

# Der Einfluss von Recyclingmaterial auf die Eigenschaften von Beton

Jochen Reiners, Jan P. Höffgen, Maureen Denu, Christoph Müller und Frank Dehn

## Zusammenfassung

In den vergangenen Jahren hat die zunehmende Knappheit von Ressourcen, insbesondere im Bereich der Gesteinskörnung im Bauwesen, sowie die Anerkennung der Notwendigkeit von Kreislaufwirtschaft im Betonbau dazu geführt, dass der Fokus verstärkt auf der Nutzung von Recyclingmaterialien liegt. Vor allem rezyklierte Gesteinskörnungen werden vermehrt eingesetzt. Da diese jedoch Auswirkungen auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften haben können, ist es wichtig, ihren Einfluss zu untersuchen. Dieser Artikel befasst sich daher mit der Herstellung, dem mechanischen Verhalten, den Dauerhaftigkeitseigenschaften sowie dem Brandverhalten von Betonen, die rezyklierte Gesteinskörnung enthalten. Zusätzlich werden wissenschaftliche Begleitprogramme wie ein AiF Verbundforschungsprojekt am VDZ/KIT vorgestellt. Da eine positive Ökobilanz das Ziel bei der Verwendung von Recyclingmaterialien ist, wird dieser Aspekt ebenfalls in diesem Beitrag beleuchtet. Weil vor allem der Zement entscheidend für die Ökobilanz von Betonen ist, wird zudem der Ansatz der Verwendung von Recyclingmehlen als Zementhauptbestandteil betrachtet.

**Schlagwörter:** Ressourcen, Kreislaufwirtschaft, rezyklierte Gesteinskörnung, Ökobilanz, Beton

## Abstract

In recent years, the increasing scarcity of resources, particularly in the area of aggregates in the construction industry, as well as the recognition of the need for a circular economy in concrete construction, has led to a greater focus on the use of recycled materials. Recycled concrete aggregates in particular are increasingly being used. However, as these can have an impact on the properties of fresh and hardened concrete, it is important to analyse their influence. This article therefore deals with the production, mechanical behaviour, durability properties and fire behaviour of concretes containing recycled aggregates. In addition, accompanying scientific programmes such as an AiF joint research project at the VDZ/KIT are presented. As a positive environmental impact is the goal when using recycled materials, the life cycle assessment of concrete with recycled aggregates is highlighted in this article. As cement in particular is decisive for the environmental impacts of concrete, the approach of using recycled concrete fines as a cement main constituent is also addressed.

**Keywords:** resources, circular economy, recycled aggregate, life cycle assessment, concrete

## 1 Ressourcenschonung durch Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen

In den vergangenen Jahren ist der weltweite Bedarf an Gesteinskörnungen für Bauprodukte und insbesondere für Betonzeugnisse des Hoch- und Tiefbaus stark angestiegen. Dieses Wachstum geht vor allem auf schnell wachsende Gesellschaften in Entwicklungs- und Schwellenländern zurück, wo Gesteinskörnungen eine Verknappung erfahren, die teilweise erhebliche internationale Massenströme mit sich zieht. In Deutschland ist der Bedarf an Gesteinskörnungen in den vergangenen Jahren auf hohem Niveau nahezu konstant. Perspektivisch sind hier bei unveränderter Baunachfrage jedoch ebenfalls Verknappungen zu erwarten, die darauf zurückzuführen sind, dass die Zahl der Förderstätten für fluviale Gesteinskörnungen infolge von Flächenkonflikten mit Siedlungen, Landwirtschaft oder Naturschutz in den kommenden Jahren zurückgehen wird [1]. Zur Minderung dieses Problems ist es notwendig, anfallende Massenströme aus dem Rückbau von Bauwerken aufzubereiten, um sie bspw. als rezyklierte Gesteinskörnungen im Kreislauf zu führen.

In Deutschland werden jährlich zwischen 230 Mio. t und 260 Mio. t Sande und Kiese im Hoch- und Tiefbau verwendet [2][3]. Zur Schonung natürlicher Ressourcen werden dabei in großem Umfang aufbereitete Bau- und Abbruchabfälle eingesetzt. So wurden im Jahr 2020 24 Mio. t Beton (AVV Nr. 170101), 4 Mio. t Ziegel (AVV Nr. 170102) und 19 Mio. t gemischte mineralische Abfälle (AVV Nr. 170107) für eine Weiterverwendung aufbereitet [4]. Der Schwerpunkt der stofflichen Nutzung liegt dabei auf der Verwendung im Straßen-, Wege- und Erdbau, nur ein geringer Anteil wird als rezyklierte Gesteinskörnung für Beton im Kreislauf geführt [5].

Die Gründe hierfür sind vielseitig: Aus logistischen Gründen ist häufig eine Bauschutttaufbereitung am Ort des Rückbaus naheliegend, wobei die Aufbereitung in mobilen Anlagen in der Regel nicht auf die Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton ausgerichtet ist – hierfür sind unterschiedliche Aufbereitungsschritte wie mehrstufige Brech-, Sieb- und Sortiervorgänge erforderlich, die aufgrund der Komplexität in mobilen Anlagen häufig nicht untergebracht werden können [6]. Andererseits ist die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen in Beton nach DIN EN 206:2021-06 in Verbindung mit DIN 1045-2:2023-08 [7] reguliert. Dabei wird berücksichtigt, dass bemessungsrelevante Betoneigenschaften durch die Substitution primärer Gesteinskörnung durch Rezyklate nur insoweit beeinflusst werden, dass eine Bauteilbemessung nach DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-2 möglich bleibt.

## 2 Herstellung von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Recycling-Beton, also Beton mit Anteilen von rezyklierter Gesteinskörnung, wird häufig auch als "R-Beton" bezeichnet. Über die Verwendung von R-Beton können der Abbau und die Verwendung natürlicher Gesteinskörnung reduziert werden.

Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 206:2021-06 i. V. m. DIN 1045-2:2023-08 [7] werden nach DIN 4226:2017-08 aufbauend auf DIN EN 12620:2008-07 gemäß ihrer stofflichen Zusammensetzung gem. [8] in vier Typen eingeteilt. Für die Herstellung von Betonen nach DIN 1045-2:2023-08 [7] sind jedoch nur Typ 1 mit mindestens 90 M.-% Beton(-produkte) und ungebundene Gesteinskörnung (Rcu) sowie höchstens 10 M.-% verschiedener Ziegel und Mauersteine (Rb) und Typ 2 mit mindestens 70 M.-% Rcu sowie höchstens 30 M.-% Rb erlaubt. Zudem werden zulässige Fremdstoffgehalte (Bitumen, Asphalt, Ton, Metalle, Kunststoffe sowie schwimmendes Material etc.) und gefährliche Substanzen festgelegt.

