

Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungs-
vorhaben „R-Beton - Ressourcenschonender
Beton – Werkstoff der nächsten Generation“

Schwerpunkt 3:
Ökobilanz, Praxistest und Transfer

von

Raymund Böing
Florian Knappe
Christoph Müller
Jochen Reiners
Joachim Reinhardt
Stefanie Theis

Herausgeber:

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
Budapester Straße 31
10787 Berlin
info@dafstb.de

© 2022 Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V.
Budapester Straße 31
10787 Berlin

Telefon: +49 30 2693-1320
Telefax: +49 30 2693-1319
Internet: www.dafstb.de
Email: info@dafstb.de

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung außerhalb der Grenzen des Urheberrechts ist ohne schriftliche Zustimmung des Verlages unzulässig und strafbar. Das gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung in elektronischen Systemen.

Die im Werk enthaltenen Inhalte wurden vom Verfasser und Verlag sorgfältig erarbeitet und geprüft. Eine Gewährleistung für die Richtigkeit des Inhalts wird gleichwohl nicht übernommen. Der Verlag haftet nur für Schäden, die auf Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit seitens des Verlages zurückzuführen sind. Im Übrigen ist die Haftung ausgeschlossen.

Druck: Medienhaus Plump GmbH, Rheinbreitbach

Gedruckt auf säurefreiem, alterungsbeständigem Papier nach DIN EN ISO 9706

ISSN 0171-7197
ISBN 978-3-410-65857-3

Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungs-
vorhaben „R-Beton - Ressourcenschonender
Beton – Werkstoff der nächsten Generation“

Schwerpunkt 3:
Ökobilanz, Praxistest und Transfer

von

Dipl.-Ing. Raymund Böing
Dipl.-Geograph. Florian Knappe
Dr.-Ing. Christoph Müller
Dipl.-Ing. Jochen Reiners
Dipl.-Geoökologe Joachim Reinhardt
Dipl.-Mineralogin Stefanie Theis

1. Auflage 2022

Herausgeber:
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. – DAfStb

(Leerseite)

GESAMTÜBERBLICK

Die Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsprojekt R-Beton – Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation sind in den Heften 639, 640 und 641, aufgeteilt auf drei thematische Schwerpunkte, werden in der Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton veröffentlicht. Das gemeinsam in allen drei Heften abgedruckte Vorwort stellt das Gesamtprojekt mit seinen Zielen, Hintergründen und der Projektstruktur vor. Die Inhalte der einzelnen Hefte sind nachfolgend gelistet.

Heft 639

Schwerpunkt 1: Konzeptionierung der neuen Werkstoffe

Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme unter Berücksichtigung des prognostizierten Aufkommens (Teilvorhaben 1)

Von Florian Knappe, Joachim Reinhardt und Stefanie Theis

Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme aus Sicht der RC-Gesteinskörnungsherstellung und Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Anpassung (Teilvorhaben 2)

Von Stephan Kresser

Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung (Teilvorhaben 3)

Von Julia Scheidt und Wolfgang Breit

Entwicklung von neuen hochleistungsfähigen R-Zusatzmitteln für die Herstellung von R-Beton (Teilvorhaben 4)

Von Klaus Lorenz und Bernhard Sachsenhauser

Verwendung von feinen Gesteinskörnungen bei der Zementherstellung (Teilvorhaben 5)

Von Christoph Müller und Katrin Severins

Frischbetonrecycling (Teilvorhaben 6)

Von Johannes Haufe und Anya Vollpracht

Heft 640

Schwerpunkt 2: Praxisanforderungen an die neuen Werkstoffe

Berücksichtigung der Bemessungsansätze nach EC 2 (Teilvorhaben 3)

Von Aleksandar Pančić und Jürgen Schnell

Entwicklung praxistauglicher Ansätze zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von RC-Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung (Teilvorhaben 5)

Von Christoph Müller, Ingmar Borchers und Maik Seidel

Entwicklung von Verfahren zum praxisgerechten Umgang mit umweltrelevanten Merkmalen (Teilvorhaben 6)

Von Anya Vollpracht und Lia Weiler

Heft 641

Schwerpunkt 3: Ökobilanz, Praxistest und Transfer

Ökobilanzierung im Bereich der Betonanwendung sowie der RC-Gesteinskörnungsherstellung (Teilvorhaben 1)

Von Florian Knappe, Joachim Reinhardt und Stefanie Theis

Ökobilanzierung aus Sicht des Zement- und des Betonherstellers (Teilvorhaben 5)

Von Christoph Müller und Jochen Reiners

R-Beton aus Sicht der praxisgerechten Anwendung und Koordination des Gesamtvorhabens (Teilvorhaben 7)

Von Raymund Böing

INHALTSVERZEICHNIS

Vorwort

Von Raymund Böing, Wolfgang Breit und Julia Scheidt.....6

Ökobilanzierung im Bereich der Betonanwendung sowie der RC-Gesteinskörnungsherstellung (Teilvorhaben 1)

Von Florian Knappe, Joachim Reinhardt und Stefanie Theis.....19

Ökobilanzierung aus Sicht des Zement- und des Betonherstellers (Teilvorhaben 5)

Von Christoph Müller und Jochen Reiners.....66

R-Beton aus Sicht der praxisgerechten Anwendung und Koordination des Gesamtvorhabens (Teilvorhaben 7)

Von Raymund Böing.....111

VORWORT

Motivation und Gesamtziel des Verbunds

Die Verringerung des Rohstoff- und Materialverbrauchs gehört zu den wesentlichen Herausforderungen unserer Zeit. Ein effizienter Umgang mit natürlichen Ressourcen ist eine zentrale Forderung, die auch die Wettbewerbsfähigkeit eines Sektors beeinflusst. Gerade das Bauwesen ist aufgrund seines hohen Materialbedarfs eine Schlüsselwirtschaft zur Erzielung spürbarer Fortschritte auf diesem Gebiet. Bei einer jährlichen Betonherstellung in Deutschland von ca. 100 Mio. m³ besteht ein großes Optimierungspotenzial. Etwa die Hälfte dieser Menge wird als Konstruktionsbeton verbaut. Der übrige Teil wird für technisch weniger anspruchsvolle Betone in Betonwaren, Verdämmungen im Bergbau etc. verwendet.

