandorten und mit Abstand der wichtigste. Der Standort Rabailen hat sich in den letzten wenigen Jahren stark entwickelt und ist ein zum Leuchtturm der Recyclingindustrie geworden. Dies hat viele Gründe:

- Zum einen handelt es sich bundesweit um den ersten Standort, der die Herstellung einer Gesteinskörnung Typ 2 in sein Portfolio aufgenommen hat. Die entsprechende

Aufbereitungsstrategie wurde im Rahmen eines Projektes des Umweltministeriums hier entwickelt und seitdem immer weiter verfeinert.

- Dieses wie auch die gütegesicherten Produkte für den Straßenbau (bspw. FSS nach TL SoB-StB) überzeugen durch ihre auch augenfällige Qualität. Sie erfüllen nicht nur die entsprechenden technischen Anforderungen, sondern sind nahezu frei an organischen und mineralischen Stör- und Fremdstoffen und dies mit einem vergleichsweise einfachen und überschaubaren Maschinenpark.
- Dies ist nur deshalb möglich, weil die mineralischen Bauabfälle als Rohstoff für RC-Baustoffe beste Qualität aufweisen bzw. im Input unterschiedlichen Ausgangsmaterialien unterschiedlichster Qualität strikt getrennt gehalten und separat aufbereitet werden. So gelingt es, RC-Baustoffe als Gemische mit im Ansatz definierter Zusammensetzung und Eigenschaft herzustellen.
- Am Standort befindet sich zudem seit einigen Monaten eine Nassklassierung im Betrieb. Mit dieser Aufbereitungstechnik ist es möglich, heterogene und tendenziell belastete Boden/Bauschuttgemische zu einer Vielzahl homogener Stoffströme zu verarbeiten, die die Möglichkeit einer hochwertigen Rückführung in die Baustoffindustrie versprechen. Durch den Waschvorgang scheinen die Produkte einem Kieswerk zu entspringen.
- Der Standort entwickelt sich immer mehr zum Ideal einer integrierten Aufbereitung. Ausgehend von den stofflichen wertgebenden Eigenschaften werden die unterschiedlichsten Materialien zu den unterschiedlichsten Produkten verarbeitet, immer mit dem Ziel einer möglichst hohen Wertschöpfung und dies sowohl ökonomisch als auch ökologisch und aus Sicht der Ressourcenschonung.

Die Fa. Schief Entsorgung ist ein großes Abfallentsorgungsunternehmen aus der Region, das vor allem im Bereich Sortierung von Altpapier sowie weiteren Wertstoffen tätig ist. Ein weiterer wichtiger Standort ist der Containerdienst. Darauf aufbauend ist die Fa. Schief in gewissem Umfang auch in der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle tätig. Der Standort wird derzeit grundlegend modernisiert und umgebaut. Im Rahmen dieser Bauvorhaben wurde auch der Eingangsbereich erneuert und hier ein entsprechendes Waagenhaus errichtet.

Das neue Waagenhaus der Fa. Schief Entsorgung wurde nicht nur aus R-Beton errichtet. Mit dem Gebäude wurden im Betonlabor in Remseck entwickelte Rezepturen für Betonorten außerhalb des Regelwerkes in die Baupraxis umgesetzt. Leider war der Baufortschritt schneller als die im Rahmen eines ZiE benötigte Expertenbegutachtung. Die für die Stützmauer entwickelten Rezepturen konnten so nicht mehr eingesetzt werden. Es verblieb das Gebäude selbst, das mit einem R-Beton errichtet wurde, bei dem der gesamte Gesteinszuschlag > 2 mm aus RC-Material bestand.

# 11 Analyseprogramm

---

Das Analyseprogramm erfolgte in Zusammenarbeit mit dem Institut Dr. Haag aus Kornwestheim als Projektpartner. Durch dieses Büro erfolgte die Probenahme vor Ort, die Analyse und Auswertung in deren Verantwortung. Die Durchführung der chemischen Analysen wurde im Unterauftrag vergeben.

## Aufgabenstellung / Vorgehen

Gemäß der Ausschreibung sind die Stoffströme von der Quelle bis zum Einsatz im Frischbeton in solcher Weise chemisch-physikalisch zu untersuchen, dass aussagefähige Daten zum Verbleib von Stoffen und zur Eigenschaft gewonnen werden können.

Die bei den in das Projekt eingebundenen Recyclern gewonnenen Proben wurden in chemischer Hinsicht auf folgende Parameter hin untersucht:

- pH-Wert
- Leitfähigkeit
- Chlorid
- Sulfat
- PAK
- Vanadium

Die PAK waren im Feststoff zu untersuchen, alle anderen Parameter im Eluat. Für diese Untersuchungen des Eluat sollten Parallelversuche durchgeführt werden und zwar im 1:10 – Eluat sowie auch demjenigen Verfahren, das aller Voraussicht nach in der geplanten Ersatzbaustoffverordnung festgelegt werden wird. Es handelt sich um den Versuch im 1:2-Säuleneluat nach DIN 19528. Da alle Analysen derzeit aus dem alten 1:10-Schüttel eluat gewonnen wurden, zukünftige Beurteilungen jedoch nach den Zuordnungswerten der Ersatzbaustoffverordnung mit dem Bezug auf dem neuen Analyseverfahren erfolgen sollen, wären entsprechende „Umrechnungsfaktoren“ ideal.

Da die Proben an verschiedenen Stellen im Aufbereitungsprozess gewonnen wurden und aus den verschiedenen Outputmassenströmen, sollen die Wertepaare auch eine Schadstoffbelastung über den Aufbereitungsverlauf aufzeigen, d.h. im Idealfall eine Abreicherung im Produkt (und eine Anreicherung in einem zu entsorgenden kleinen Massenstrom).

Die Beprobungen erfolgten an folgenden Anfallstellen:

- Recyclingwerk Rabailen der Fa. Feess in Kirchheim/Teck
- Aufbereitungsanlage der Fa. OTT Teerrecycling in Trochtelfingen
- (Recyclingwerk der Fa. Scherer & Kohl in Mannheim)

Leider war es trotz wiederholter Versuche über einen langen Zeitraum hinweg nicht möglich, bei der Fa. Scherer & Kohl entsprechende Probenahmen durchzuführen. Zunächst verzögerte sich die Entwicklung einer geeigneten Aufbereitungsstrategie für die Gesteinskörnung Typ 2. Letztendlich erfolgte keine Meldung über das zur Produktion vorgesehene Zeitfenster. Da bei diesem Betrieb (noch) nicht in die kontinuierliche Produktion eingestiegen wurde (es muss zunächst ein Antrag auf abZ allgemeine bauaufsichtliche Zulassung gestellt werden, der zudem eines positiven Bescheids bedarf), war dies der Priorität des Tagesgeschäfts anzupassen und ist nicht rechtzeitig kommuniziert worden. Dies ist deswegen schade, als dass Scherer & Kohl eine gegenüber der Fa. Feess abweichende Aufbereitungsstrategie verfolgt und so im Vergleich der Konzepte auch weitere Erkenntnisse zu ziehen gewesen wären.