Nach den derzeit in Deutschland geltenden Vorgaben [9] dürfen rezyklierte Gesteinskörnungen > 2 mm je nach Expositionsklasse des Betons mit einem Anteil von bis zu 45 Vol.-% (Typ 1) bzw. 35 Vol.-% (Typ 2) bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung zugegeben werden. Gemäß DIN 1045-2:2023-08 [7] Tabelle E5 gelten perspektivisch die gleichen Höchstwerte, wobei für einzelne Expositionsklassen höhere Austauschraten zulässig sind. Wenn höchstens 25 Vol.-% der Gesteinskörnung durch Rezyklate ausgetauscht werden, dürfen auch feine rezyklierte Gesteinskörnungen < 4 mm des Typs 1 verwendet werden, wenn Sie aus einer

Produktion grober rezyklierter Gesteinskörnung stammen, für die die stoffliche Zusammensetzung nachgewiesen wurde. Dabei darf das Verhältnis feiner zu grober rezyklierter Gesteinskörnung nicht größer sein als das entsprechende Verhältnis der primären Gesteinskörnungen. Für die Expositionsklasse X0 sowie die Expositionsklasse XC1/Feuchtigkeitsklasse W0 dürfen bis zu 45 Vol.-% der Gesteinskörnung durch Rezyklate des Typs 1 ausgetauscht werden, wobei 20 Vol.-% davon feine Gesteinskörnung aus der Produktion der verwendeten groben Gesteinskörnung sein darf. Soll von diesen Regeln abgewichen und größere Anteile rezyklierter Gesteinskörnung verwendet werden, sind die Produkteigenschaften des Betons durch Gutachten bzw. Verwendbarkeitsnachweis nachzuweisen [7][10].

Rezyklate unterscheiden sich hinsichtlich ihrer physikalischen und geometrischen Eigenschaften von den üblicherweise verwendeten primären bzw. natürlichen Gesteinskörnungen. Einerseits weisen sie infolge der Zerkleinerung über Brecher und Mühlen eine kantigere Kornform auf als fluviale Gesteinskörnungen, was zu einer höheren spezifischen Oberfläche und geringeren Packungsdichte führt. Andererseits bestehen rezyklierte Gesteinskörnungen aus Betonbruch aus einer Mischung der primären Gesteinskörnung des Ursprungsbetons und anhaftendem Mörtel bzw. Zementstein. Letzterer ist porös, wodurch rezyklierte Gesteinskörnungen eine niedrigere Dichte und höhere Wasseraufnahme aufweisen als primäre Gesteinskörnungen. Da Zementstein in der Regel weniger hart und weniger fest als die Gesteinskörner ist, reichert er sich bei der Zerkleinerung in den Feinanteilen an, wodurch Rezyklate für die Betonherstellung ungünstige feine Korngrößenverteilungen aufweisen [6]. Da Ziegel und Mauersteine verglichen mit Betonbruch eine höhere Porosität und Wasseraufnahmen sowie niedrigere Festigkeiten und Dichten aufweisen, sind die beschriebenen Abweichungen zu primären Gesteinskörnungen bei der Verwendung von Rezyklaten des Typs 2 gegenüber Typ 1 verstärkt.

Die erhöhte Wasseraufnahme in Verbindung mit dem erhöhten Mehlkorngesamt führt dazu, dass rezyklierte Gesteinskörnungen nach der Aufbereitung häufig einen hohen Eigenfeuchteanteil mit sich bringen, der bei der Betonherstellung berücksichtigt werden muss. Zudem neigen Rezyklate bei Feuchtezutritt zur Bildung von Agglomeraten, die die Verwendung als Betonbestandteil einschränken.

Die Kornform und Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen erfordern besondere Berücksichtigung bei der Betonherstellung, da sie sich auf die Verarbeitbarkeit auswirken. Infolge der verringerten Packungsdichte und der erhöhten spezifischen Oberfläche der gebrochenen Körner ist im Vergleich mit Betonen aus ausschließlich fluvialen Gesteinskörnungen der Bedarf an Zement und Wasser (Zementleim) erhöht, um eine vergleichbare Frischbetonkonsistenz zu erreichen. Dazu kommt, dass sich die Verarbeitbarkeit von Betonen mit porösen rezyklierten Gesteinskörnungen nach der Wasserzugabe schneller verschlechtern kann als bei Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung. Der Grund hierfür liegt in der Wasseraufnahme durch die Rezyklate, die dem Zementleim sukzessive Wasser entziehen, sodass dieser weniger fließfähig wird. Im Rahmen einer erweiterten Erstprüfung wird durch DIN 1045-2:2023-08 [7] daher eine Untersuchung der zeitlichen Konsistenzentwicklung von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen vorgeschrieben. Nach DIN 1045-2:2023-08 [7], Anhang E3 ("Regelungen für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen") und Anhang B wird der Einfluss des Saugens der Gesteinskörnung auf den wirksamen Wasserzementwert über die Bestimmung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten berücksichtigt. Dabei wird die grobe rezyklierte Gesteinskörnung nach einer definierten Vorlagerung (z. B. Ofentrocknung bei 110 °C bis zur Massenkonzanz) 10 Minuten unter Wasser bei Raumtemperatur gelagert. Danach ist die Probe mit einem schwach feuchten Baumwollhandtuch so lange abzutrocknen, bis die Oberfläche der Gesteinskörnung mattfeucht erscheint. Die Wasseraufnahme wird dann als Massenanteil in M.-% ermittelt.