Im Allgemeinen fallen bei Bautätigkeiten große Mengen an mineralischen Abfällen (Beton, Mauer-, Ziegel-, Kalksandsteine, etc.) an, die nach entsprechender Aufbereitung als rezyklierte Gesteinskörnung in den Baustoffkreislauf zurückgeführt werden und somit einen Beitrag zur Schonung von natürlichen Ressourcen leisten können.

Der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion wird in einer Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton geregelt [1]. Bisher kommt diese Richtlinie nur in begrenztem Umfang zur Anwendung. Anforderungen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit und eng begrenzte Stoffmengen sowie der Ausschluss von feiner rezyklierter Gesteinskörnung (≤ 2 mm) schränken die Verwendbarkeit von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion stark ein.

Während aufgrund vorgenannter Randbedingungen sich der Einsatz von R-Beton (Ressourcenschonender Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung) in Deutschland auf wenige Pilotprojekte beschränkt, liegen sowohl in der benachbarten Schweiz, als auch in den vergleichsweise, rohstoffarmen Niederlanden mittlerweile viele positive Erfahrungen mit der hochwertigen Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Beton vor. Die umfangreichen Anwendungen aus der Schweiz zeigen, dass sich bei entsprechenden Randbedingungen bis zu 90 % des gesamten Betonbedarfs aus dem konventionellen Hochbau über R-Betone abdecken lassen. Die Untersuchungen aus der Schweiz belegen darüber hinaus, dass auch R-Betone hergestellt und verwendet werden können, die nahezu aus 100 % rezyklierter Gesteinskörnung bestehen.

Auch die Entwicklungen im Bereich der europäischen Betonnorm dokumentieren durch die Aufnahme von rezyklierter Gesteinskörnung, dass dieser mineralische Wertstoff eine wichtige und unverzichtbare Ressource für die zukünftige Betonproduktion darstellt.

Vor diesem Hintergrund haben sich die Verbundpartner die Frage gestellt, wieso sich in Deutschland, einem der innovativsten Länder Europas und der Welt, rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonproduktion als ressourcenschonende Ausgangstoffalternative noch nicht etabliert hat. Die Antwort liegt betontechnologisch betrachtet in den zahlreichen restriktiven Randbedingungen begründet, die für eine praxisgerechte Verwendung kaum einen Anreiz, aber eine Reihe von Hemmnissen bieten. Erklärtes Ziel der Verbundpartner war es, die aufgezeigten Schwierigkeiten auf der Basis von wissenschaftlichen Untersuchungen auszuräumen und somit dazu beizutragen, dass in der Zukunft der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung, wenn bei ganzheitlicher Betrachtung sinnvoll, eine breite praktische Anwendung erfährt. Nicht zuletzt sollen die Ergebnisse dazu dienen, eine dem neuen Stand der Technik entsprechende Anpassung der Normen und Richtlinien vorzunehmen.

Stand von Wissenschaft und Technik und daraus abgeleiteter Problem- und Fragestellungen

Die Einsatzmöglichkeiten von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion werden in Deutschland bislang nur wenig genutzt, obwohl der damit hergestellte Beton über die Bezugnahme auf die entsprechende DAfStb-Richtlinie [1-3] ein bauaufsichtlich akzeptierter Baustoff ist. Mit Ausnahme von Pilotprojekten, wie z. B. der Waldspirale in Darmstadt und dem Boarding House in Ludwigshafen, sowie den darauf aufbauenden wenigen weiteren Bauvorhaben, wurden und werden kaum Bauwerke mit Beton unter Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung errichtet. Selbst in öffentlichen Ausschreibungen finden diese Betone bisher wenig Berücksichtigung. Eine Anwendung der DAfStb-Richtlinie zur Herstellung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnung fand vor Projektstart praktisch fast nicht statt. Anforderungen hinsichtlich der Umweltverträglichkeit und die Begrenzung der Stoffmengen sowie der Ausschluss von feiner rezyklierter Gesteinskörnung schränken die Verwendbarkeit von rezyklierten Materialien als Gesteinskörnung für Beton stark ein.

Hinzu kommt, dass die Stoffströme der mineralischen Bauabfälle heute im Wesentlichen in den Bereich untergeordneter Anwendungen gelangen und keinen Zugang zu höherwertiger bzw. im eigentlichen Sinne gleichwertiger Verwendung im Betonbau erfahren. Ziel des Projektes war es deshalb, die aufgezeigten Schwierigkeiten auf der Basis von wissenschaftlichen Untersuchungen auszuräumen und somit dazu beizutragen, dass in der Zukunft der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion eine breitere praktische Anwendung als „R-Beton“ erfährt.

Folgende technische Problem- bzw. Fragestellungen wurden identifiziert, die sich als Hemmnis in der praktischen Anwendung darstellen:

- A Verwendung feiner rezyklierter Gesteinskörnung ≤ 2 mm derzeit nicht erlaubt
- B Anwendungsbeschränkungen bei groben rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm bezüglich Zusammensetzung (nur Typen 1 und 2), Einsatzmengen und Festigkeitsbereich des Betons ($\leq C30/37$)
- C Einstufung der rezyklierten Gesteinskörnung bei unbekannter Herkunft (Regelfall für Recycling Hersteller) in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S (AKR-Problematik) und damit eingeschränkte Einsatzmöglichkeiten für Beton
- D Anwendung der Geringfügigkeitsschwellenwerte als nationale Festlegung erfordert eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für rezyklierte Gesteinskörnungen hinsichtlich umweltrelevanter Merkmale (Umweltvorsorge)
- E Beschränkung der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung aus nicht gebrauchtem Beton auf 5 M.-% (Frischbetonrecycling)

Bei Verlassen der Anwendungsgrenzen der DAfStb-Richtlinie:

- F Festlegung von Bemessungsregeln (ggf. Abweichung von Eurocode 2)

Darüber hinaus ist eine ökologische Bewertung vorzunehmen:

- G Ökologische Bewertung der im Projekt erarbeiteten Lösungsansätze

Attraktivität des Lösungsansatzes

R-Beton ist ein innovativer, zukunftssträchtiger Baustoff der das Potenzial hat, der Werkstoff der nächsten Generation zu werden. Aufgrund der bestehenden Regelungen, die auf den Forschungsstand der 90er Jahre zurückgehen, und der bereits erläuterten Hemmnisse konnte sich der Baustoff bisher jedoch nicht am Markt durchsetzen und würde es unter den aktuell gegebenen Randbedingungen auch nicht. Das Vorhaben R-Beton ist das Problem der Umsetzungsschwierigkeiten von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnung von allen Seiten angegangen, mit dem Ziel, diese auszuräumen und das vorhandene Anwendungspotenzial des R-Betons zukünftig in allen Bereichen der Betonbauweise ausschöpfen zu können. Insbesondere die vielseitigen innovativen Entwicklungen im Bereich der Betonzusatzmittel in den zurückliegenden zehn Jahren ließen vor Projektstart bereits für den Bereich des R-Betons Leistungssprünge durch die Einführung hochleistungsfähiger Zusatzmittel erwarten. Diese sollten dazu beitragen, dass oft unterschiedliche Wasseraufnahmevermögen der rezyklierten Gesteinskörnung zu kontrollieren und beherrschbar zu machen. In Kombination mit maßgeschneiderten konsistenzhaltenden Fließmitteln könnte so die für die Praxis notwendige Verarbeitbarkeitszeit zielsicher eingestellt werden. Die unmittelbare Rückkopplung im Projekt zwischen den Optimierungsprozessen beim Baustoffrecyclingunternehmen durch Einflussnahme auf die gezielte Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen auf der einen Seite und beim Betonhersteller durch gezielte Auswahl und Zusammenstellung der Ausgangskomponenten auf der anderen Seite führten zu neuen Betonzusammensetzungen und Erkenntnissen, die eine Überarbeitung der Regelwerke ermöglichen und zukünftig zu deutlich praxisnäheren Anwendungsregeln für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen beitragen werden.

Zum Nachweis der Alkaliempfindlichkeit von Betonen wurden in den letzten Jahren neue Verfahren entwickelt und erprobt [4, 5]. Im Rahmen des Projekts wurden diese genutzt, um die Alkaliempfindlichkeit von Betonen unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen praxisnah bewerten zu können. Auf Basis der Projektergebnisse wurde die DAfStb Alkali-Richtlinie überarbeitet, was in diesem Fall jedoch zu einer Verschärfung des Regelwerks geführt hat. Eine vergleichbare praxisgerechte Zielsetzung wurde auch für den Bereich der Umweltvorsorge verfolgt. Die wesentliche Regelungslücke im Bereich der Umweltvorsorge, welche vor Projektbeginn ein maßgebliches Hemmnis für die praktische Anwendung von R-Beton darstellte, konnte während der Projektlaufzeit geschlossen werden.

Bezüglich des Einsatzes feiner rezyklierter Gesteinskörnung, die derzeit nicht verwendet werden darf, wurden zwei hochwertige, erfolgversprechende Verwertungswege in der Zement- und Betonindustrie aufgezeigt.

Auch im Frischbetonrecycling wurden vollkommen neue Wege beschriften [6]. Entgegen der üblichen Praxis des aufwendigen Auswaschens von nicht gebrauchtem Frischbeton wurden Verfahren erforscht, die die unmittelbare Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Fahrmischer erlauben. Eine möglicherweise richtungsweisende Erforschung, die sich in der gesamten Transportbetonindustrie durchsetzen könnte.

R-Beton Konsortium

HeidelbergCement AG (Leiter des Konsortiums) ist einer der größten Baustoffhersteller weltweit. Die Kernaktivitäten des Unternehmens umfassen die Herstellung und den Vertrieb von Zement und Zuschlagstoffen, den beiden wesentlichen Rohstoffen für die Herstellung von Beton. Aktivitäten in der Herstellung von Transportbeton, von Betonprodukten und Betonelementen ergänzen die Produktpalette. Eine nachhaltige Rohstoff-sicherung hat bei HeidelbergCement eine große Bedeutung. Hierzu gehört auch der Einsatz von rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonproduktion.

Scherer & Kohl GmbH mit ihrer über 50-jährigen Firmengeschichte ist eines der leistungsfähigsten Dienstleistungsunternehmen in der Metropolregion Rhein-Neckar. Durch innovative Verfahren werden in drei Aufbereitungsanlagen mit ca. 130.000 qm Betriebsfläche mineralische Abfälle, die bei eigenen und fremden Abbruch- und Rückbauarbeiten anfallen, zu qualitätsgesicherten Ersatz-Baustoffen aufbereitet und einer stofflichen Verwertung bzw. Entsorgung zugeführt. Gleichzeitig werden Zwischenlager für gefährliche Abfälle an den Firmenstandorten Mannheim und Ludwigshafen (jeweils bis LAGA Z5) genutzt. Durch Be- und Entlade-möglichkeiten für Schiffe, Gleisanschluss, unmittelbare Autobahnanbindung und den umfangreichen Gerätepark sind effektive Fertigungs- und Transportmöglichkeiten gegeben.

BASF Construction Polymers GmbH, GB Betonzusatzmittel, gehört zum Unternehmensbereich Bauchemie der BASF SE, dem weltweit führenden Chemieunternehmen. Das Unternehmen entwickelt und vertreibt Betonzusatzmittel und Bauhilfsstoffe, wie z. B. Betontrennmittel und Betonnachbehandlungsmittel, und ist in diesem Bereich einer der führenden Anbieter auf dem deutschen Markt. Mit dem Fokus auf Innovation und technischer Kompetenz hat BASF Construction Polymers GmbH maßgeblich die Entwicklung und Markteinführung der wesentlichen Neuerungen auf diesem Gebiet, z. B. der Hochleistungsfließmittel auf PCE-Basis und Erhärtungsbeschleuniger für Beton, mitgeprägt. Dabei lag das Augenmerk immer auch auf der Nachhaltigkeit der angebotenen Problemlösungen.