## 11.1 Erste Untersuchungskampagne Fa. Feess, Werk Rabailen

Die Ergebnisse der ersten Untersuchungskampagne sind in den nachfolgenden Tabellen dokumentiert.

Tabelle 11.1: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Altbeton

Parameter	Produkt	Beton-RC 0/2	Beton-RC 2/8	Beton-RC 8/16	Beton-RC 16/X
	<b>Dimension</b>	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat
pH-Wert	-	12,1	11,9	12,0	12,1
elektr. Leitf.	µS/cm	2600	1580	1780	2380
Chlorid	mg/l	3,3	6,1	4,9	6,7
Sulfat	mg/l	9	8	14	7
Vanadium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
PAK	mg/kg	5,68	0,05	0,52	< 0,05
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	12,6	12,3	12,1	11,8
elektr. Leitf.	µS/cm	8300	4130	2250	1230
Chlorid	mg/l	13	5,3	13	5
Sulfat	mg/l	4	2	7	22
Vanadium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse aus den beiden getrennten Aufbereitungslinien Altbeton und Bauschutt ist eindeutig. Mit Ausnahme der elektrischen Leitfähigkeit liegen die Werte für das Altbeton-Material teilweise sehr deutlich unter den Werten für den Bauschutt. Dies gilt über alle Output-Massen hinweg.

Schaut man sich jedoch die Werte über den Aufbereitungsprozess hinweg an, so lassen sich nur schwer belastbare Schlussfolgerungen ziehen. Eindeutig sind diese für die Belastung an PAK. Hier liegen die Konzentrationen im feinen Materialstrom (Vorsieb, Brechsand) im Allgemeinen deutlich über den Werten für die gröberen Fraktionen. Die Werte für die Fraktion 16/x mm weichen tendenziell etwas vom Muster ab: je feiner, desto höher belastet (entlang der zunehmenden spezifischen Oberfläche). Hier sind immer auch mal wieder höhere Belastungen gemessen worden.

Tabelle 11.2: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Bauschutt

Parameter	Produkt Dimension	Bauschutt-RC Vorsieb	Bauschutt-RC 0/2	Bauschutt-RC 2/8	Bauschutt-RC 8/16	Bauschutt-RC 16/X
		S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat
pH-Wert	-	10,7	11,0	10,8	11,4	11,5
elektr. Leitf.	µS/cm	942	536	741	554	921
Chlorid	mg/l	14	18	15	4,7	12
Sulfat	mg/l	440	130	290	23	180
Vanadium	mg/l	0,016	0,015	0,014	0,011	0,012
PAK	mg/kg	2,35	6,73	< 0,05	0,84	1,92

Parameter	Dimension	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	11,9	11,1	11,6	11,9	11,4
elektr. Leitf.	µS/cm	1690	1790	1700	1690	1160
Chlorid	mg/l	21	98	42	21	31
Sulfat	mg/l	27	540	420	27	280
Vanadium	mg/l	0,007	0,039	0,015	0,007	0,016

Die Werte für das Endprodukt 2/16 der Lieferkörnung Typ 2 lassen sich aus den Werten für die Ausgangsmaterialien (70 % Beton-RC, 30 % Bauschutt-RC und zwar immer der Fraktionen 2/8 und 8/16) in der Tendenz herleiten, wenn auch nicht „errechnen“.

Nimmt man die Analysewerte für Sulfat heran und damit dem Parameter, der in der Diskussion einer möglichen „Schadstoffbelastung“ immer als erstes genannt wird – und dies unabhängig von den Analysemethoden – so zeigen sich sehr niedrige Werte. So liegen quasi alle Werte im Bereich von Z 1.1 und dies teilweise sehr deutlich. Das Vorsiebmaterial für Bauschutt liegt im Bereich von Z 1.2 (offener Einbau unter näher definierten hydrogeologischen Bedingungen zugelassen) und damit deutlich unter ansonsten üblichen Werten. Man erkennt hier, dass der Betrieb auch bei Bauschutt auf eine gute Ausgangsqualität für diese Produktionslinie achtet.

Tabelle 11.3: Untersuchungsergebnisse für das Endprodukt 2/16, Lieferkörnung Typ 2

Parameter	Produkt Dimension	Mischung Beton-Bauschutt 2/16	
		S4-Eluat	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	11,8	12,1
elektr. Leitf.	µS/cm	1200	2710
Chlorid	mg/l	6,7	22
Sulfat	mg/l	57	41
Vanadium	mg/l	0,005	< 0,005
PAK	mg/kg	1,62	

Stellt man die Analysewerte für die einzelnen Parameter, unterschieden nach den Analyseverfahren, gegenüber, so zeigt sich kein einheitliches Bild. Nicht nur, dass kein festes Verhältnis im Sinne eines Umrechnungsfaktors aus der Gegenüberstellung abzuleiten wäre. Die Gegenüberstellungen geben noch nicht einmal Richtungen sicher vor. So liegen bei allen drei Parametern manche Wertepaare aus dem S4-Eluat höher (Werte > 100 %), ebenso oft aber auch niedriger (Werte < 100 %). Am ehesten sind noch Aussagen für Chlorid ableitbar. Die Werte aus der Gegenüberstellung für Sulfat schwanken zwischen 24 % und 1630 %!



Tabelle 11.4: Wertepaare nach den einzelnen Untersuchungsmethoden

	S4-Eluat	DIN 19528	
<b>Vanadium</b> mg/l	0,016	0,007	229%
	0,015	0,039	38%
	0,014	0,015	93%
	0,011	0,007	157%
	0,012	0,016	75%
	0,005	< 0,005	
<b>Sulfat</b> mg/l	9	13	69%
	8	5,3	151%
	14	13	108%
	7	5	140%
	440	27	1630%
	130	540	24%
	290	420	69%
	23	27	85%
	180	280	64%
57	41	139%	
<b>Chlorid</b> mg/l	3,3	13	25%
	6,1	5,3	115%
	4,9	13	38%
	6,7	5	134%
	14	21	67%
	18	98	18%
	15	42	36%
	4,7	21	22%
	12	31	39%
	6,7	22	30%

## 11.2 Zweite Untersuchungskampagne Fa. Feess, Werk Rabailen

Die Ergebnisse der zweiten Untersuchungskampagne sind in den nachfolgenden Tabellen dokumentiert.