Die Wasseraufnahme durch Rezyklate lässt sich mit mehreren kombinierbaren Ansätzen kompensieren. Indem die rezyklierten Gesteinskörnungen im ersten Schritt der Betonherstellung mit Wasser versetzt werden, das in die Poren absorbiert wird, kann dem Zementleim anschließend kein weiteres Wasser entzogen werden

[11][12]. Der Wassergehalt der Rezyklate – auch infolge gezielter Sättigung – muss jedoch bei der Mischungsberechnung berücksichtigt werden. Der Wasserzementwert darf auch inklusive des Sättigungswassers nicht die für die jeweiligen angestrebten Bauteilexpositionen erlaubten Höchstwerte überschreiten. In der Praxis ist daher häufig nur eine Teilsättigung der Rezyklate möglich. Daneben besteht die Möglichkeit, die Verarbeitbarkeit durch Betonzusatzmittel zu verbessern. Rezyklate lassen sich hydrophobieren, sodass die Wasserentnahme aus dem Frischbeton reduziert wird [13]. Ebenso wurden in den vergangenen Jahren (gem. Herstellerangaben) Fließmittel (weiter-)entwickelt, die besonders effektiv Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen verflüssigen und der zeitlichen Konsistenzabnahme entgegenwirken.

### **3 Mechanisches Verhalten und Dauerhaftigkeit von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen**

Die Druckfestigkeit ist die zentrale und wichtigste Betoneigenschaft für die Bemessung von Stahlbetonbauteilen nach Eurocode 2. Sämtliche weitere relevante Materialparameter werden hierbei in Abhängigkeit der Druckfestigkeit anhand empirischer Modelle berechnet. Dazu gehören der Elastizitätsmodul für den Widerstand gegen elastische Verformungen, das Schwindmaß und die Kriechzahl als Maß für viskose Verformungen, die Zugfestigkeit gegen Rissbildung sowie diverse Dauerhaftigkeitsparameter wie die Karbonatisierungsgeschwindigkeit oder der Chlorideindringwiderstand. Die (teilweise) Substitution primärer Gesteinskörnungen durch Rezyklate hat jedoch unterschiedlichen Einfluss auf die einzelnen Parameter, wofür die jeweiligen zugrundeliegenden Mechanismen betrachtet werden müssen.

Bei normalfesten Betonen mit dichter Gesteinskörnung – hierzu zählen die üblichen Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen aufgrund der Vorgaben in DIN 1045-2:2023:08 [7] – wird die Druckfestigkeit maßgeblich von der Porosität und (subsequent) Festigkeit des Zementsteins definiert. Primäre, dichte Gesteinskörnungen weisen eine in der Regel signifikant höhere Festigkeit auf und werden von Rissen nicht durchtrennt. Die für das Materialversagen charakteristischen Makrorisse gehen stattdessen von den Kontaktzonen zwischen Gesteinskörnern und Zementstein aus, da hier neben Steifigkeitsunterschieden einerseits die Porosität lokal erhöht und andererseits die Mikroverzahnung reduziert sind, und verlaufen weiter durch den Zementstein. Die Verwendung von Rezyklaten führt in der Regel zu reduzierten Druckfestigkeiten, da Rezyklate bereits Zementstein oder z. B. porösen Ziegel enthalten und somit der Anteil der höherfesten primären Gesteinskörnung sinkt. Eine ausgeprägte Reduktion der Druckfestigkeit ist zu erwarten, wenn Rezyklate hohe Mengen oder besonders porösen Zementstein enthalten oder wenn rezyklierte Gesteinskörnungen durch eine mangelhafte Aufbereitung eine interne Gefügeschädigung in Form von Mikrorissen mit sich bringen. Entsprechend lässt sich der negative Effekt reduzieren, indem rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden, die aus hochwertigem Betonbruch entstehen und mit geeigneten Verfahren aufbereitet wurden, um den Anteil des anhaftenden Zementsteins zu minimieren. Ebenfalls negativ wirkt sich die Erhöhung der Kontaktzonenfläche aus: Einerseits durch die erhöhte spezifische Oberfläche und andererseits durch in den Rezyklaten enthaltene Kontaktzonen zwischen primärer Gesteinskörnung und primärem Zementstein weisen Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen erhöhte Kontaktzonenflächen auf, in denen Risse entstehen können. Wenn nicht oder teilweise wassergesättigte rezyklierte Gesteinskörnungen aus dem sie umgebenden Zementleim Wasser entziehen, wird dieser jedoch dichter, infolgedessen weist insbesondere die Kontaktzone eine höhere lokale Festigkeit auf. Außerdem lässt sich ein besserer Kornverbund erzielen, wenn Zementhydratationsprodukte in die Poren der Rezyklate hineinwachsen. Der Einfluss von Rezyklaten auf die Betonzugfestigkeit ist ähnlich. Hierbei bewirken die gebrochenen Körner zusätzlich eine bessere Kornverzahnung, die größere Risslängen und damit höhere Zugfestigkeiten mit sich bringen können. [14][15]

Der Einfluss rezyklierter Gesteinskörnungen auf den Verformungswiderstand ist durch in der Regel sinkende Elastizitätsmoduln gekennzeichnet. Da die Steifigkeit der dichten Gesteinskörnungen um ein Vielfaches größer ist als die des Zementsteins, hängt die Steifigkeit des Kompositmaterials nahezu ausschließlich von der

Steifigkeit des Zementsteins und dessen Anteil ab, der mit steigendem Rezyklatgehalt anwächst. Das viskose Verhalten ist analog: Kriechen und Schwinden sind Prozesse, die überwiegend feuchtegesteuert sind und sich daher auf den Zementstein beschränken. Dichte Gesteinskörnungen wirken hierbei verformungsbehindernd. Dementsprechend neigen Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen zu höheren Kriech- und Schwindverformungen, wobei sich zumindest letztere durch die Wassersättigung der Rezyklate, die eine sogenannte innere Nachbehandlung des schwindenden Zementsteins ermöglicht, reduzieren lassen. Der Einfluss betontechnologischer Maßnahmen zur Erhöhung des Verformungswiderstands ist jedoch begrenzt. Einen Ansatz stellt die *Equivalent Mortar Volume Method* (EVM) dar: Hierbei wird der Zementsteinanteil bzw. Mörtelanteil an den Rezyklaten bestimmt und die Betonzusammensetzung angepasst, sodass das Zementsteinvolumen als Summe des Zementleims und des in den Rezyklaten befindlichen festen Zementsteins konstant bleibt. Durch die Reduktion des Zementleimgehalts verschlechtert sich jedoch die Verarbeitbarkeit. [16][17][18]

Die Dauerhaftigkeit von Betonen wird maßgeblich durch deren Zementsteingehalt bestimmt. Durch die Poren im Zementstein dringen korrosive Medien in den Beton ein und verteilen sich durch das Porensystem. Insofern ist eine erhöhte Porosität in rezyklierten Gesteinskörnern korrosionsfördernd. Gleichzeitig findet jedoch auch eine Bindung dieser Stoffe statt: Kohlenstoffdioxid reagiert mit Calciumhydroxid, während Chloride mit aluminiumhaltigen Zementhydratphasen reagieren. Bei einer vorangegangenen Exposition, die zumindest im Fall von Kohlenstoffdioxid als wahrscheinlich angesehen werden muss, nimmt die Kompensation der erhöhten Porosität durch die chemische Bindung ab. [19][20]

Den beschriebenen Auswirkungen der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen ist gemein, dass sie mit steigender Substitutionsrate ansteigen. Tabelle 1 zeigt die Ergebnisse mehrerer Metastudien zum Einfluss des Austauschs von primärer Gesteinskörnung durch Rezyklate.