Die **VDZ Technology gGmbH** (Verein Deutscher Zementwerke e.V.) bzw. ihre Mitarbeiter verfügen über umfangreiche Erfahrungen und herausragende Kompetenzen für die in diesem Projekt relevanten Fragestellungen (siehe [7-13, 4, 5]):

- Verwendung von Brechsanden ≤ 2 mm in verschiedenen Anwendungsbereichen
- Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm zur Herstellung von Beton
- Herstellung und Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen
- Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion
- Ökobilanzierung und Erarbeitung von EPDs

Das **IFEU-Institut Heidelberg** (Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg gGmbH) ist ein Umweltforschungsinstitut und hat in den letzten Jahren zahlreiche Arbeiten zur Optimierung der Aufbereitung und Verwertung von mineralischen Bauabfällen in Richtung der Herstellung von hochwertigen güteüberwachten Bauprodukten durchgeführt. In diesem Zusammenhang hat das IFEU, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, ein erstes Projekt konzipiert und geleitet, in dem R-Beton gemäß der bestehenden Regelwerke in einem konkreten Bauvorhaben der GAG in Ludwigshafen [14] eingesetzt wurde. Ausgehend von diesem Projekt wurden weitere ähnliche Projekte in Baden-Württemberg initiiert und begleitet [15].

Das **Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac)** besitzt seit über 20 Jahren einen Forschungsschwerpunkt im Bereich „Umweltverträglichkeit zementgebundener Baustoffe“ (s. [16-19]). Bereits frühzeitig rückte dabei auch die Verwertung von Recyclingmaterialien in den Fokus [10, 20]. Auch grundlegende Forschungsarbeiten zum Brechsandrecycling wurden am ibac durchgeführt [7].

Die **Technische Universität Kaiserslautern** ist mit den Fachgebieten Werkstoffkunde im Bauwesen (Professor Breit, Initiator des Verbundvorhabens) und Massivbau und Baukonstruktion (Professor Schnell) an dem Projekt beteiligt. Das Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen ist fortlaufend in verschiedenen Forschungsprojekten mit der Erforschung und Entwicklung zielgerichtet optimierter Betone befasst. Ein weiterer Schwerpunkt war die Prüfung und Überwachung von Gesteinskörnungen für den Beton- und Straßenbau. Hierzu gehören u. a. auch rezyklierte Gesteinskörnungen. Das Fachgebiet Massivbau und Baukonstruktion ist in vielfältiger Weise mit der Entwicklung, Konstruktion und Bemessung von Betonbauteilen befasst. Professor Schnell war Vorsitzender des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) und Fachkollegiat der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG).

Assoziierte Partner

MAPEI, 1937 in Mailand gegründet, ist heute der weltweit größte Hersteller von Klebstoffen, Abdichtungen und chemischen Produkten für das Baugewerbe. Heute gehören zum MAPEI-Konzern 68 Tochtergesellschaften mit 63 Werken. Die Gruppe ist in mehr als 31 Ländern auf allen fünf Kontinenten aktiv. MAPEI verfügt über ein weltweites Netz von Vertriebs- und Technikexperten. Mehr als 5 % des Jahresumsatzes werden in die Forschungsarbeit, davon 70 % in die Entwicklung umweltschonender, nachhaltiger Produkte, investiert.

Die **Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. (FTB)** fördert Wissenschaft und Forschung zur naturwissenschaftlich-technischen Erforschung des Baustoffs Transportbeton mit dem Ziel, die Bauweise für sowohl Mitgliedsunternehmen als auch den Verbraucher und damit die Öffentlichkeit zu optimieren.

Partner im Unterauftrag

Spenner Zement GmbH und Co. KG produziert eine breite Palette leistungsfähiger Zemente, die als Grundlage zur Entwicklung von Zementen mit feiner rezyklierter Gesteinskörnung dienen können. Ein Mehrkammermischsilo ermöglicht es, Kompositzemente und Sonderprodukte individuell zu entwickeln und mit höchster Präzision zu mischen. Spenner Zement hat sich in der Vergangenheit intensiv an verschiedenen Forschungsvorhaben zur Entwicklung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen beteiligt. Spenner Zement erforscht zurzeit in Kooperation mit der VDZ Technology gGmbH die Prozessbedingungen zur optimalen Herstellung eines kalksteinhaltigen Zementes.

Nahezu alle Projektpartner arbeiten in zahlreichen Normenausschüssen mit, die in direktem Bezug zum beantragten Projekt stehen, so unter anderem in den DIN-Normenausschüssen Gesteinskörnungen, Betontechnik bzw. dem KOA Hygiene, Gesundheit und Umwelt.

Arbeitsinhalte

Auf der Basis der beschriebenen Problemstellung und der formulierten Zielsetzungen wurden drei Schwerpunkte mit insgesamt dreizehn Arbeitspaketen (AP) zusammengestellt:

- Schwerpunkt I: Konzeptionierung der neuen Werkstoffe (AP 1 bis AP 6)
- Schwerpunkt II: Praxisanforderungen an R-Beton (AP 7 bis AP 9)
- Schwerpunkt III: Ökobilanz, Praxistest und Transfer sowie Koordination (AP 10 bis AP 13)

Die Vernetzung der einzelnen Arbeitspakete ist vielfältig und kann bezüglich der direkten Abhängigkeiten aus Bild 1 entnommen werden. Die Zuordnung der Arbeitspakete zu den jeweiligen Teilvorhaben und Partnern geht aus Tabelle 1 hervor.

Schwerpunkt I: Konzeptionierung der neuen Werkstoffe

AP 1: Ermittlung praxisrelevanter Stoffmassenströme

Aufgabe des AP 1 war es, praxisrelevante Stoffmassenströme zu ermitteln und festzulegen. Zahlreiche der bisherigen Untersuchungen basieren auf der Auswahl von optimierten aber unter dem Aspekt der Produktionsmöglichkeiten eines Baustoffrecyclingunternehmens wenig praxisgerechten rezyklierten Gesteinskörnungsfractionen. Bei der Festlegung der Stoffmassenströme waren deshalb folgende Punkte zu berücksichtigen: Produktionstechniken und deren Optimierungsmöglichkeiten (AP 5), Verfügbarkeit der Abbruchmaterialien (Mengen, Arten), Gleichmäßigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung, Mindestanforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen für die Betonherstellung (AP 3), Einschränkungen bei den Abbruchmaterialien vor dem Hintergrund der Umweltverträglichkeit (AP 9), Wirtschaftlichkeit. Unter der Voraussetzung, dass ein kontinuierlicher Massenstrom an rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonherstellung sichergestellt ist, und die Transportbetonindustrie ohne weitere aufwändige Prüfungen darauf zurückgreifen kann, kann von einer flächigen und marktgreifenden Umsetzung von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung in der Praxis ausgegangen werden.