Tabelle 11.5: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Altbeton

	Produkt	Beton-RC 0/2	Beton-RC 2/8	Beton-RC 8/16	Beton-RC 16/X
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat
pH-Wert	-	12,1	12,1	12,1	12,1
elektr. Leitf.	µS/cm	2940	3140	2690	2770
Chlorid	mg/l	17	11	8,9	10
Sulfat	mg/l	14	9	13	16
Vanadium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
PAK	mg/kg	0,58	0,19	< 0,05	0,16
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	12,3	12,2	11,9	11,7
elektr. Leitf.	µS/cm	4930	3850	1930	1220
Chlorid	mg/l	32	21	9,3	10
Sulfat	mg/l	6	5	4	16
Vanadium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	0,014

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse aus den beiden getrennten Aufbereitungslinien Altbeton und Bauschutt ist bezüglich Chlorid nach dem Eluat-Test nicht ganz eindeutig. Die Werte liegen bei Altbeton über denen der ersten Untersuchungskampagne. Sonst liegen mit Ausnahme der elektrischen Leitfähigkeit die Werte für das Altbeton-Material teilweise sehr deutlich unter den Werten für den Bauschutt. Überraschend ist aber der niedrige Sulfatgehalt im Bauschutt 0/2 mm. Die Parameter Chlorid, Sulfat und PAK dieser Fraktion wiesen in der ersten Untersuchungskampagne dieses Materials alle deutlich hö-

here Werte auf. Außerdem ist die elektrische Leitfähigkeit von Bauschutt 0/2 mm sehr niedrig.

Schaut man sich die Werte über den Aufbereitungsprozess hinweg an, so lassen sich nur schwer belastbare Schlussfolgerungen ziehen. Eindeutig sind diese für die Belastung an PAK. Hier liegen die Konzentrationen im feinen Materialstrom (Vorsieb, Brechsand) im Allgemeinen deutlich über den Werten für die größeren Fraktionen. Die Werte für die Fraktion 16/x mm weichen tendenziell etwas vom Muster ab: je feiner, desto höher belastet (entlang der zunehmenden spezifischen Oberfläche). Hier sind immer auch mal wieder höhere Belastungen gemessen worden. Überraschend ist überdies der sehr hohe PAK-Wert im Bauschutt 8/16 mm, der völlig aus der Reihe fällt. Aus der Reihe fallen weiterhin im Bauschutt 0/2 mm im Vergleich zu den größeren Fraktionen alle Parameter außer PAK.

Tabelle 11.6: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Bauschutt

Parameter	Produkt	Bauschutt-RC Vorsieb	Bauschutt-RC 0/2	Bauschutt-RC 2/8	Bauschutt-RC 8/16	Bauschutt-RC 16/X
Parameter	Dimension	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat
pH-Wert	-	11,2	8,4	10,5	11,2	11,5
elektr. Leitf.	µS/cm	1310	60	454	671	1100
Chlorid	mg/l	17	0,8	8	5,8	19
Sulfat	mg/l	430	2	130	60	120
Vanadium	mg/l	0,029	0,022	0,041	0,029	0,012
PAK	mg/kg	0,89	0,13	0,12	117,39	0,88

Parameter	Dimension	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	9,6	8,6	9,9	9,8	11,4
elektr. Leitf.	µS/cm	2700	162	981	589	1510
Chlorid	mg/l	47	1	26	15	55
Sulfat	mg/l	1600	9	350	170	260
Vanadium	mg/l	0,034	0,027	0,09	0,078	0,015

Die Werte für das Endprodukt 2/16 der Lieferkörnung Typ 2 lassen sich aus den Werten für die Ausgangsmaterialien (70 % Beton-RC, 30 % Bauschutt-RC und zwar immer der Fraktionen 2/8 und 8/16) in der Tendenz herleiten, wenn auch nicht „errechnen“.

Nimmt man die Analysewerte für Sulfat heran und damit den Parameter, der in der Diskussion einer möglichen „Schadstoffbelastung“ immer als erstes genannt wird – und dies unabhängig von den Analysemethoden – so zeigen sich sehr niedrige Werte. So liegen quasi alle Werte im Bereich von Z 1.1 und dies teilweise sehr deutlich. Das Vorsiebmaterial für Bauschutt liegt im Bereich von Z 1.2 (offener Einbau unter näher definierten hydrogeologischen Bedingungen zugelassen) und damit deutlich unter ansonsten üblichen Werten. Man erkennt hier, dass der Betrieb auch bei Bauschutt auf eine gute Ausgangsqualität für diese Produktionslinie achtet.

Tabelle 11.7: Untersuchungsergebnisse für das Endprodukt 2/16, Lieferkörnung Typ 2

Parameter	Produkt	Mischung Beton-Bauschutt 2/16	
		S4-Eluat	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	11,8	11,6
elektr. Leitf.	µS/cm	1590	1160
Chlorid	mg/l	5,2	11
Sulfat	mg/l	36	34
Vanadium	mg/l	< 0,005	0,014
PAK	mg/kg	< 0,05	

Stellt man die Analysewerte für die einzelnen Parameter, unterschieden nach den Analyseverfahren, gegenüber, so zeigt sich kein einheitliches Bild. Nicht nur, dass kein festes Verhältnis im Sinne eines Umrechnungsfaktors aus der Gegenüberstellung abzuleiten wäre. Die Gegenüberstellungen geben noch nicht einmal Richtungen sicher vor. So liegen bei allen drei Parametern (Vanadium, Sulfat und Chlorid) manche Wertepaare aus dem S4-Eluat höher (Werte > 100 %), ebenso oft aber auch niedriger (Werte < 100 %). Am ehesten

sind noch Aussagen für Chlorid ableitbar. Die Werte aus der Gegenüberstellung für Sulfat schwanken zwischen 22 % und 325 %!