Tab. 1: Relative Festbetoneigenschaften bei 100 % Gesteinskörnungsaustausch durch rezyklierte Gesteinskörnungen (RGK). Angegebene Werte des 95 %- bzw. 5 %-Vertrauensintervalls unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Austauschrate und Veränderung der Festbetoneigenschaften (0 % Austausch  $\triangleq$  100).

Parameter	Quelle	Grobe RGK	Feine RGK
Druckfestigkeit	[21]	56 - 117	55 - 107
Spaltzugfestigkeit	[22]	40 - 114	54 - 87
E-Modul	[23]	44 - 96	55 - 98
Kriechzahl	[24]	100 - 180	
Schwinden	[3]	< 180	
Karbonatisierungstiefe	[10]	82 - 247	148 - 870
Chloriddiffusion	[25]	90 - 165	40 - 295

Dies wird in DIN 1045-2:2023-08 [7] berücksichtigt: Bei einem Austausch von max. 25 Vol.-% der Gesteinskörnung durch Rezyklate kann ein negativer Einfluss auf die Anwendbarkeit der Bemessungsregeln vernachlässigt werden. Höhere Substitutionsraten bis 45 Vol.-% sind mit Einschränkungen verbunden, um den Anforderungen der Dauerhaftigkeit gerecht zu werden. Davon abweichend wird ein gesonderter Nachweis der bemessungsrelevanten Betoneigenschaften gefordert.

## 4 Brandverhalten von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung

### 4.1 Mechanische Eigenschaften von R-Beton bei erhöhten Temperaturen

Zu den mechanischen Eigenschaften von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei erhöhten Temperaturen liegen nur wenige Studien vor.

- Zega & Di Maio [26] stellten Betone mit verschiedenen Wassermenge-Werten her und ersetzten bei einigen Betonen 75 Vol.-% der groben Gesteinskörnung durch rezyklierte GK. Nach dem Erhitzen von Zylindern auf 500 °C stellten sie fest, dass bei einem w/z-Wert von 0,40 die Restdruckfestigkeit der R-Betone z. T. höher lag als die Restdruckfestigkeit der Referenzbetone mit natürlicher Gesteinskörnung. Andererseits war bei höheren Wassermenge-Werten die Restdruckfestigkeit der R-Betone geringer als die der Betone mit natürlicher GK.

Die Autoren führen dies darauf zurück, dass bei R-Beton die Kontaktzone um die (rezyklierten) Gesteinskörner häufig durch den Übergang von frischem Mörtel zu rezykliertem Mörtel gebildet wird und die Wärmeausdehnungskoeffizienten daher ähnlich sind. Dieses Verhalten macht sich bei Betonen mit einem niedrigeren w/z-Wert bemerkbar, da die Festigkeit der Grenzfläche insbesondere bei höheren Betonfestigkeiten entscheidend ist.

Der statische Elastizitätsmodul von R-Beton nach dem Erhitzen und Abkühlen war bei allen geprüften R-Betonen etwas geringer (bis zu ca. 20 %) als der der Referenzbetone. Begründet wird dies mit einem höheren Zementsteinanteil im R-Beton und damit, dass der Zementstein eine höhere Verformbarkeit als die Gesteinskörnung aufweist.

- Im Gegensatz zu Zega & Di Maio zeigte Shaikh [27] bei der Untersuchung von Betonen mit einem w/z-Wert von 0,40, dass die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen zu einer niedrigeren Restfestigkeit als die der Referenzbetone mit natürlichen Gesteinskörnungen führt. Vermutet wird, dass dies im höheren Anteil der Übergangszonen (ITZ) bei R-Betonen begründet ist. Die Übergangszonen enthalten einen höheren Anteil an Calciumhydroxidkristallen (Portlandit) als der Zementmörtel im größeren Abstand von der Gesteinskörnung. Da Calciumhydroxid bei Temperaturen > 400 °C dehydriert, könnte dies den R-Beton schwächen.
- Während Sarhat et al. [28] zeigten, dass der relative Verlust der Betondruck- und Spaltzugfestigkeit (bezogen auf die Festigkeit bei Umgebungsbedingungen) mit einem steigendem Anteil rezyklierter Gesteinskörnung abnimmt, wiesen Khan et al. [29] eine tendenziell stärkere Abnahme der rel. (Rest-) Druckfestigkeit mit steigendem Anteil rezyklierter Gesteinskörnung im Beton nach.

Es muss festgestellt werden, dass die vorhandenen Veröffentlichungen aufgrund der unterschiedlichen Rezyklate und der gewählten Versuchsabläufe schwer miteinander zu vergleichen sind und sich zum Teil widersprechen.

### 4.2 Explosives Betonabplatzen unter Brandbedingungen

Die Anzahl der wissenschaftlichen Studien zum explosiven Abplatzen von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung sind ebenfalls begrenzt.

- Im Zuge des nationalen französischen Forschungsprojekts „Recybeton“ wurden im Jahr 2016 die Oberflächen von vier Betonplatten mit den Abmessungen  $4,6 \times 1,5 \times 0,2 \text{ m}^3$  einem Brand nach Einheits-Temperaturzeitkurve gemäß ISO 834-1 [17] ausgesetzt [30]. Zwei der Platten waren mit natürlicher Gesteinskörnung hergestellt worden. Bei den beiden anderen Platten war die natürliche Gesteinskörnung in zwei verschiedenen Anteilen durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt worden. Während eine der beiden Platten mit 100 Vol.-% natürlicher Gesteinskörnung an einer Stelle eine Abplatzung zeigte, wiesen die beiden Platten mit rezyklierter Gesteinskörnung jeweils an drei bzw. vier Stellen lokale Abplatzungen auf. Das stärkere Ausmaß des Abplatzens bei den Platten mit rezyklierter Gesteinskörnung wird mit dem höheren Feuchtegehalt dieser Betone begründet.