AP 2: Verwendung von feiner rezyklierter Gesteinskörnungen

AP 2.1: Werkstoff für die Zementherstellung

Aufbauend auf den grundlegenden Untersuchungen zur Verwendung von feiner rezyklierter Gesteinskörnung zur Herstellung von Portlandzementklinker in [10] wurden in weiteren Untersuchungen die Randbedingungen für eine Anwendung in breiterer betrieblicher Praxis ausgelotet:

- Sensitivitätsanalysen von feiner rezyklierter Gesteinskörnung aufbauend auf [10]. Im Mittelpunkt stand die Analyse der Zusammensetzung der feinen rezyklierten Gesteinskörnung über einen angemessen langen Zeitraum hinweg. Zementwerkseitig war zu beurteilen, ob die Schwankungsbreite im Prozess unter großtechnischen Produktionsbedingungen akzeptabel ist.
- Praxisorientierte Grundlagenuntersuchungen zur Verwendung gemahlener feiner rezyklierter Gesteinskörnung als Neben- (bis 5 M.-%) bzw. Hauptbestandteil (≥ 6 M.-%) und deren Einflussnahme auf die Zementigenschaften nach DIN EN 197-1.
- Orientierend ausgewählte Frisch- und Festbetoneigenschaften unter Verwendung der mit feiner rezyklierter Gesteinskörnung hergestellten Zemente.

AP 2.2: Werkstoff für die Betonherstellung

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalysen aus AP 2.1 gingen unmittelbar auch in AP 2.2 mit ein und führten zu einer Bewertung im Hinblick auf die Verwendbarkeit im Beton. Im Rahmen vergleichender Untersuchungen standen im AP 2.2 zunächst die Einflüsse der feinen rezyklierten Gesteinskörnung auf die Verarbeitbarkeit im Vordergrund. Verschlechterungen wurden durch Veränderungen in der Sieblinie sowie durch neu konzipierte R-Zusatzmittel (AP 4) kompensiert. Im Rahmen der Festbetonuntersuchungen standen mechanische Kenngrößen (Druckfestigkeit) sowie die Verformungseigenschaften (E-Modul, Schwinden) im Vordergrund.

AP 3: Verwendung von groben rezyklierten Gesteinskörnungen

Im Rahmen des AP 3 galt es mehrere Ansätze zur Verwertung der groben rezyklierten Gesteinskörnungen zu verfolgen (AP 3.1 Höhere Anteile der Typen 1 und 2, AP 3.2 Einsatz von Mauerwerksplitt (Typ 3), AP 3.3 Ausdehnung auf den gesamten normalfesten Beton, AP 3.4 Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung mit geringeren Anforderungen, AP 3.5 Beton mit 100 % rezyklierter Gesteinskörnung), die sich aus den Einschränkungen der bislang gültigen DAfStb-Richtlinie [1] ergaben. Neben den üblichen Fragestellungen im Themenkomplex Frischbeton standen im AP 3 die Festbetoneigenschaften (Festigkeit, Elastizitätsmodul, Schwinden, Dauerhaftigkeit) im Vordergrund. Es erfolgte ein ständiger Abgleich zu AP 4 R-Zusatzmittel und AP 6 Bemessung (EC2-Anforderungen). Sich daraus ergebende Vorgaben für „Wunsch“ rezyklierte Gesteinskörnungen wurden

in AP 5 auf Realisierbarkeit geprüft. Für AP 8 und 9 wurden die notwendigen Probekörper hergestellt. Aus AP 8 wurde eine unmittelbare Einflussnahme auf die Betonzusammensetzungen erwartet (z. B. Begrenzung des Zementgehaltes). Das AP 3 stand als zentrales Arbeitspaket in Verbindung mit nahezu allen anderen AP (siehe auch Bild 1).

AP 4: Neuartige hochleistungsfähige R-Zusatzmittel für R-Beton

Betonzusatzmittel sind Stoffe, die dem Beton zugesetzt werden, um durch chemische oder physikalische Wirkung Eigenschaften des Frisch- oder Festbetons zu verändern. Das Design der Zusatzmittel konnte in den letzten Jahren immer weiter verbessert werden. Es kann heute individuell auf die speziellen Belange und Anforderungen neuer Betone angepasst werden. Im Rahmen dieses AP wurden für die Anforderungen der R-Betone aus den AP 2 und 3 hochleistungsfähige R-Zusatzmittel designed. Hierbei handelte es sich um einen iterativen Prozess zwischen den beteiligten Partnern des AP 4 und AP 3. Im Ergebnis wurde für die klassischen Sparten Transport- und Fertigteilbeton ein Betonzusatzmittel für R-Beton konfektioniert.