Tabelle 11.8: Wertepaare nach den einzelnen Untersuchungsmethoden

	S4-Eluat	DIN 19528	
Vanadium	0,029	0,034	85%
mg/l	0,022	0,027	81%
	0,041	0,09	46%
	0,029	0,078	37%
	0,012	0,015	80%
Sulfat	14	6	233%
mg/l	9	5	180%
	13	4	325%
	16	16	100%
	430	1600	27%
	2	9	22%
	130	350	37%
	60	170	35%
	120	260	46%
	36	34	106%
Chlorid	17	32	53%
mg/l	11	21	52%
	8,9	9,3	96%
	10	10	100%
	17	47	36%
	0,8	1	80%
	8	26	31%
	5,8	15	39%
	19	55	35%
	5,2	11	47%

### 11.3 Untersuchungskampagne Fa. OTT Teerrecycling, Trochtfingen

Die Ergebnisse der dritten Untersuchungskampagne sind in den nachfolgenden Tabellen dokumentiert.

Tabelle 11.9: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Altbeton

Parameter	Produkt Dimension	Beton-RC 0/2	Beton-RC 2/8	Beton-RC 8/16	Beton-RC 16/X
		S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat
pH-Wert	-	12,2	11,3	11,2	11,9
elektr. Leitf.	µS/cm	3900	514	465	2020
Chlorid	mg/l	13	2	1,8	4,6
Sulfat	mg/l	7	8	15	12
Vanadium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005
PAK	mg/kg	1,39	< 0,05	< 0,05	0,26
Parameter	Dimension	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	12,4	11,2	10,8	11,9
elektr. Leitf.	µS/cm	7440	491	282	3330
Chlorid	mg/l	69	4,3	2,7	110
Sulfat	mg/l	9	13	9	310
Vanadium	mg/l	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005

Der Vergleich der Untersuchungsergebnisse aus den beiden getrennten Aufbereitungslinien Altbeton und Bauschutt sind nicht sehr eindeutig. So weisen die Werte zur elektrischen Leitfähigkeit selbst bei aufbereitetem Altbeton teilweise niedrige Werte auf (eventuell schon „älteres“ Material?). Im Gegenzug liegen die Werte für die Belastungen der Bauschutt-Massenströme mit Chlorid teilweise unter denen für Altbeton. Ansonsten stimmt auch hier die Aussage, dass die Massenströme aus Bauschutt eine tendenziell höhere „Belastung“ mitbringen als die Massenströme aus Altbeton.

Schaut man sich jedoch die Werte über den Aufbereitungsprozess hinweg an, so lassen sich nur schwer belastbare Schlussfolgerungen ziehen. Eindeutig sind diese für die Belastung an PAK. Hier liegen die Konzentrationen im feinen Materialstrom (Vorsieb, Brechsand) im Allgemeinen deutlich über den Werten für die größeren Fraktionen. Die Werte für die Fraktion 16/x mm weichen tendenziell etwas vom Muster ab: je feiner, desto höher belastet (entlang der zunehmenden spezifischen Oberfläche). Hier sind immer auch mal wieder höhere Belastungen gemessen worden.

Tabelle 11.10: Untersuchungsergebnisse für die Aufbereitung von Bauschutt

	Produkt	Bauschutt-RC Vorsieb	Bauschutt-RC 0/2	Bauschutt-RC 2/8	Bauschutt-RC 8/16	Bauschutt-RC 16/X
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat	S4-Eluat
pH-Wert	-	11,2	11,3	10,6	10,4	11,8
elektr. Leitf.	µS/cm	1530	812	314	279	1640
Chlorid	mg/l	12	5,1	2	1,2	15
Sulfat	mg/l	580	140	62	62	92
Vanadium	mg/l	0,023	0,016	0,016	0,014	0,009
PAK	mg/kg	2,12	0,24	< 0,05	< 0,05	0,3
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	11,2	11,4	8,9	9,8	12,3
elektr. Leitf.	µS/cm	2670	1610	468	237	5170
Chlorid	mg/l	71	66	8,1	3,9	28
Sulfat	mg/l	1200	340	180	70	19
Vanadium	mg/l	0,035	0,044	0,03	0,015	< 0,005

Die Werte für das Endprodukt 2/16 der Lieferkörnung Typ 2 lassen sich aus den Werten für die Ausgangsmaterialien (70 % Beton-RC, 30 % Bauschutt-RC und zwar immer der Fraktionen 2/8 und 8/16) in der Tendenz herleiten, wenn auch nicht „errechnen“. Die Chlorid-Werte liegen für die Mischung tendenziell noch unter denen der Ausgangsmaterialien, bei allerdings generell so niedrigem Niveau, dass sich hier auch größere Unsicherheiten in der Aussagerichtung ergeben.

Nimmt man die Analysewerte für Sulfat heran und damit dem Parameter, der in der Diskussion einer möglichen „Schadstoffbelastung“ immer als erstes genannt wird – und dies unabhängig von den Analysemethoden – so zeigen sich sehr niedrige Werte. So liegen alle Werte im Bereich von Z 1.1 und dies auch für den Bauschutt-Brechsand und zudem teilweise sehr deutlich. Das Vorsiebmaterial für Bauschutt liegt allerdings im Bereich von Z 2 (geschlossener Einbau mit definierten technischen Sicherungsmaßnahmen zugelassen).

Tabelle 11.11: Untersuchungsergebnisse für das Endprodukt 2/16, Lieferkörnung Typ 2

	Produkt	RC-Splitt Typ 2	
<b>Parameter</b>	<b>Dimension</b>	S4-Eluat	DIN 19528 W/F 2:1
pH-Wert	-	11,0	10,4
elektr. Leitf.	µS/cm	394	263
Chlorid	mg/l	1,4	3
Sulfat	mg/l	33	45
Vanadium	mg/l	0,006	0,014
PAK	mg/kg	< 0,05	

Stellt man die Analysewerte für die einzelnen Parameter, unterschieden nach den Analyseverfahren, gegenüber, so zeigt sich kein ganz einheitliches Bild. Nicht nur, dass kein festes Verhältnis im Sinne eines Umrechnungsfaktors aus der Gegenüberstellung abzuleiten wäre. Die Gegenüberstellungen geben noch nicht einmal Richtungen sicher vor. So liegen bei Sulfat manche Wertepaare aus dem S4-Eluat höher (Werte > 100 %), ebenso oft aber auch niedriger (Werte < 100 %). Am ehesten sind noch Aussagen für Chlorid und Vanadium ableitbar. Die Werte aus der Gegenüberstellung für Sulfat schwanken zwischen 10 % und 556 %!