- Fernandes [22] untersuchte das Abplatzverhalten von belasteten Betonprobekörpern ( $20 \times 20 \times 10 \text{ cm}^3$ ). 0 Vol.-%, 10 Vol.-%, 20 Vol.-%, 40 Vol.-% oder 100 Vol.-% der natürlichen Gesteinskörnung  $> 4 \text{ mm}$  wurden dabei durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt. Wie Abbildung 1 zeigt, stieg das Volumen des im Brandversuch abgeplatzten Materials mit dem Anteil rezyklierter Gesteinskörnung bis zu einer Austauschrate von 40 Vol.-% an. Bei einer höheren Austauschrate wurde das abgeplatzte Betonvolumen nicht mehr entscheidend größer. Fernandes bestätigte den bereits von anderen Wissenschaftlern gezeigten Zusammenhang zwischen dem Feuchtegehalt des Betons und dem Volumen des abgeplatzten Materials. Er vermutete zwei gegenläufige Effekte, die aus der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung resultieren:
  1. Der mit der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung verbundene höhere Feuchtegehalt des Betons zum Zeitpunkt der Prüfung führt zu höherem Porendruck im Beton. Des Weiteren kann ein höherer Wassergehalt im Bereich um die Gesteinskörner den Verbund zwischen Gesteinskörnung und Zementstein schwächen.
  2. Auf der anderen Seite kann ein höherer RC-Gehalt den Einfluss unterschiedlicher thermischer Dehnungen zwischen sich ausdehnender Gesteinskörnung und schwindendem Zementstein verringern.

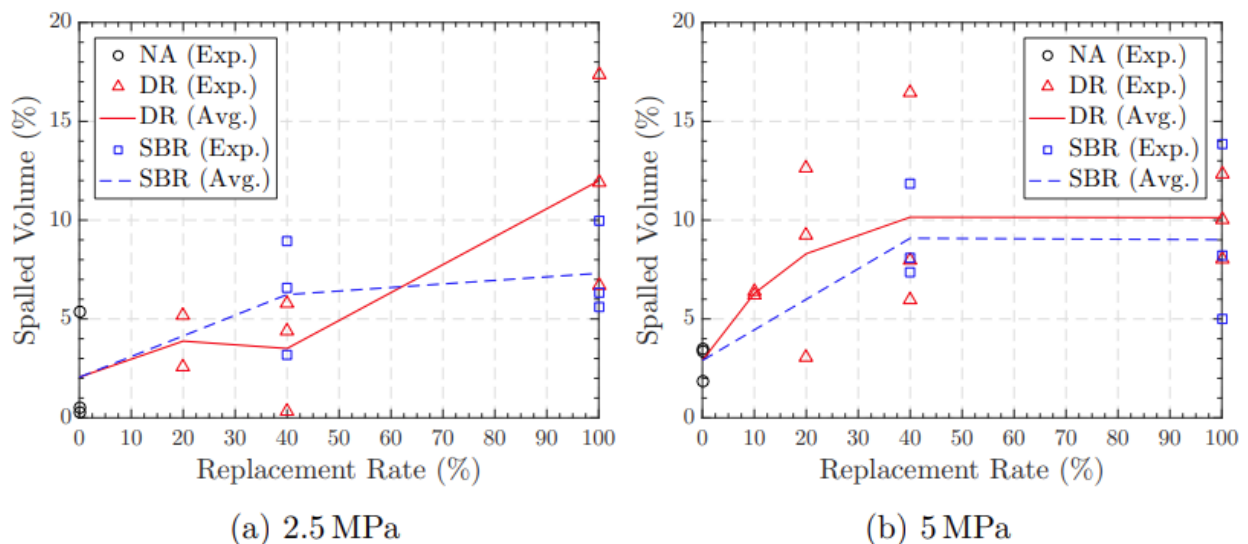


Abb. 1: Abhängigkeit des abgeplatzten Betonvolumens vom Anteil rezyklierter Gesteinskörnung unter einaxialer äußerer Belastung senkrecht zur erhitzten Oberfläche [22]

### 4.3 Regelungen zur Brandbemessung von R-Beton in der Normung

Mit der Revision der Eurocodes (geplante Einführung ab 2026) wurde ein eigener Anhang B [23] zur Brandbemessung von Tragwerken mit rezyklierter Gesteinskörnung erstellt. Da jedoch nur wenige Ergebnisse zum Brandverhalten von R-Beton vorliegen, ist der Status dieses Anhangs bislang "informativ". Die einzelnen CEN-Mitgliedsstaaten werden in den jeweiligen Nationalen Anhängen festlegen, wie dieser Anhang national anzuwenden ist.

Folgende Regeln sind im Normentwurf [23] enthalten, der im Sommer 2023 in der formellen CEN-Abstimmung 100 % Zustimmung der CEN-Mitgliedsstaaten erhielt:

- Wenn die Substitutionsrate der rezyklierten Gesteinskörnung kleiner als 20 % ist, können die in der Norm beschriebenen Materialeigenschaften für Betone mit natürlicher Gesteinskörnung im Zuge der

Bemessung verwendet werden. Für höhere Substitutionsraten sollten die Betoneigenschaften auf Versuchsergebnissen basieren.

- Für tragende Bauteile, bei denen die dem Brand ausgesetzten Oberflächen druckbelastet sind, sollte unabhängig von der Betonfestigkeit eine spezifische Bewertung des Abplatzens durchgeführt werden. Dies kann über
  1. das Aufbringen von Schutzschichten,
  2. die Betrachtung eines reduzierten Querschnitts, bei dem eine angenommene abgeplatzte Schicht rechnerisch nicht bei der Bemessung berücksichtigt wird, oder
  3. eine Beurteilung basierend auf Versuchsergebnissenerfolgen. Alternativ können der Betonmischung Polypropylenfasern zugegeben werden.

#### **4.4 AiF-Verbundforschungsvorhaben VDZ/KIT**

Wie in den Abschnitten 4.1 und 4.2 dargelegt, ist die Anzahl von wissenschaftlichen Untersuchungen zu den mechanischen und thermischen Eigenschaften von R-Beton bei erhöhten Temperaturen begrenzt. Gleiches gilt für das Abplatzen von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung unter Brandbelastung. Das Hintergrunddokument zur Revision der DIN EN 1992-1-2 [23] legt entsprechend dar, dass weitere Versuche vorgesehen werden sollten, um die Regelungen in der Norm zukünftig zu verbessern.