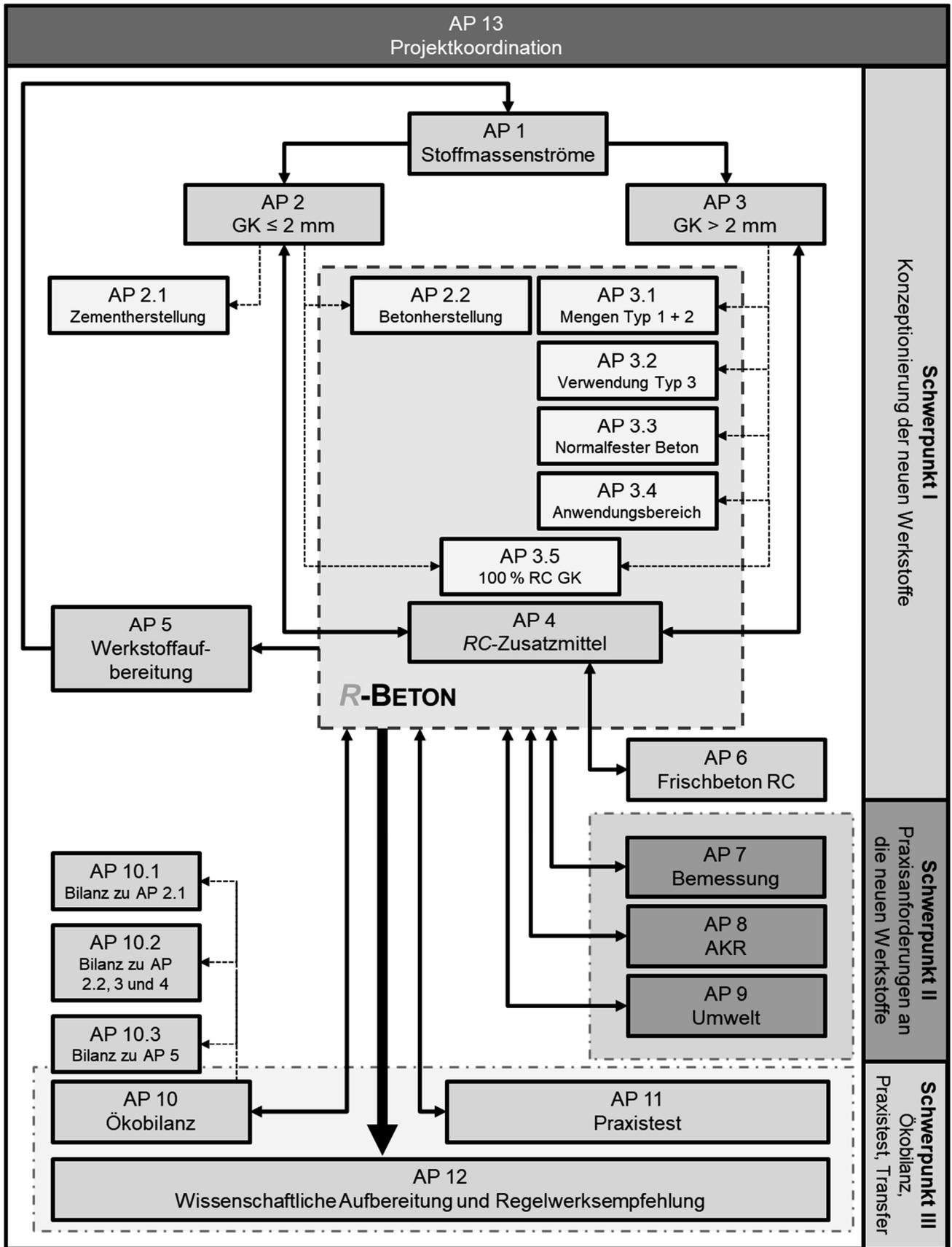


Bild 1: Schwerpunkte, Arbeitspakete und Vernetzung der Arbeitspakete

AP 5: Optimierung der Produktion rezyklierter Gesteinskörnung

Aus AP 2 und 3 wurden über die Projektierung von Betonzusammensetzungen zugleich auch Randbedingungen für Sieblinien und Eigenschaften der Gesteinskörnung beschrieben. Weitere Anforderungen ergaben sich aus AP 9 (Umweltverträglichkeit). In AP 5 galt es, Strategien zu erforschen, wie die Produktion dieser rezyklierten Gesteinskörnung bei einem Baustoffrecyclingunternehmen unter den vorgenannten Anforderungen optimiert und in einen gleichmäßigen Produktionsablauf eingebunden werden kann. Sollen die definierten Mischungen durch die Baustoffrecyclingunternehmen hergestellt werden, stellte sich bspw. die Frage der Notwendigkeit von Dosiereinrichtungen. Zu prüfen war, welcher Brechertyp eingesetzt werden muss und inwieweit die Aufbereitung über verschiedene Brecher erfolgen kann. Ebenso war zu prüfen, ob zur Abscheidung von (leichten) Fremdstoffen andere, effizientere Technologien eingesetzt werden müssen. AP 5 stand damit in engem Zusammenhang mit AP 2, 3 und 9.

AP 6: Frischbetonrecycling

Die Untersuchungen zum innovativen Frischbetonrecycling durch Zugabe eines zweikomponentigen Reaktionsmittels unmittelbar im Transportbetonfahrzeug gliederten sich in zwei Teilbereiche. Im ersten Teil waren Empfindlichkeit und Anwendungsgrenzen des Verfahrens aufzuzeigen. Insbesondere der Einfluss der Zementart, variierender Wassergehalte im Beton und der Einfluss von Betonzusatzmitteln auf die Wirkung des Systems wurden ermittelt. Weiterhin war zu prüfen, inwiefern die hergestellte Gesteinskörnung den Anforderungen an DIN EN 12620 genügt. An verschiedenen Zusammensetzungen wurde der Einfluss der Gesteinskörnung aus rezykliertem Frischbeton auf die Eigenschaften des damit hergestellten Betons sowohl im Frisch- als auch im Festbeton ermittelt. Ziel der Untersuchungen war eine Einschätzung bzgl. der Eignung des neuen Verfahrens zur Verwertung der damit hergestellten Gesteinskörnung.

Schwerpunkt II: Praxisanforderungen an R-Beton

AP 7: Bemessung von R-Beton

Für die in die engere Wahl gezogenen Betonzusammensetzungen waren die mechanischen Kennwerte (Zug- und Druckfestigkeit, Elastizitätsmodul, Verbundfestigkeit Betonstahl/Beton) sowie das Kriech- und Schwindverhalten in Standardversuchsreihen zu untersuchen. Die Ergebnisse galt es zu interpretieren und die Einordnung in bestehende Bemessungskonzepte [21] vorzunehmen. Soweit die dort vorausgesetzten Randbedingungen nicht eingehalten werden konnten, waren die Nachweisformate zu erweitern. Das Querkrafttragverhalten, das durch die Wirksamkeit der Rissverzahnung maßgeblich beeinflusst wird, wurde anhand von Bauteilversuchen evaluiert. Zusätzlich wurden experimentelle Untersuchungen zur Tragfähigkeit in Arbeitsfugen erforderlich. Im Ergebnis sollte ein geschlossenes Nachweiskonzept zur Verfügung gestellt werden, welches möglichst weitgehend an die Regeln für Normalbeton nach EC 2 anknüpft.

AP 8: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit (AKR)

Zum Nachweis der Alkaliempfindlichkeit von Betonen wurden in den letzten Jahren neue Verfahren entwickelt und erprobt, vgl. z. B. [4, 5]. Diese Verfahren wurden genutzt, um die Alkaliempfindlichkeit von Betonen unter Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen praxisnah zu bewerten. Aus diesen Untersuchungen sollten Rückschlüsse gezogen werden, inwieweit in der Zukunft ggf. auf Nachweise zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit bei Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen verzichtet werden kann.