Tabelle 11.12: Wertepaare nach den einzelnen Untersuchungsmethoden

	S4-Eluat	DIN 19528	
<b>Vanadium</b> mg/l	0,023	0,035	66%
	0,016	0,044	36%
	0,016	0,03	53%
	0,014	0,015	93%
	0,009	< 0,005	
	0,006	0,014	43%
<b>Sulfat</b> mg/l	7	69	10%
	8	4,3	186%
	15	2,7	556%
	12	110	11%
	580	1200	48%
	140	340	41%
	62	180	34%
	62	70	89%
	92	19	484%
	33	45	73%
<b>Chlorid</b> mg/l	13	69	19%
	2	4,3	47%
	1,8	2,7	67%
	4,6	110	4%
	12	71	17%
	5,1	66	8%
	2	8,1	25%
	1,2	3,9	31%
	15	28	54%
	1,4	3	47%

## 11.4 Erkenntnisse über alle Untersuchungskampagnen hinweg

Wie man aus der Analysekampagne eindeutig ersehen kann, weisen die Gesteinskörnungen aus Altbeton zum Großteil eine niedrigere Belastung auf als die Gesteinskörnungen, die aus der Aufbereitung von Mauerwerk bzw. gemischtem Bauschutt hergestellt wurden.

Die Materialproben wurden immer an verschiedenen Stellen über den Aufbereitungsprozess hinweg oder auch aus unterschiedlichen Korngruppen genommen. Bei der Analyse und Bewertung dieser Werte bestätigt sich, dass die Höhe der "Belastungen" korreliert mit der Korngruppe. Je feiner das Material, desto höher sind die Gehalte und die Elutionswerte. Diese Erkenntnis zeigte sich auch schon in dem Forschungsprojekt des Umweltministeriums zur gezielten Aufbereitung von Bauschutt zur Einhaltung zukünftiger Sulfatgrenzwerte [ifeu et al. 2014]. Bei dieser Aussagetendenz sind Abweichungen zu beachten, insbesondere die mit 16/x größte Fraktion weist immer wieder auch höhere Werte auf.

In folgender Abbildung sind exemplarisch die durch die Aufbereitung von gemischtem Bauschutt guter Ausgangsqualität für die einzelnen Fraktionen resultierenden Sulfatwerte dargestellt.

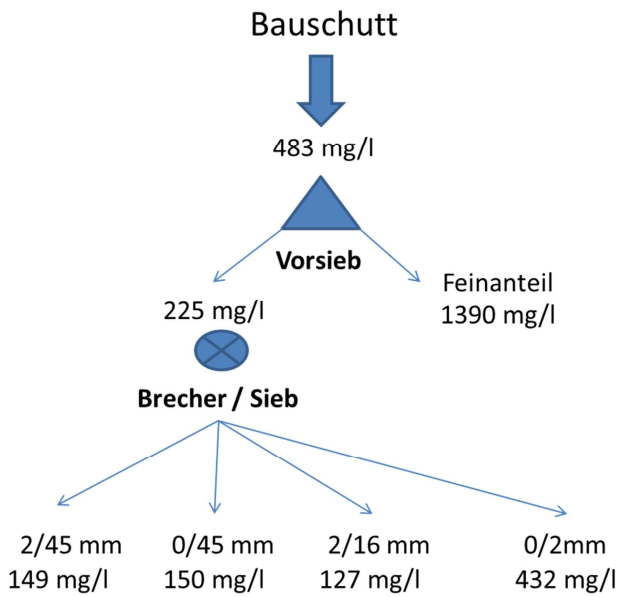


Abbildung 11.1: Beispiel einer Beeinflussung der Sulfatwerte durch die Aufbereitung von gemischtem Bauschutt guter Ausgangsqualität [IFEU et al. 2014]

Die Belastung der RC-Gesteinskörnungen sind sehr niedrig. Dies gilt gerade auch für Sulfat. Dies ist ein Indiz für die Güte der in das Projekt einbezogenen Betriebe sowie die Qualität der produzierten Materialien.

Über die Analysekampagne wurden auch Parallelversuche für zwei Untersuchungsmethoden durchgeführt. Aus den Ergebnissen lassen sich jedoch keine Gesetzmäßigkeiten erkennen. Die Vergleichswerte zwischen Schüttel- und Säulentest streuen. In manchen Fällen lässt sich noch nicht einmal eine Aussagerichtung erkennen.

## 12 Ausblick

---

Wie aus dem Bericht unschwer zu erkennen, ist mit dem abgeschlossenen Projekt wieder ein weiterer guter Schritt in Richtung der Schließung von Stoffkreisläufen für mineralische Bauabfälle gelungen. Die Baustoffalternative R-Beton mit Nutzung der Gesteinskörnung Liefertyp 2 ist auf dem Markt bekannt gemacht worden, mit dem Werk Kirchheim/Teck der Holcim ist dieser Beton in das Portfolio eines Transportbetonwerkes aufgenommen worden. Seit einigen Monaten werden alle Baustellen grundsätzlich mit dieser Betonrezeptur beliefert, sofern es die Regelwerke zulassen.

Weitere Betonwerke haben an dieser Baustoffalternative R-Beton grundsätzlich großes Interesse. Dies gilt insbesondere für die Betonwerke der Krieger-Gruppe, die diese Umstellung in der Produktion zu R-Beton (allerdings unter Verwendung der GK Liefertyp 1) für die Standorte Waiblingen und Winnenden auch vollzogen haben. Probleme in der Rohstoffversorgung durch RC-Gesteinskörnung limitieren hier aber die Durchsatzmengen. Wie das Interesse der Betonindustrie an dieser Baustoffalternative zeigt, würden auch weitere Betriebe dann umstellen, wenn eine ausreichende und kostengünstige Rohstoffversorgung sichergestellt wäre. Hier gilt es anzusetzen:

- *Regelungslücke schließen*  
Zum jetzigen Zeitpunkt müssen die Bauschuttrecycler beim DIBt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) beantragen. Gemäß den derzeitigen Festlegungen der Bauregelliste B Teil 1, Anlage 1/1.3 ist die Umweltverträglichkeit rezyklierter Gesteinskörnungen mit einer abZ nachzuweisen. Dies ist mit entsprechendem Kosten- und Zeitaufwand verbunden. Zudem müssen Unterlagen und Formulare erstellt und ausgefertigt werden. Für die Recycler ist diese Situation daher derzeit eher abschreckend. Das Land sollte darauf achten, dass die Regelungslücke möglichst bald im Jahr 2016 geschlossen sein wird.
- *Betonwerke und Recycler zusammenbringen*  
Bis dato bestehen in der Regel zwischen Recyclern und Betonwerken keine Geschäftsbeziehungen. Sollen Betonwerke ihren Rohstoffbezug auf Recycler ausweiten, müssen hierfür zunächst Kontakte geknüpft werden.  
Es dürfte sinnvoll sein, diese Gespräche von außen zu initiieren und die Gesprächspartner hierfür zusammenzubringen. In diesem Zusammenhang kann auch eine rechtliche und technische Beratung erfolgen.  
Um die Baustoffalternative R-Beton weiter zu etablieren, bedarf es dringend einer Erschließung der stadtnahen Recycler und eine Verbesserung der Rohstoffversorgung der Betonwerke.