Aus diesem Grund untersucht ein aktuelles AiF-Verbundforschungsvorhaben das Brandverhalten von Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung. Die beteiligten Forschungsstellen sind die VDZ Technology gGmbH und das Karlsruher Institut für Technologie, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie. Der Bewilligungszeitraum endet am 30. April 2026. Während der VDZ das explosive Abplatzen "ökologisch optimierter Betone" im Brandfall untersucht, liegt der Fokus des KIT auf der Bestimmung der thermo-mechanischen und thermo-physikalischen Eigenschaften dieser Betone. Neben der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung schließt das Versuchsprogramm auch klinkereffiziente CEM VI-Zemente nach DIN EN 197-5:2021-07 [31] ein.

## **5 Einfluss der Verwendung von Recyclingmaterial auf die Ökobilanz der Zement- und Betonherstellung**

### **5.1 Verbundforschungsvorhaben "R-Beton"**

Im BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" wurde seitens des ifeu - Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg und die VDZ Technology gGmbH untersucht, welchen Einfluss die Verwendung von Recyclingmehl auf die Ökobilanz der Zementherstellung und welchen Einfluss die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Ökobilanz der Betonherstellung haben kann.

Das ifeu ermittelte hierzu Stoffmassenströme bei der Aufbereitung von Bauschutt und Betonabbruchmaterial zu rezyklierter Gesteinskörnung und Recyclingmehl in einem Recyclingwerk. Die ermittelten Daten bilden die Grundlage der Ökobilanz. Die Stoffströme sowie die Elektrizitäts- und Dieselverbräuche für die Aufbereitung wurden für folgende drei Szenarien ermittelt:

1. Erzeugung von rezyklierter Gesteinskörnung zur Verwendung im Straßen- und Wegebau (Basisszenario)
2. Gewinnung rezyklierter GK zur Verwendung im Beton über den Einsatz eines zusätzlichen Windsichters (ohne weiteres Brechen)
3. Gewinnung rezyklierter GK zur Verwendung im Beton über zusätzliche Brech- und Klassifizierungsschritte

Die Ökobilanzierung erfolgte nach DIN EN 15804:2012-04 [21]. Die Ergebnisse wurden im DAfStb-Heft 641 [3] veröffentlicht und werden im Folgenden zusammengefasst.



## 5.2 Einfluss der Verwendung von Recyclingmehl auf die Ökobilanz der Zementherstellung

In einem vorangegangenen Arbeitspaket des Verbundforschungsvorhabens war gezeigt worden, dass ausgehend von einem Portlandzement 10 M.-% des Zements durch Recyclingmehl ersetzt werden können und dabei technische Eigenschaften erreicht werden, die vergleichbar mit denen eines Portlandzements ohne Verwendung von Recyclingmehl sind. Zur Gewährleistung der technischen Vergleichbarkeit musste die verbleibende Klinkerkomponente (CEM I) im „R-Zement“ mit einem zusätzlichen Einsatz elektrischer Energie feiner aufgemahlen werden. Bei der Verwendung von Betonrecyclingmehl war ein zusätzlicher Stromeinsatz von ca. 40 kWh/t Klinkerkomponente erforderlich. Bei der Verwendung von Mauerwerksrecyclingmehl reicht ein zusätzlicher Stromeinsatz von ca. 20 kWh/t Klinkerkomponente aus.

Als Ergebnis zeigte sich, dass über den betrachteten Ersatz von 10 M.-% Portlandzement durch Beton- oder Mauerwerksrecyclingmehl bei den Werten der meisten nach DIN EN 15804:2012-04 [21] zu betrachtenden Indikatoren der Wirkungsbilanz Verringerungen erzielt werden konnten. Je nach Typ des Recyclingmehles ergaben sich z. B. beim Treibhauspotenzial Einsparungen von bis zu ca. 8 %. Aufgrund der zusätzlich erforderlichen Mahlergie kann der Primärenergiebedarf der Herstellung von „R-Zement“ jedoch gegebenenfalls höher liegen als der Primärenergiebedarf der Herstellung von Portlandzement ohne Recyclingmehlanteil.

Neben der Mahlung von Recyclingmehlen besteht die Möglichkeit, den hydratisierten Zement zu reaktivieren. Verfahren hierfür befinden sich derzeit in Entwicklung: Eine Variante ist die thermische Reaktivierung, bei der das Hydratwasser infolge von Temperaturen bis 650 °C abgegeben wird, wodurch der Zementstein seine Reaktivität zurückgewinnt [33][14]. Alternativ wird bei der Karbonatisierung von Zementstein infolge hoher CO<sub>2</sub>-Konzentrationen ein puzzolanisch reaktives Siliciumoxidgel gebildet [34]. Die Ökobilanz der Reaktivierung hängt dabei von verschiedenen Randbedingungen (Trocknung, Aufbereitungstemperatur, CO<sub>2</sub>-Bindung etc.) ab, wobei noch keine industriellen Erfahrungswerte vorliegen. In beiden Fällen ist davon auszugehen, dass die Ökobilanz eines Zements infolge des Austauschs durch reaktivierte Rezyklate verbessert wird.

## 5.3 Einfluss der Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung auf die Ökobilanz der Betonherstellung

Für verschiedene im Projekt untersuchte Betone wurde eine Ökobilanzierung durchgeführt. Abbildung 2 zeigt für einen dieser Betone (360 kg/m<sup>3</sup> CEM I; w/z=0,50) am Beispiel der Parameter Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergie (PE<sub>ner</sub>), aus welchen Anteilen sich die Gesamtwerte zusammensetzen. Den größten Einfluss hat in allen Fällen die Produktion des Zements. Die Gewinnung von Kies trägt hier jeweils mit nur ca. 3,0 kg CO<sub>2</sub>-Äq/m<sup>3</sup> zum GWP und mit 39 MJ/m<sup>3</sup> zum Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie bei und beeinflusst die Ökobilanz der Betonherstellung nicht entscheidend. Entsprechend gering ist das Potenzial, über den Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung die Ökobilanz der Herstellung von Beton zu verbessern. Von größerer Bedeutung sind die Transporte der Gesteinskörnung zum Betonwerk.