AP 9: Umweltrelevante Merkmale

Repräsentative Proben der optimierten rezyklierten Gesteinskörnung aus AP 5 wurden im AP 9 charakterisiert. Neben der Bestimmung der Hauptbestandteile und der chemischen Zusammensetzung wurden die Schwermetallgehalte ermittelt. Als Basis der Bewertung dienten die „Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser des DIBt“ [22].

Schwerpunkt III: Ökobilanz, Praxistest und Transfer

AP 10: Ökobilanzierung

Der Rückgriff auf Gesteinskörnungen aus der Aufbereitung mineralischer Altbaustoffe muss aus ökologischer Sicht vorteilhaft sein. Im Rahmen des Projektes wurden daher drei Ökobilanzen (AP 10.1 aus Sicht der Zementherstellung, AP 10.2 aus Sicht der Betonherstellung, AP 10.3 aus Sicht der Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung) aufgestellt. Mit der Erweiterung des Produktspektrums auf feine und grobe rezyklierte Gesteinskörnung für die Zement- und Betonproduktion werden bei unverändertem Inputmassenstrom und -zusammensetzung zwangsläufig alle anderen Produktmassenströme des Altbaustoffrecyclings beeinflusst. Zu

prüfen war insbesondere, inwieweit hierdurch nicht größere Massenströme anfallen, die nur noch einer untergeordneten Verwertung oder der Entsorgung zugeführt werden können. Die Herstellung hochwertiger Produkte für die Zement- und Betonproduktion muss sich über das gesamte Spektrum an Outputmassenströmen eines Baustoffrecyclingunternehmens aus ökologischer Sicht beweisen.

AP 11: R-Beton im Praxistest

Die erforschten Ergebnisse wurden bei der Zementherstellung, im Beton-Fertigteilwerk und bei der Ortbetonherstellung auf die Praxistauglichkeit überprüft.

AP 12: Wissenschaftliche Aufbereitung und Transfer

Die Ergebnisse wurden aufbereitet und im Gesamtkontext der Zielsetzung, R-Beton flächig im Markt einzuführen, ausgewertet. Die notwendigen Multiplikatoren der Zement-, Beton- und Gesteinskörnungsindustrie waren im Projekt eingebunden. Regelwerkänderungen wurden vorbereitet und in den entsprechenden Institutionen eingebracht. Die Ergebnisse wurden an das Konsortium (WiTraBau), welches die wissenschaftlichen Begleitmaßnahmen durchgeführt hat, weitergeleitet.

AP 13: Projektkoordination R-Beton

Die Projektkoordination wurde durch die HeidelbergCement AG übernommen. Ihr oblag es die steuernden Aufgaben wahrzunehmen, die zur zielsicheren Erreichung der gesteckten Ziele notwendig waren.

Um die vorgenannten Arbeitspakete zielorientiert bearbeiten zu können wurden sieben Teilvorhabensanträge (TV) gestellt. Die inhaltliche Zuordnung der Teilvorhaben zu den im Gesamtkontext des Vorhabens dargestellten Arbeitspaketen geht aus Tabelle 1 hervor.

- TV 1: Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme unter Berücksichtigung des prognostizierten Aufkommens und Ökobilanzierung im Bereich der Betonanwendung sowie der RC-Gesteinskörnungsherstellung (ifeu Heidelberg, Förderkennzeichen 13 N 13124))
- TV 2: Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme aus Sicht der RC-Gesteinskörnungsherstellung und Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Anpassung (Scherer+Kohl GmbH, Förderkennzeichen 13 N 13122)
- TV 3: Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung unter Berücksichtigung der Bemessungsansätze nach EC 2 (Technische Universität Kaiserslautern, Förderkennzeichen 13 N 13121)
- TV 4: Erforschung von neuen hochleistungsfähigen R-Zusatzmitteln für die Herstellung von R-Beton (BASF Construction Polymers GmbH, Förderkennzeichen 13 N 13123)
- TV 5: Verwendung von feinen Gesteinskörnungen bei der Zementherstellung und deren Ökobilanzierung im Vergleich zur Verwendung bei der Betonherstellung – Erforschung praxistauglicher Ansätze zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Betonherstellung (VDZ Technology gGmbH und im Unterauftrag Spenner Zement GmbH & Co. KG, Förderkennzeichen 13 N 13125)
- TV 6: Frischbetonrecycling und Erforschung von Verfahren zum praxisgerechten Umgang mit umweltrelevanten Merkmalen (ibac RWTH Aachen und assoziierte Partner MAPEI GmbH Deutschland sowie Forschungsgemeinschaft Transportbetonindustrie e.V. (FTB), Förderkennzeichen 13 N 13120)
- TV 7: R-Beton aus Sicht der praxisgerechten Anwendung und Koordination des Gesamtvorhabens (HeidelbergCement AG) Förderkennzeichen 13 N 13119)