Wie das Projekt wieder eindrücklich belegte, lassen sich Rezepturen für R-Beton entwickeln, die in deutlich höheren Anteilen auf RC-Gesteinskörnung und hier durchaus auch in Anteilen auf gebrochenes Mauerwerk oder auch RC-Brechsand zurückgreifen, ohne die geforderten Eigenschaften der Betone zu gefährden. Zudem zeigte sich erneut, dass R-Betone auch in Einsatzbereichen eingesetzt werden können, die ihnen nach den geltenden Regelwerken noch nicht zugänglich sind. Die bisherigen Regelwerke fußen auf den Erkenntnissen und dem technischen Stand der 90er Jahre. Die Entwicklungen gerade im

Recycling aber auch in der Bauchemie erlauben einen deutlich breiteren Einsatz von R-Betonen. Hier gilt es anzusetzen:

- *Weiterentwicklung der Beton-Rezepturen und entsprechend der Regelwerke*  
Ziel muss es sein, die Anteile an RC-Gesteinskörnung in den Rezepturen zu erhöhen und zugleich mehr Betontypen für die R-Betone zu erschließen.

Eine derartige Weiterentwicklung macht die Produktion der RC-Gesteinskörnung für Recycler attraktiver, da vermehrt Anteile an gebrochenem Mauerwerk eingesetzt werden könnten, einem Material, das sich als Bestandteil von Straßenbaustoffen nur schwierig vermarkten lässt.

Wie das Beispiel Schweiz zeigt, bedarf es zur weiteren Einführung des R-Betons auf dem Markt nicht nur einer Stärkung auf Angebotsseite (s.o.). Entsprechende Impulse auf Seiten der Nachfrage sind hierfür mindestens ebenso wichtig. Wichtige Stellschrauben können sein:

- *Aufnahme von ressourcenschonenden Baustoffen wie R-Beton als Kriterium für die Zertifizierung nachhaltiges Bauen*

In der Schweiz kann eine Zertifizierung von Gebäuden nach Minergie-Eco nur dann erfolgen, wenn es sich bei mindestens 50 % der in den Gebäuden eingesetzten Betone um R-Betone handelt. Eine Ausnahme wird nur dann ermöglicht, wenn der Bauherr nachweisen kann, dass im Umkreis von 25 km der Baustelle kein Transportbetonwerk R-Betone liefern kann.

In ähnlicher Weise könnten die Zertifizierungssysteme der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (DGNB) oder das Bewertungssystem nachhaltiges Bauen (BNB) Anreize zur Verwendung von R-Beton schaffen.

- *Vorbild öffentliche Hand*

Die öffentliche Hand ist auch im Hochbau ein bedeutender Bauherr. Zur Einführung des R-Betons im Schweizer Markt hat wesentlich die Stadt Zürich mit ihrem Beschluss beigetragen, zukünftig bei allen eigenen Bauvorhaben grundsätzlich R-Beton auszuschreiben. Dass dies möglich und mit der Vergabeverordnung etc. kompatibel ist, zeigt der Leitfaden „Ressourceneffiziente Beschaffung“ des Bundesinnenministeriums [2014].

Dabei muss nicht zwingend R-Beton ausgeschrieben werden. Es wäre bereits hilfreich, wenn bei der Vergabe neben dem Preis weitere Kriterien in eine Bewertungsmatrix mit aufgenommen werden, die den Rückgriff auf RC-Baustoffe oder den Aspekt der Ressourcenschonung bewerten würden.

Im Falle des R-Betons würde dies bedeuten, dass wie gewohnt die Betone nach Eigenschaft ausgeschrieben werden, wodurch ein Rückgriff auf RC-Gesteine in den Rezepturen und dies möglichst unter Ausschöpfung der in Regelwerken bestimmten Anteilen möglich wäre. Damit könnten automatisch auch Teillieferungen von R-Betonen ermöglicht werden, sollte gerade bei großen Baumaßnahmen nicht ausreichende Mengen an RC-Gestein oder R-Beton zur Verfügung stehen.

Wie das Projekt erneut zeigte, sind die Baustellenbesichtigungen sowie das Fachgespräch mit der zugehörigen Öffentlichkeitsarbeit wichtige Instrumente, die Baustoffalternative R-Beton bekannt zu machen. Die Resonanz hierzu war durchweg positiv.



Trotzdem handelt es sich bei diesen Angeboten nur um Einzelmaßnahmen. Es besteht immer die Gefahr, dass der damit verbundene Impuls nicht ausreichend nachhaltig wirkt. Es wäre hilfreich, wenn jederzeit bei Bedarf auf gute Praxisbeispiele zurückgegriffen werden könnte und dies insbesondere im Rahmen von Schulungs- oder Ausbildungsmaßnahmen. Hierfür könnte es hilfreich sein, wenn diese Praxisbeispiele zentral in Form von Kurzbeschreibungen und Steckbriefen sowie den zugehörigen Kontaktdaten bspw. in einem Internetauftritt aufgelistet wären. Ein vergleichbares Konzept ist bei „außerschulischen Lernorten“ schon umgesetzt und gut eingeführt.

- *Kompetenzzentren / Lernorte*

Die guten Praxisbeispiele im Sinne der vorbildlichen Betriebe zur Herstellung der RC-Gesteinskörnungen oder des R-Betons sowie die guten Beispiele im Einsatz dieser Baustoffe in Bauvorhaben sollten zentral auf einer Internetseite zusammengeführt und so ausgebaut werden, dass sie analog zu außerschulischen Lernorten in Maßnahmen der Fortbildung und Ausbildung einbezogen werden können.

- *Anpassung der Curricula*

In allen Gesprächen gerade mit Ingenieuren, Tragwerksplanern und Architekten zeigt sich immer wieder eine deutliche ausbildungsbedingte Wissenslücke. In den Lehrplänen und Curricula der Studiengängen werden RC-Baustoffe nicht thematisiert und dies selbst nicht im Rahmen der Baustoffkunde.

Angesichts der Bedeutung der Nutzung von sekundären Rohstoffen in der Ressourcenstrategie nicht nur des Landes Baden-Württemberg muss dies dringend angepasst werden. Ingenieure, Tragwerksplaner und Architekten sind sehr bedeutende Akteure.