Wie die Auswertung der von ifeu erfassten Daten zeigte, sind die Umweltwirkungen der Aufbereitung von Betonabbruchmaterial zu rezyklierter Gesteinskörnung, die in der Ökobilanz der Herstellung von „R-Beton“ auszuweisen sind, geringer als die Umweltlasten der Gewinnung/Aufbereitung natürlicher Gesteinskörnung. Die Ökobilanz der Betonherstellung kann daher durch den Ersatz von natürlicher Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung verbessert werden. Zu beachten ist, dass sich aus dem großen Massenanteil der Gesteinskörnung im Beton je nach Transportentfernung zum Betonwerk ein erheblicher Einfluss der Umweltwirkungen aus dem Transport der Gesteinskörnung ergeben kann. Ob die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in der Ökobilanz der Betonherstellung zu einer Verminderung der Umweltwirkungen führt, ist daher für jeden Einzelfall zu betrachten und hängt insbesondere vom jeweiligen Verhältnis der Transportentfernungen von natürlicher zu rezyklierter Gesteinskörnung ab.

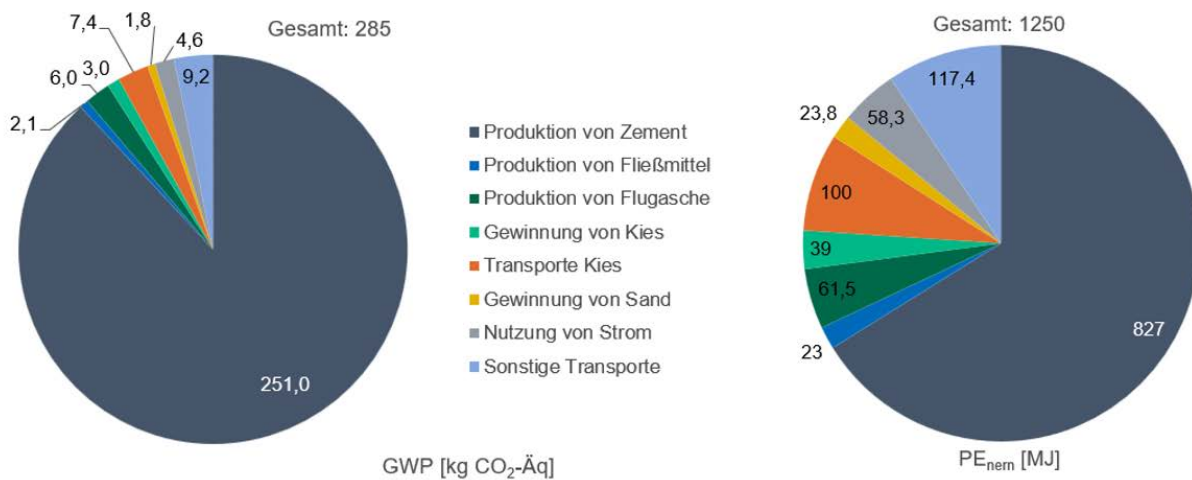


Abb. 2: Einflussfaktoren auf Treibhauspotenzial und Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie eines im Verbundforschungsvorhaben untersuchten Betons [32]

Unbestritten ist der Beitrag der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung zur Schonung natürlicher Ressourcen. Dieser Beitrag wird allerdings über die Ökobilanzindikatoren nach [21] aktuell nur unzureichend sichtbar.

## 6 Ausblick

Mit fortschreitenden technisch-wissenschaftlichen Entwicklungen sowie politisch und gesellschaftlich gewollten Veränderungen zu einer größeren Bedeutung der Ressourceneffizienz und Nachhaltigkeit ist absehbar, dass die Verwendung von rezyklierten Materialien in der Betonherstellung zukünftig zunehmen wird. Bislang beschränkt sich die Kreislaufführung von Betonausgangsstoffen weitgehend auf rezyklierte Gesteinskörnungen, die aus dem Rückbau von Betonbauwerken gewonnen werden. Verglichen mit primären Gesteinskörnungen weisen Rezyklate im Regelfall eine erhöhte Porosität und Wasseraufnahme auf, die sich negativ auf Betoneigenschaften auswirken können. Die Verarbeitbarkeit von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen im frischen Zustand ist erschwert. Betonfestigkeiten und der Korrosionswiderstand nehmen meist ab und Betonverformungen zu, wenn ein steigender Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen eingesetzt werden. Eigenschaften von rezyklierten Gesteinskörnungen und daraus hergestellten Betonen werden durch internationale Kooperationen wie RILEM oder *fib* erfasst und bewertet. Perspektivisch soll dies in der Bemessung von Betonbauteilen, z. B. nach *fib* Model Code 2020 [35] der der derzeit in Entwicklung befindlichen Neufassung des Eurocode 2 berücksichtigt werden. Insbesondere das Brandverhalten von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen bedarf weiterer Untersuchungen, bevor eine entsprechende Normentwicklung vorangetrieben werden kann. Die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung dient vor allem der Schonung natürlicher Ressourcen, während der Einfluss auf andere Ökobilanzparameter wie z. B. das Treibhauspotenzial im Vergleich mit Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung i. d. R. nur gering ist. Eine signifikante Verbesserung der Ökobilanz könnte jedoch nur erzielt werden, wenn Rezyklate auch im Zement eingesetzt werden, da dieser für den überwiegenden Anteil der Umweltwirkungen des Betons verantwortlich ist. Derzeit befinden sich Zemente mit reaktivierten Recyclingmehlen als Hauptbestandteil in Entwicklung. Hier ist zu erwarten, dass höhere Anteile am Zement ohne negative Beeinflussung der Zementeigenschaften realisiert werden können.

## 7 Literaturverzeichnis

- [1] Benzel, L. (2019) Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton, in: Nolting, U. et al. [Hrsg.] Ressourceneffizienter Beton: Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis. Karlsruhe, S. 13-20.
- [2] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (2020) Deutschland - Rohstoffsituation 2019. [https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min\\_rohstoffe/Produkte/produkte\\_node.html](https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html).
- [3] Höffgen, J. P. et al. (2021) Gesteinskörnungen: Zukünftige Rohstoffversorgung, in: beton, H. 4, S. 112-119.
- [4] Statistisches Bundesamt Bauschuttzubereitungsanlagen: Deutschland, Jahre, Abfallarten [online]. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> [Zugriff am: 4. Jan. 2024].
- [5] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg Abfall: Bauschuttrecycling- und Asphaltmischanlagen [online]. <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Abfall/a2d02.jsp> [Zugriff am: 28. Jun. 2022].
- [6] Müller, A. (2018) Baustoffrecycling - Entstehung - Aufbereitung - Verwertung. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden.
- [7] DIN 1045-2:2023-08 (2023) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton, in: Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.] Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [8] DIN EN 933-11:2021-04 (2021) Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen - Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober recycelter Gesteinskörnung, in: Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.] Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [9] DAfStb-Richtlinie (2010) Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, in: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) [Hrsg.] Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [10] InformationsZentrum Beton GmbH - Zement-Merkblatt Betontechnik B 30, Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung - R-Beton, 11/2021
- [11] Mefteh, H. et al. (2013) Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete, in: Journal of Cleaner Production 54, S. 282-288. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.009>
- [12] Poon, C. S. et al. (2004) Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete, in: Cement and Concrete Research 34, H. 1, S. 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8)
- [13] Zhu, Y.-G. et al. (2013) *Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete*, in: Cement and Concrete Composites, H. 35, S. 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.08.008>
- [14] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K. (2015) The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review, in: European Journal of Environmental and Civil Engineering 19, H. 7, S. 825-849. <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>
- [15] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K. (2015) Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete, in: Construction and Building Materials 83, S. 108-118. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034>
- [16] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K. (2016) Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete, in: Journal of Cleaner Production 112, S. 2171-2186. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.10.064>

- [17] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K. (2015) Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review, in: *Construction and Building Materials* 77, S. 327-339. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102>
- [18] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K. (2015) Comparative analysis of existing prediction models on the creep behaviour of recycled aggregate concrete, in: *Engineering Structures* 100, S. 31-42. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2015.06.004>
- [19] Silva, R. V. et al. (2015) Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete, in: *Cement and Concrete Composites* 62, S. 22-32. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017>
- [20] Silva, R. V. et al. (2015) Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete, in: *Materials Research* 18, H. 2, S. 427-440. <https://doi.org/10.1590/1516-1439.000214>
- [21] DIN EN 15804:2012-04 (2012) Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte, in: Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.] Beuth Verlag GmbH, Berlin, ktuelle Version 2022-03 verfügbar
- [22] Fernandes, B. (2022) Fire behaviour, spalling and residual durability of concrete made with recycled concrete aggregates, *Civil Engineering*. Université de Pau et des Pays de l'Adour
- [23] prEN 1992-1-2:2022-03 (2022) - Eurocode 2: Design of concrete structures – Part 1-2: Structural fire (zum "CEN Formal Vote" eingereichte Version von 10.11.22)
- [24] Höffgen, J. P. et al. (2023) Entwicklung thermisch-mechanisch aktivierter Beton-Recyclingmehle als Betonzusatzstoff - Projektvorstellung und erste Ergebnisse, in: *Beton- und Stahlbetonbau* 118, H. 4, S. 239-246. <https://doi.org/10.1002/best.202200127>
- [25] ISO 834-1:1999-09 (1999) Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements, in: International Organization for Standardization (ISO) [Hrsg.], Switzerland
- [26] Zega, C.J. et al. (2006) *Recycled concrete exposed to high temperatures* in: *Magazine of Concrete Research* 10, S.675-682.
- [27] Shaikh, F. U. (2018) Mechanical properties of concrete containing recycled coarse aggregate at and after exposure to elevated temperatures, in: *Structural Concrete*, 19, S. 400-410
- [28] Sarhat, S. R.; Sherwood, E. G. (2013) Residual Mechanical Response of Recycled Aggregate Concrete after Exposure to Elevated Temperatures, in: *Journal of Materials in Civil Engineering*
- [29] Khan, A.; Aziz, T.; Fareed, S.; Xiao, J. (2020) Behaviour and Residual Strength Prediction of Recycled Aggregates Concrete Exposed to Elevated Temperatures, in: *Arabian Journal for Science and Engineering* 45:8241-8253
- [30] Auroy, M.; Daval, C.; Labetoulle, C.; Robert, F. (2017) Comportement au feu des bétons de granulats recyclés, in: *Rapport de Recherche, Recybeton (Projet National de recherche et développement)*
- [31] DIN EN 197-5:2021-07 (2021) Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEMII/C-M und Kompositzement CEM VI, in: Deutsches Institut für Normung e.V. [Hrsg.] Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [32] Böing, R.; Knappe, F.; Müller, C.; Reiners, J.; Reinhardt, J.; Theis, S. (2022) Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation", Schwerpunkt 3: Ökobilanz, Praxistest und Transfer, in: *DAfStb* [Hrsg.] Schriftenreihe, H. 641. <https://publikationsserver.thm.de/xmlui/handle/123456789/270>
- [33] Carriço, A.; Bogas, J. A.; Guedes, M. (2020) Thermoactivated cementitious materials - A review, in: *Construction and Building Materials* 250, S. 118873.

- [34] Zajac, M. et al. (2023) Enforced carbonation of cementitious materials, in: Cement and Concrete Research 174, S. 107285. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107285>
- [35] Tošić, Nikola; Torrenti, Jean Michel; Sedran, Thierry; Ignjatović, Ivan (2021): Toward a codified design of recycled aggregate concrete structures: Background for the new fib Model Code 2020 and Eurocode 2. In: Structural Concrete 22 (5), S. 2916–2938. <https://doi.org/10.1002/suco.202000512>.
- [36] Carriço, Ana; Bogas, José Alexandre; Guedes, Mafalda (2020): Thermoactivated cementitious materials – A review, In: Construction and Building Materials 250, S. 118873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>

## 8 Autoren

### **Dr.-Ing. Jochen Reiners**

VDZ Technology gGmbH  
Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf  
jochen.reiners@vdz-online.de

### **Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller**

VDZ Technology gGmbH  
Toulouser Allee 71  
40476 Düsseldorf  
christoph.mueller@vdz-online.de

### **Jan P. Höffgen, M.Sc.**

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Straße 3  
76131 Karlsruhe  
jan.hoeffgen@kit.edu

### **Maureen Denu, M.Sc.**

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Straße 3  
76131 Karlsruhe  
maureen.denu@kit.edu

### **Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn**

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie  
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)  
Gotthard-Franz-Straße 3  
76131 Karlsruhe  
frank.dehn@kit.edu