Tabelle 1: Zuordnung der Teilvorhaben zu den jeweiligen Arbeitspaketen

Table 1: Allocation of the sub-projects to the respective work packages

Teilvorhaben Partner	1 ifeu	2 Scherer+Kohl	3 TU Kaiserslautern	4 BASF	5 VDZ gGmbH	6 RWTH Aachen	7 HeidelbergCement AG
Titel des Teilvorhabens	Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme unter Berücksichtigung des prognostizierten Aufkommens und Ökobilanzierung im Bereich der Betonanwendung sowie der RC-Gesteinskörnungsherstellung	Ermittlung praxisrelevanter Stoffströme aus Sicht der RC-Gesteinskörnungsherstellung und Möglichkeiten der verfahrenstechnischen Anpassung	Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierten feiner und grober Gesteinskörnung unter Berücksichtigung der Bemessungsansätze nach EC 2	Entwicklung von neuen hochleistungsfähigen R-Zusatzmitteln für die Herstellung von R-Beton	Verwendung feiner GK bei der Zementherstellung und deren Ökobilanzierung im Vergleich zur Verwendung bei der Betonherstellung – Entwicklung praxistauglicher Ansätze zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von RC-GK bei der Betonherstellung	Fischbetonrecycling und Entwicklung von Verfahren zum praxistauglichen Umgang mit umweltrelevanten Merkmalen	R-Beton aus Sicht der praxistauglichen Anwendung und Koordination des Gesamtvorhabens
Konzeptionierung der neuen Werkstoffe (AP 1 bis AP 6)							
Schwerpunkt I Arbeitspakete							
AP 1	Ermittlung praxisrelevanter Stoffmassenströme						
AP 2.1	Verwendung feiner RC-GK bei der Zementherstellung				Partner im Unterauftrag Spinner Zement GmbH		
AP 2.2	Verwendung feiner RC-GK für die Betonherstellung						
AP 3	Verwendung grober RC-Gesteinskörnung						
AP 4	Neue hochleistungsfähige R-Zusatzmittel						
AP 5	Optimierung der RC-GK-Produktion						
AP 6	Fischbetonrecycling					Assoziierte Partner MAPEI GmbH/FTB	
Schwerpunkt II Arbeitspakete							
Praxisanforderungen an die neuen Werkstoffe (AP 7 bis AP 9)							
AP 7	Bemessung von R-Beton						
AP 8	Bewertung bezüglich der Alkaliempfindlichkeit						
AP 9	Umweltrelevante Merkmale						
Schwerpunkt III Arbeitspakete							
Ökobilanz, Praxistest und Transfer (AP 10 bis AP 12)							
AP 10.1	Ökobilanzierung aus Sicht der Zementherstellung						
AP 10.2	Ökobilanzierung aus Sicht der Betonherstellung						
AP 10.3	Ökobilanzierung aus Sicht der RC-GK-Herstellung						
AP 11	R-Beton im Praxistest						
AP 12	Wissenschaftliche Aufbereitung und Transfer						
AP 13	Projektkoordination R-Beton						

Literatur

- [1] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAFStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1“, Ausgabe September 2010
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAFStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100“, Ausgabe Dezember 2004
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: DAFStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag, Teil 1: Betontechnik, Teil 2: Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand“, Ausgabe August 1998
- [4] Borchers, I.; Müller, C.: Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonen für die Feuchtigkeitsklassen WF und WA. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg): 18. Internationale Baustofftagung 12.-15. September 2012, Weimar; Tagungsbericht. - Weimar, 2012 (ibausil: 18), S.327-336
- [5] Müller, C.; Borchers, I.: Erfahrungen mit AKR-Prüfverfahren: Hinweise zur Ableitung praxisgerechter Bewertungskriterien für Performance und WS-Grundprüfungen. Beton 62 (2012) 10, S.397-406
- [6] Ferrari, G.; Nussbaumer, W.; Surico, F.: New additive for recycling returned concrete with zero-impact. 37th Conference on Our World in Concrete & Structures, Singapore, August 2012
- [7] Müller, C.; Dora, B.: Verwertung von Brechsand aus Bauschutt. Schriftenreihe des DAFStb Heft 506, Berlin: Beuth, 2000
- [8] Müller, C.: Beton als kreislaufgerechter Baustoff. Schriftenreihe des DAFStb Heft 513, Berlin: Beuth, 2001
- [9] Hauer, B. et al.: Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau - Teilprojekt B1. Schlussberichte zur ersten Phase des DAFStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“. Schriftenreihe des DAFStb Heft 572, Berlin: Beuth, 2007, S. 131-221
- [10] Schießl, P.; Müller, C.; Hohberg, I.: Umweltverträglichkeit von Recyclingmaterialien - Ansätze zur Bewertung im Hinblick auf die Verwertung als Betonzuschlag. Aachen: Institut für Bauforschung, 1996. - Forschungsbericht Nr. F 469. In: Kurzberichte aus der Bauforschung 37 (1996), Nr. 12, S. 481-489
- [11] Hauer, B. et al.: Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau - Teilprojekt B. Schriftenreihe des DAFStb Heft 584, Berlin: Beuth, 2011, S. 131-221
- [12] Palm, S.: Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen. Dissertation, TU Clausthal 2009
- [13] Müller, C.; Palm, S.: Neuartige klimafreundliche Zemente. 2. Darmstädter Ingenieurkongress „Bau und Umwelt“ (2013)
- [14] Knappe, F. et al.: Einsatz von Recyclingmaterial aus mineralischen Baustoffen als Zuschlag in der Betonherstellung am Beispiel einer Wohnbebauung an der Rheinallee in Ludwigshafen. Heidelberg, Cottbus, Ludwigshafen 2011
- [15] Knappe, F. et al.: Hochwertige Verwertung von Bauschutt als Zuschlag für die Betonherstellung, Teilvorhaben BWV Stuttgart. Heidelberg 2010
- [16] Hohberg, I.: Charakterisierung, Modellierung und Bewertung des Auslaugverhaltens umweltrelevanter, anorganischer Stoffe aus zementgebundenen Baustoffen. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2003), Nr. 542
- [17] Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton. Schlussberichte zur ersten Phase des DAFStb-/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“. Berlin: Beuth, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2007), Heft 572, S. 223-273
- [18] Brameshuber, W.; Vollpracht, A.; Hannawald, J.; Nebel, H.: Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton - Teilprojekt E. Verbundforschungsvorhaben "Nachhaltig Bauen mit Beton". Berlin: Beuth, Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2011), Heft 584, S. 153-225
- [19] Vollpracht, A.: Einbindung von Schwermetallen in Portlandzementstein. Schriftenreihe Aachener Beiträge zur Bauforschung, Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (2012), Nr. 18; Aachen, Technische Hochschule, Dissertation
- [20] Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Konzept zur Bewertung des Auslaugverhaltens mineralischer Baustoffe/-körper durch Sicker- und Kontaktgrundwasserprognose - Teil 2: Bestimmung der Quellstärke für Boden und Grundwasser in Kontakt mit Betonfundamenten und Bodeninjektionen. Aachen: Institut für Bauforschung, 2004. - Forschungsbericht Nr. F 645
- [21] Zilch, K.; Roos, F.; Cyllok, M.: Entwicklung eines Bemessungsansatzes für Beton mit rezykliertem Zuschlag, Forschungsbericht Technische Universität München, 2003
- [22] Deutsches Institut für Bautechnik: Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser des DIBt, Teil I (2009-05), Teil II (2011-09), Teil III (2009-05), http://www.dibt.de/de/Fachbereiche/data/Aktuelles_Ref_II_6_5.pdf