Bei der Herstellung der RC-Gesteinskörnung für Transportbetonwerke fallen Brechsande an. Schon heute sind die bei einem Recycler anfallenden Feinmaterialien – insbesondere Vorsiebmaterial – nur schwierig abzusetzen. In Verbindung mit einer entsprechenden „Belastung“ sind diese oft nur in Verfüllmaßnahmen oder auf Deponien abzulagern. Soll die Produktion von Straßenbaustoffen, die als 0/45 oder 0/32 in gewissem Umfang immer Feinanteile beinhalten, auf die Herstellung von GK für die Betonindustrie (bspw. 2/16) erweitert werden, bei deren Herstellung ca. 30 % als Feinmaterial anfallen, so muss der Absatz dieser Feinmaterialien deutlich verbessert werden. Auf die Option, für diese Brechsande den Einsatz in Beton- oder Zementrezepturen zu ermöglichen, wurde bereits eingegangen (s.o.).

- *Erschließung neuer Absatzwege für Feinmaterialien*

Hierfür bietet sich ein Forschungsprojekt an, mit dem neue Absatzwege identifiziert werden sollen (bspw. Flüssigboden, sekundärer Rohstoff in der Zementindustrie zur Substitution von Kalkstein, Einsatz in der Herstellung von Kalksandsteinen, Ziegel, Betonsteinen, Betonwaren etc. pp.) und diese Wege im zweiten Schritt durch Feldversuche etc. pp. auch tatsächlich erprobt werden.

Der spezifische Vorteil von R-Beton, aus Rohstoffen hergestellt zu werden, die in der Nachbarschaft zur Baustoffnachfrage anfallen und aufbereitet werden, findet in der Praxis noch zu wenig Beachtung. Gerade für den Großraum Stuttgart fehlen die Recycler bzw. die zentrumsnahen Aufbereitungsstandorte.

- *Erschließung zentrumsnaher Aufbereitungsstandorte*

Im Austausch mit den für Stadt- und Regionalplanung zuständigen Behörden sollte geprüft werden, inwieweit Flächen auch nur in Form von Zwischennutzungen für die Aufbereitung von mineralischen Bauabfällen zur Verfügung gestellt werden können.

## 12.1 Weiterer konkreter Handlungsbedarf

Aus den vorherigen Überlegungen lassen sich folgende Handlungsstränge für die weitere Stützung der Ressourceneffizienz im Bausektor ableiten:

### **Entwicklung einer praktikablen Regelung zur Zulassung von RC-Gesteinskörnungen (Prüfung der umwelttechnischen Eignung)**

Intensiver fachlicher Austausch mit dem DIBt Deutsches Institut für Bautechnik sowie den verschiedenen Fachverbänden aus dem Bausektor mit dem Ziel, die derzeitige Regelungslücke zu schließen und eine praktikable zukünftige Regelung zu finden. Es ist dringend sicherzustellen, dass auch nach Oktober 2016 zumindest eine abZ und möglich sein wird damit weiter RC-Gesteinskörnung für die Betonindustrie produziert werden kann.

### **Hilfestellung zur Einführung der Baustoffalternative R-Beton auch in anderen Regionen des Landes (v.a. Freiburg, Heilbronn, Karlsruhe, Ulm)**

Kontaktaufnahme zu potenziellen Bauherren sowie den Baustofflieferanten (Transportbeton, Bauschuttrecycling) der jeweiligen Region mit dem Ziel, diese grundsätzlich über die rechtlichen und technischen Rahmenbedingungen dieser Baustoffalternative aus fachlicher Sicht zu informieren mit dem Ziel, konkrete Bauvorhaben zu initiieren, mit denen der Baustoff in den Regionen eingeführt werden kann.

### **Erschließung des Marktes der Betonfertigteile und Betonwaren für R-Beton**

Mit dem Bauvorhaben in Ludwigsburg (Neubau Kreisverwaltung) wurde erstmalig R-Beton bei der Herstellung von Treppenläufen eingesetzt. Diesen Impuls gilt es aufzunehmen und analog zum Transportbeton in der Branche zu verankern.

Auswertung der Erfahrungen aus Ludwigsburg; Kontaktaufnahme zu den Herstellerbetrieben für Betonfertigteilen und Betonwaren mit dem Ziel, diese über die Baustoffalternative zu informieren und konkrete Pilotvorhaben zu initiieren.

### **Erschließung hochwertiger Absatzwege für bodenähnliche Massen in der Zementindustrie**

Sowohl in Österreich als auch in der Schweiz werden Abfallmassenströme aus der Bauschutttaufbereitung als Rohstoffe zur Klinkerproduktion (Einsatz vor dem Drehrohr) eingesetzt. Substituiert werden Rohstoffe aus der Natursteinindustrie. Dies ist ein weiterer zentraler Baustein zur Substituierung primärer Rohstoffe und zugleich für die Bauschutttaufbereiter von zentraler Bedeutung, da sich Absatzwege für Massenströme eröffnen, die im ungebundenen Bereich (Tiefbau) kaum eingesetzt werden können. Gelingt es, diesen Markt zu erschließen, hätte dies mindestens die Bedeutung der Innovation R-Beton; Baden-Württemberg würde wieder einen bundesweit bedeutsamen Impuls setzen können

In einem Forschungsprojekt gilt es, diese Praxis zu analysieren und Strategien zur Implementierung in Baden-Württemberg zu entwickeln.

### **Bauschutttaufbereitung zentrumsnah in unmittelbarer Nachbarschaft zur Baustoffnachfrage**

Gerade in Stuttgart besteht die Situation, dass es im Stadtgebiet an Bauschuttaufbereitern fehlt; der Ansatz R-Beton hat aber auf dem Markt dann Bestand, wenn die Transportbetonwerke ihre Rohstoffe (RC-Gesteinskörnung) aus unmittelbarer Nähe beziehen können; Es bietet sich daher an, in Zusammenarbeit mit der Stadt Stuttgart und hier insbesondere der Stadt- und Raumplanung sowie dem Umweltamt (Immissionsschutz) konkrete Lösungsstrategien zu erarbeiten, auf die dann auch andernorts zurückgegriffen werden kann.

### **Internetplattform**

Recherche der guten Praxisbeispiele im Sinne vorbildlicher Betriebe der Baustoffindustrie aber vor allem auch der vorbildlichen Bauherren und guter Praxisbeispiele im Einsatz von RC-Baustoffen (Tiefbau und Hochbau) mit dem Ziel, diese über Steckbriefe auf einer Internetplattform zusammenzuführen. Dies ist eine zentrale Informationsgrundlage für Universitäten und Hochschulen aber auch Institutionen aus der Berufsausbildung, bei der Zusammenstellung von Exkursionszielen bzw. Integration von Praxisbeispielen und der fachlichen Austausch mit den entsprechenden Personen in die Ausbildung. Auf diese Plattform können dann auch weitere Informationen wie bspw. zu Regelwerken zusammengeführt werden.

### **Anpassung der Curricula**

Analyse der bestehenden Curricula der verschiedenen Studiengänge aber auch außeruniversitärer Ausbildung aus dem Bausektor auf den Lehrinhalt Baustoffkunde und der Verankerung von Unterrichtsinhalten zu RC-Baustoffen aus allen Arten von Einsatzbereichen (Tiefbau; Hochbau; klassischer Erdbau). Darauf aufbauend gilt es dann, im intensiven Austausch mit den einzelnen Einrichtungen Konzepte zu entwickeln, wie diese um den Aspekt Herstellung und Einsatz ressourcenschonender Baustoffe erweitert werden können.

### **Fachsymposium zu R-Beton und anderen Ansätzen zur Steigerung der Ressourceneffizienz im Bau**

Weiterführung der Veranstaltungsreihe im Jan/Feb 2017; Inhaltliche Planung, Auswahl der Referenten und Exkursionsziele sowie Unterstützung bei Organisation und Durchführung

# Literaturverzeichnis

---

- [Aichele 2015] Aichele, Hagen, Einsatz in einem Mehrfamilienwohnhaus in Weilheim/Teck, Vortrag auf dem Fachsymposium zu R-Beton, März 2015
- [BGR 2013] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Deutschland - Rohstoffsituation 2012, Hannover 2013
- [Binder 2013] Binder, Produktbeschreibung Schwertwäsche. (2013). [Internet] Website: [http://www.binder-co.com/de/produkte/nass\\_aufbereiten/schwertwaesche/schwertwaesche.php](http://www.binder-co.com/de/produkte/nass_aufbereiten/schwertwaesche/schwertwaesche.php); abgerufen Oktober 2013
- [Breit 2015] Prof. Breit, Gutachterliche Stellungnahme zur Erlangung einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE), Bauvorhaben Waagenhaus und Stützmauer der Fa. Schief Entsorgungstechnik GmbH & Co. KG Winnenden, Kaiserslautern Januar 2015
- [btu 2011] Mettke, A.; Heyn, S.; Spyra W., Ökologische Prozessbetrachtungen – RC-Beton (Stofffluss, Energieaufwand, Emissionen). (2010). Fakultät Umweltwissenschaften und Verfahrenstechnik. Brandenburgische Technische Universität Cottbus
- Bundesministerium des Inneren, Leitfaden Ressourceneffiziente Beschaffung, Januar 2014
- [cde 2014] Fa. CDE global, Bild des Schwertwäschers ROTOMAX
- [Gasafi et al. 2006] Gasafi, E.; Jeske, U., Reinhardt, T., Gipsreduktion mit Kohlenstoff. (2006). Wissenschaftliche Berichte Forschungszentrum Karlsruhe 7189
- [ifeu 2002] ifeu-Institut, Bewertung der Umweltverträglichkeit von Entsorgungsoptionen. Methodenentwicklung und Durchführung einer vereinfachten Bewertung und deren beispielhafte Überprüfung anhand vier Abfallarten, unter Koordination der abag- itm, Heidelberg 2002
- [ifeu et al. 2013] Stoffkreisläufe von RC-Beton. Informationsbroschüre für die Herstellung von Transportbeton unter Verwendung von Gesteinskörnungen nach Typ 2, veröffentlicht durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft, Stuttgart 2013
- [ifeu et al. 2014] ifeu-Institut; Fa. Feess; Institut Dr. Haag, Gezielte Aufbereitung von Bauschutt zur Einhaltung auch zukünftiger Sulfatgrenzwerte, Informationsbroschüre im Auftrag des Umweltministeriums Baden-Württemberg, März 2014
- [Institut Dr. Haag 2015] Institut Dr. Haag Kornwestheim, Prüfzeugnis FSS RC 0/56 Z 1.1, Februar 2015
- [Institut Dr. Haag, 2015] Institut Dr. Haag Kornwestheim, Prüfbericht Nr. 83860-2, Prüfung gemäß DIN EN 12620 Gesteinskörnungen für den Beton und Umweltverträglich-

keit gemäß DIN 4226-100 / LAGA M20, Februar 2015 sowie Prüfbericht Nr. 83860-1, Prüfung gemäß TL SoB-StB 04, Februar 2015

[Köhnk 2013] Köhnk, Diethelm et al., Verfahren zur spontanen Fällung von in Wasser gelösten Sulfaten als Etringit. (1994). [Internet] (2013) Website: <http://www.patent-de.com/19940224/DE4227815A1.html>; abgerufen im November 2013

[Kreislaufwirtschaftsträger Bau 2015] <http://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/#testimonials>

[Landmann 2012] Landmann, M.; Seifert, G., Schnell, L., Abschlussbericht: Aufschlussverfahren zur Trennung von Verbundkonstruktionen im Mauerwerksbau. (2012). IAB – Institut für Angewandte Bauforschung Weimar gGmbH, Bauhaus-Universität Weimar

[Lieber / Dziadek 2015] Lieber, R.; Dziadek, B., Ergebnisse aus Laborversuchen und einem Demonstrationsvorhaben, Vortrag auf dem Fachsymposium in Stuttgart zu R-Beton am 23. März 2015

[Müller 2013] Müller, A., Palzer, U., Rübner, K., Schnell, A., Aufbaukörnungen – Eine neue thermisch gebundene leichte Gesteinskörnung mit hoher Ressourceneffizienz – Leichtbeton. (2013). BFT INTERNATIONAL 02/2013 Vol. 79. S. 124-126

[Scherer + Kohl 2014] Fa. Scherer + Kohl, Ludwigshafen, Bild zum händischen Ausbau von Gipsbaustoffen vor dem Rückbau des Gebäudes

[Schnell 2012] Schnell A.; Mueller A.; Rübner, K., Entwicklung von Mauerwerksbruch für die Betonherstellung/Verbesserung der Materialeffizienz durch innovative Baustoffe.

[Schnell 2013] Innovative Technologien zur Ressourceneffizienz in rohstoffintensiven Prozessen, veröffentlicht im Fraunhofer-Verlag (Stuttgart); Karlsruhe August 2013

[Weimann 2009] Weimann, K., Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik. (2009). Fakultät Bauingenieurwesen. Dissertation. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar