

Verbundprojekt InnoBeton

Innovative Technologien zur Entwicklung eines neuartigen reaktiven Betonzusatzstoffs aus feinem Betonabbruch (Brechsand) – Ressourceneffizienz im Baustoffrecycling



Das Vorhaben

Die Bauindustrie und insbesondere der Betonbau stehen vor tiefgreifenden Veränderungen. Beton benötigt Zement als Bindemittel, um tragfähige und langlebige Bauwerke des Hochbaus in der Infrastruktur zu errichten. Die deutsche Zementindustrie emittiert jährlich ca. 20 Mio. Tonnen CO₂ und benötigt erhebliche Mengen Energie für das Brennen von Zementklinker. Der partielle Ersatz von Zementklinker durch alternative reaktive Bindemittel stößt dabei an seine Grenzen, da letztere in Zukunft aufgrund der Reduktion fossiler Brennstoffe immer knapper werden. Das Verbundprojekt **InnoBeton** befasste sich mit der Entwicklung und Bewertung eines neuartigen rezyklierten alternativen Bindemittels aus aktiviertem Betonabbruch. Dieser wird bei moderaten Temperaturen thermisch aktiviert, wobei verglichen mit der Zementklinkerherstellung signifikant weniger thermische Energie benötigt und nahezu kein CO₂ freigesetzt wird. Die aufbereiteten Betonbrechsande wurden durch das breit aufgestellte Konsortium aus Aufbereitungsunternehmen, Zement- und Betonherstellern, Prüflaboren sowie wissenschaftlichen Partnern als alternative Zementhauptbestandteile und Betonzusatzstoffe analysiert und zum

Abschluss des Projekts weltweit erstmalig für Herstellung von Transportbeton im industriellen Maßstab verwendet. InnoBeton wurde im Rahmen des 7. Energieforschungsprogramms der Bundesregierung (BMWK/BMWE) gefördert.

Das Konsortium

Das **Karlsruher Institut für Technologie (KIT)** bringt im Projekt InnoBeton umfassende wissenschaftliche Kompetenz aus den Bereichen Kreislaufwirtschaft, Ressourcenmanagement und Baustofftechnologie ein und bildet damit eine wichtige Basis. Dabei ergänzen sich die Expertisen des Instituts für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP) und des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustoffe und Betonbau (IMB) mit der angeschlossenen Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe (MPA).

Das **IIP** beschäftigt sich mit der Analyse, Bewertung und Optimierung industrieller Wertschöpfungssysteme. Ein besonderer Schwerpunkt liegt auf der Gestaltung nachhaltiger und ressourceneffizienter Produktion- und Kreislaufwirtschaftssysteme sowie auf Fragestellungen der Produktions-, Standort- und Logistikplanung. Die Forschungsgruppe „Ressourcenmanagement in der bebauten Umwelt“ verfügt über umfangreiche Erfahrungen in den Bereichen Rückbau, Recycling und Kreislaufwirtschaft im Bauwesen sowie im regionalen Ressourcenmanagement. Ziel ist es, Stoff- und Wertschöpfungsketten über den gesamten Lebenszyklus hinweg zu betrachten und mithilfe techno-ökonomischer und ökologischer Analysen Entscheidungsgrundlagen für eine nachhaltige Nutzung von Ressourcen zu entwickeln.

Das **IMB/MPA** verbindet natur- und ingenieurwissenschaftliche

„Die Bauwirtschaft ist einer der größten anthropogenen Ressourcenverbraucher überhaupt. Mit InnoBeton wollten wir beweisen, dass eine echte Ressourcenwende möglich ist – indem wir das, was heute noch oft als Bauabfall bezeichnet wird, als das behandeln, was er sein kann: ein Rohstoff von morgen, der sich in zirkuläre Stoffkreisläufe einspeisen lässt.“

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann, Leiter des KIT-IIP

Grundlagenforschung mit industrienaher, angewandter Forschung an Baustoffen und Bauprodukten. Ein Schwerpunkt liegt auf der umfassenden Charakterisierung, Entwicklung und Prüfung von Baustoffen, wobei neben etablierten Materialien insbesondere auch neuartige und ressourcenschonende Baustofflösungen untersucht werden. Hierfür stehen moderne Analyse- und Prüfmethoden sowie umfangreiche Erfahrung in der Bewertung von Materialeigenschaften, Dauerhaftigkeit und Langzeitverhalten zur Verfügung. Durch die enge Zusammenarbeit mit Industrie und öffentlicher Hand sowie die aktive Beteiligung an nationalen und internationalen Regelsetzungs- und Normungsgremien trägt das IMB/MPA dazu bei, innovative Baustoffentwicklungen wissenschaftlich abzusichern und deren Überführung in die praktische Anwendung zu unterstützen.

„Das Bauen mit Beton steht vor besonderen Herausforderungen. Wir brauchen innovative Ansätze, die natürliche Ressourcen sparen und Emissionen reduzieren. Das Projekt InnoBeton liefert dafür eine Lösung.“

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn, Leiter des KIT-IMB/MPA

Die beteiligten Unternehmen Heinrich Fees, Scherer + Kohl, Gebr. Pfeiffer und TBS Transportbeton verfolgen entlang der gesamten Wertschöpfungskette das gemeinsame Ziel, die Betonherstellung ressourcenschonender, kreislauffähiger und CO₂-ärmer zu gestalten.

Heinrich Feess GmbH & Co. KG setzt dabei bereits auf die hochwertige Verwertung von Bau- und Abbruchmaterialien. Durch eine möglichst sortenreine Erfassung und gezielte Aufbereitung sollen mineralische Abfälle nicht entsorgt, sondern als hochwertige Sekundärrohstoffe wieder in den Baustoffkreislauf zurückgeführt werden. Damit trägt das Unternehmen zur

Schonung natürlicher Ressourcen und knapper Deponiekapazitäten bei.

Scherer + Kohl GmbH ergänzt Feess dabei und ist auf Abbruch, Entsorgung und Baustoffrecycling spezialisiert und verfolgt das Ziel, mineralische Bauabfälle hochwertig aufzubereiten und als qualitätsgesicherte Sekundärbaustoffe wieder in den Stoffkreislauf zurückzuführen.

Gebr. Pfeiffer SE ergänzt diese Kompetenzen durch seine langjährige Erfahrung in der Mahl- und Aufbereitungstechnik mineralischer Rohstoffe. Im Mittelpunkt stehen effiziente und industriell skalierbare Verfahren, mit denen Materialien gezielt aufbereitet und gleichzeitig Energie- und Ressourcenverbrauch reduziert werden können. Diese Expertise ist insbesondere für die Übertragung neuer Recyclingverfahren vom Labor- auf einen industriell relevanten Maßstab von Bedeutung.

„TBS engagiert sich als regionaler Vorreiter seit vielen Jahren für die Herstellung von ressourceneffizienten Kompositementen und Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Durch die Entwicklung von rezyklierten Bindemitteln sichert sich TBS ihre Zukunft, da bei einem Wegfall von Flugaschen und Hüttensanden ein Ersatzzusatzstoff und Bindemittel in der Beton- und Zementherstellung benötigt wird.“

Joachim Gilles, Geschäftsführer TBS

„Das Mitwirken an der Entwicklung zukunftsfähiger Baustoffe ist eine spannende Aufgabe und ein wichtiger Teil unserer Unternehmensphilosophie. Deshalb ist es uns eine große Freude, Teil des InnoBeton-Teams zu sein.“

Dipl.-Ing. David Dreher, Geschäftsführer mbl

weiteren mineralischen Baustoffen. Neben der Prüfung und Qualitätssicherung begleitet mbl auch weitere Forschungsprojekte und beschäftigt sich mit der Entwicklung und Eigenschaftsprüfung neuer Betonrezepturen, wie auch im InnoBeton-Projekt, darunter RC- und Ökobetone.

Das Problem

Zementherstellung

Die Zementherstellung ist mit hohem Verbrauch natürlicher Rohstoffe sowie erheblichen CO₂-Emissionen und Energieverbrauch verbunden. Bei der Herstellung einer Tonne CEM I entstehen in Deutschland rund 875 kg CO₂ (brutto). Zudem werden etwa 3,6 GJ Energie pro Tonne Klinker benötigt (Stand 2022). Ein wesentlicher Teil der Emissionen entsteht prozessbedingt bei der Herstellung des Zementklinkers. Der Zement in Beton wirkt als Bindemittel und ist damit ein essenzieller Bestandteil, der die Einzigartigkeit

TBS Transportbeton Rhein-Neckar GmbH & Co. KG schließt die Wertschöpfungskette als Zement- und Betonhersteller ab. Ein wesentlicher Fokus liegt auf der Entwicklung CO₂-reduzierter Betone, unter anderem durch die Verringerung des Klinkeranteils und den Einsatz alternativer Rohstoffe. Im Zusammenspiel der Unternehmen entsteht damit eine durchgängige Strategie: vom Rückbau und der Bereitstellung geeigneter Betonabbruchmaterialien über deren effiziente Aufbereitung bis hin zur erneuten Nutzung als hochwertiger Bestandteil von Zement und Beton. Das Konsortium verbindet so Kreislaufwirtschaft und Ressourcenschonung mit dem Ziel, die CO₂-Emissionen der Betonherstellung nachhaltig zu reduzieren.

Peterbeton und mbl Mineral- und Betonlabor ergänzen das Konsortium insbesondere bei der praxisnahen Erprobung, Qualitätssicherung und späteren Anwendung der entwickelten Lösungen. Als regional etablierter Hersteller von Transportbeton verfolgt **peterbeton Rudolf Peter GmbH & Co. KG** das

Ziel, hochwertige Betonprodukte mit einem verantwortungsvollen Umgang mit Ressourcen und Umwelt zu verbinden. Kreislaufwirtschaft ist bereits ein Teil der Unternehmenspraxis: Restbeton wird möglichst vollständig wiederverwendet und auch RC-Betone gehören zum bestehenden Produktportfolio. Darüber hinaus sind mehrere Werke nach dem Concrete Sustainability Council (CSC) für nachhaltiges Wirtschaften zertifiziert.

mbl Mineral- und Betonlabor GmbH bietet die Schnittstelle zwischen Forschung, Materialentwicklung und praktischer Anwendung. Als akkreditiertes Prüf- und Forschungslabor verfügt das Unternehmen über umfangreiche Erfahrung in der Untersuchung von Zement, Beton, Gesteinskörnungen und

„Der Einsatz innovativer, ressourcenschonender und klimafreundlicher Ausgangsstoffe bei der Herstellung von Beton ist essentielle Voraussetzung für die Transformation der Betonbauweise und Identität unserer Unternehmenskultur bei peterbeton.“

Dipl.-Ing. Mathias Jakob, Geschäftsführer peterbeton

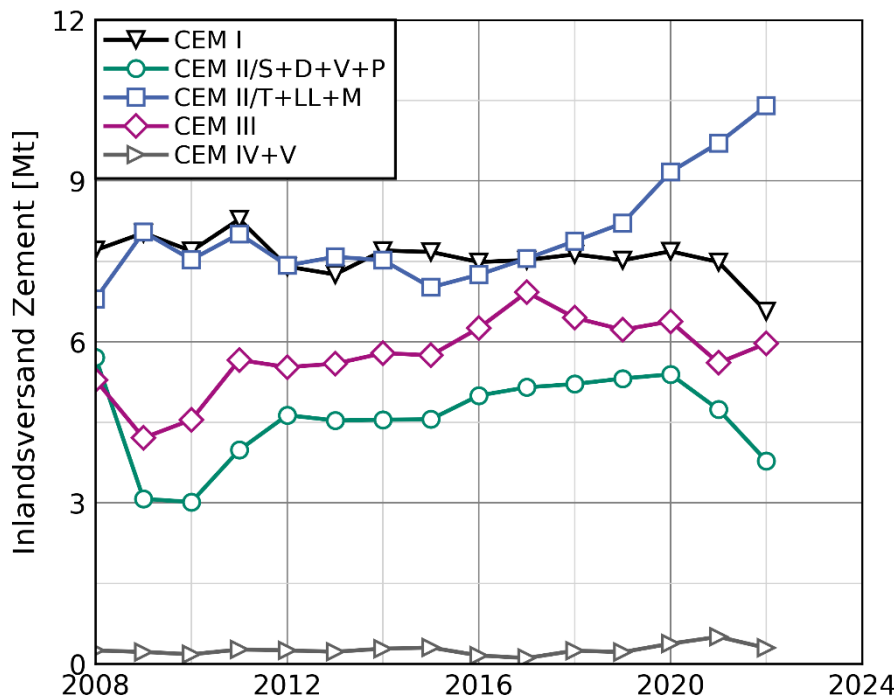


Abbildung 1: Zeitliche Entwicklung des deutschen Inlandsversands von Zement nach Zementarten [6] (angepasst)

von Beton in der Bauindustrie prägt.

Die Herstellung von Zementen setzt deshalb zunehmend auf die Substitution des Zementklinkers durch alternative Zementhauptbestandteile. Dadurch entstehen Kompositzemente mit zwei oder drei Hauptbestandteilen (CEM II – VI), die in DIN EN 197. Klassischer Portlandzement, bei dem ausschließlich Zementklinker eingesetzt wird (CEM I) wird immer weniger hergestellt. Im Mittel über alle Zementarten liegt der Gehalt an Zementklinker, der sog. Klinkerfaktor bei 0,7. Eine weitere Reduktion scheitert perspektivisch an der Verfügbarkeit alternativer reaktiver Bindemittel. Etablierte klinkerreduzierende Zementbestandteile wie Flugasche und

Hüttensand werden zunehmend knapper. Der Ausstieg aus der Kohleverstromung reduziert die Verfügbarkeit von Flugasche, während Veränderungen in der Stahlproduktion langfristig auch das Angebot an Hüttensand eingeschränkt. Damit steigt der Bedarf an neuen, möglichst regional verfügbaren Sekundärrohstoffen.

Aufkommensanalyse

Für die Nutzung von Betonabbruch als Sekundärrohstoff muss bekannt sein, wann, wo und in welchen Mengen dieser künftig verfügbar sein wird. Eine zulässige Abschätzung ist jedoch herausfordernd, da Abfallstatistiken für Beton in Deutschland nur für einen

begrenzten Zeitraum vorliegen und langfristige Entwicklungen daher nur eingeschränkt abbilden können. Hinzu kommt, dass das zukünftige Aufkommen wesentlich vom Gebäudebestand, den historischen Betonmengen und den schwer vorhersehbaren Lebensdauern von Gebäuden und Infrastrukturen abhängt. Da Betonabbruch zudem dezentral anfällt und aufgrund seines hohen Gewichts lange Transportwege ökonomisch und ökologisch nachteilig sind, muss neben der zeitlichen auch die räumliche Verfügbarkeit berücksichtigt werden. Eine belastbare Aufkommensanalyse bildete damit eine zentrale Grundlage für die Planung zukünftiger regionaler Recycling- und Wertschöpfungsketten.

Das Konzept

Thermische Aktivierung

Die thermische Aktivierung von Betonbrechsanden nutzt die Instabilität der Zementhydratphasen bei erhöhten Temperaturen aus, um sie in einen dehydrierten reaktiven Zustand zurückzuführen. Schon bei Temperaturen um 100 °C beginnen die ersten Phasen, chemisch gebundenes Wasser abzugeben. Die wichtigste festigkeitsbildende Verbindung, sog. Calcium-Silicat-Hydrate (C-S-H), zersetzen sich in einem

Betonabbruchprognosen für Deutschland auf Landkreisebene für die Jahre 2030, 2040, 2050 und 2080 [in Tonnen]

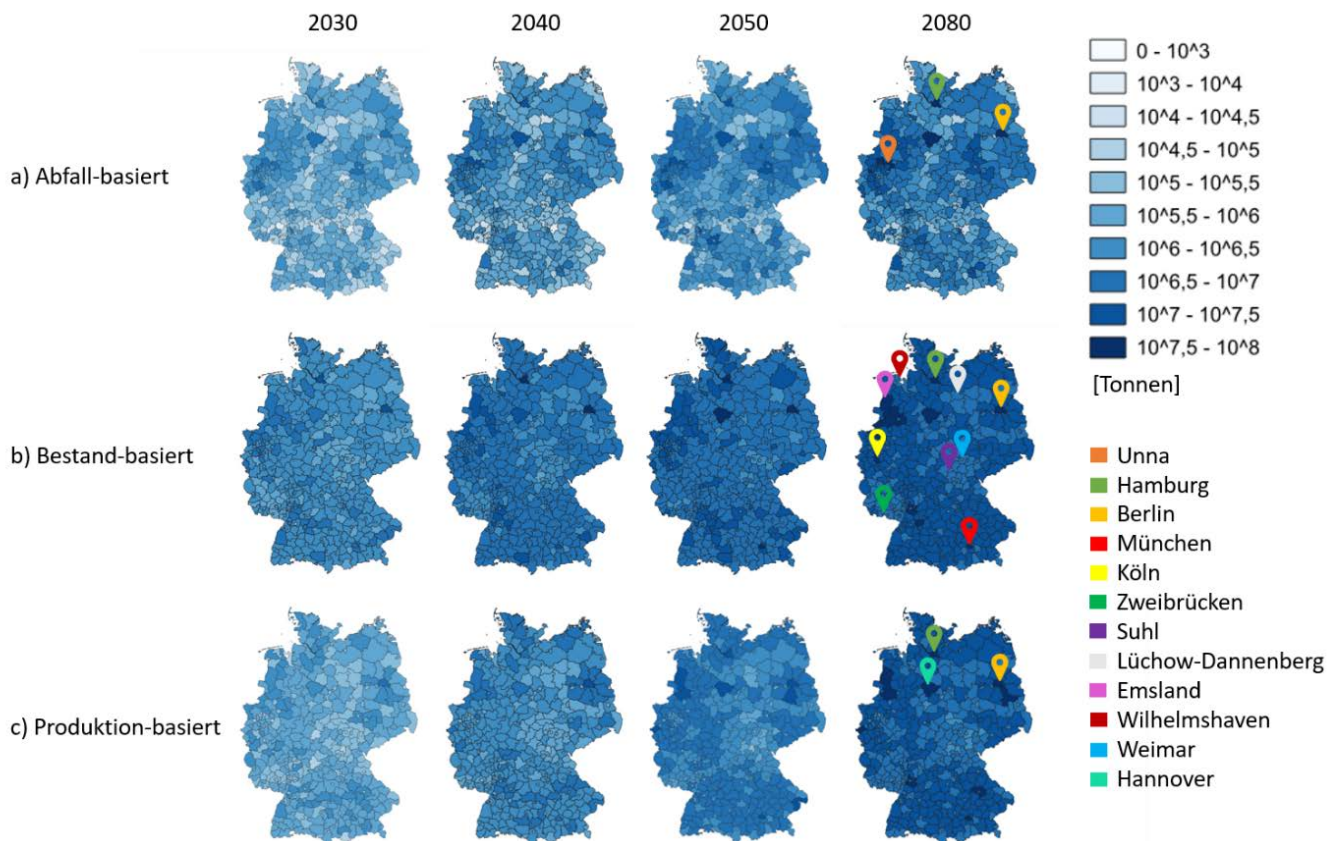


Abbildung 2: Aufkommensanalyse von Betonabbruch in Deutschland auf Landkreisebene [7]

Temperaturbereich bis ca. 500 °C. Bei einer weiteren Steigerung der Temperatur dehydriert zunächst Portlandit (450 – 500 °C), ehe ab ca. 600 °C Carbonatphasen zersetzt werden.

Bei der Dehydratation von C-S-H entstehen reaktive Calcium-Disilikate (sog. α -C2S), die bei erneutem Kontakt mit Wasser wieder C-S-H-Phasen ausbilden. Die Reaktivität weicht jedoch in entscheidenden Punkten von der des Zementklinkers ab: Dadurch, dass C-S-H ein poröses Netzwerk ausbildet, ist auch das wasserfreie α -C2S porös und weist eine hohe spezifische Oberfläche auf. Die

Rehydratation ist daher gegenüber der Klinkerreaktion beschleunigt. Ähnlich wirkt sich das Calciumoxid aus, das bei der Dehydroxylierung von Portlandit entsteht. Im Kontakt mit Wasser wird dieses schnell in neuem Portlandit gebunden, wobei teilweise erhebliche Wärmemengen freigesetzt werden. Calciumoxid entsteht auch bei der Zersetzung der Carbonate, wobei dieser Reaktionsbereich jedoch aufgrund der Freisetzung von CO₂ im Rahmen des vorliegenden Projekts vermieden wurde.

Betonbrechsande enthalten neben den Hydratationsprodukten des Zements, dem sog.

Zementstein, auch feine Gesteinskörnungen. Diese variieren in ihrer Zusammensetzung und ihren Anteilen, was eine Vorhersage des Rehydratationspotentials der aktivierten Brechsande erschwert. In der Literatur verfügbare Ergebnisse vernachlässigen diese Herausforderung jedoch konsequent: Hier werden entweder reine Zementsteine im Labor hergestellt und dehydratisiert, oder jeweils ein realer Brechsand aktiviert. Erstere sind jedoch Materialien, die in der Baupraxis nicht existieren. Industriell hergestellte Betonbrechsande weisen nach der Aktivierung ein deutlich geringeres Hydratationspotential

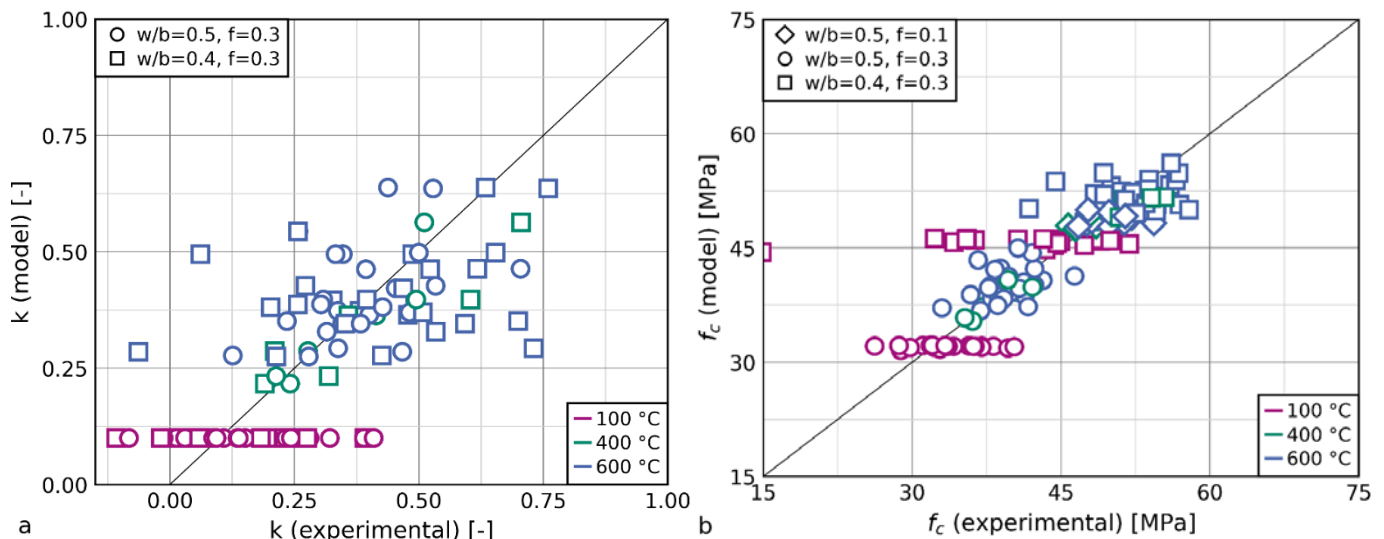


Abbildung 3: Ergebnisse der Modellierung des Anrechenbarkeitsfaktors (k) und der Mörteldruckfestigkeit f_c auf Grundlage des Massenverlusts bei der thermischen Aktivierung [2]

auf. Jedoch zeigt der Vergleich unterschiedlicher Veröffentlichungen, dass eine Übertragbarkeit anhand der Aktivierungstemperatur nicht möglich ist.

In einem vorangegangenen Forschungsprojekt am KIT-IMB/MPA wurden erstmalig die Grundlagen für eine praxistaugliche Umsetzung der thermischen Aktivierung von Betonbrechsanden gelegt. Dabei wurden insgesamt 25 unterschiedliche Betonbrechsande von Aufbereitungsunternehmen aus unterschiedlichen Regionen beschafft und aktiviert. Verglichen wurden die Ergebnisse mit 12 im Labor hergestellten künstlichen Betonbrechsanden und reinem Zementstein.

Als zentrales Ergebnis des Projekts entstand ein empirisches Modell, mit dem der Festigkeitsbeitrag von aktivierten Betonbrechsanden unabhängig

von der Aktivierungstemperatur vorhergesagt werden kann. Als zentraler Parameter wird hier der Masseverlust infolge der Dehydratation verwendet, der für reinen Zementstein, Labormörtel und industriell hergestellte Betonbrechsande den gleichen Einfluss auf die Betondruckfestigkeit hat. Die Ergebnisse zeigen, dass eine gezielte Anreicherung des Zementsteins in den Betonbrechsanden sinnvoll ist. Dies scheitert jedoch bislang daran, dass dieser für Recyclinganlagen wertlos ist.

Im zweiten Teil des Projekts wurde das Modell verwendet, um Betone mit einer angestrebten Festigkeit herzustellen. Die mechanischen Eigenschaften dieser Betone, bei denen bis zu 50 M. % des Klinkers durch aktivierte Betonbrechsande ersetzt wurden, wurden abgesehen von der durch das entwickelte Modell kompensierbaren

Druckfestigkeit kaum beeinflusst. Insbesondere eine hohe Frühfestigkeit wurde hier positiv bewertet. Aufgrund der abweichenden mineralogischen Zusammensetzung der Betonbrechsande war die Dauerhaftigkeit dieser Betone jedoch teilweise negativ beeinträchtigt, was für eine industrielle Umsetzung weitere Untersuchungen erfordert.

Die Ergebnisse des Projekts wurden in sechs wissenschaftlichen Publikationen und einer Dissertation zusammengefasst.

Das Vorhaben: InnoBeton

Das Verbundvorhaben InnoBeton hatte das zentrale Ziel, praxistaugliche Zemente und Betonzusatzstoffe mittels thermischer Aktivierung von Betonbrechsanden zu entwickeln. Der eingangs vorgestellte

Projektverbund umfasst etablierte industrielle und wissenschaftliche Partner aus der Region Karlsruhe/Mittlerer Oberrhein entlang der gesamten Wertschöpfungskette der Altbetonaufbereitung und Betonherstellung.

Feess und **Scherer + Kohl** bildeten den Ausgangspunkt der Wertschöpfungskette und übernahmen insbesondere die Bereitstellung geeigneter Betonabbruchmaterialien. Hierfür wurden unterschiedliche Betonbrechsande aus der betrieblichen Materialaufbereitung bereitgestellt und sowohl die Ausgangsmaterialien als auch die Aufbereitungsverfahren gezielt variiert. Dadurch konnte untersucht werden, welche in der Praxis anfallenden Betonabbruchmaterialien für die Herstellung des neuen Betonzusatzstoffs geeignet sind und welche Anforderungen an deren zukünftige Aufbereitung gestellt werden müssten.

Das **KIT-IMB/MPA** übernahm die wissenschaftliche und baustofftechnische Begleitung der Materialentwicklung. Zunächst wurden die verschiedenen Ausgangsmaterialien mineralogisch, chemisch und physikalisch charakterisiert. Anschließend erfolgte die thermomechanische Reaktivierung im Labormaßstab, wobei unterschiedliche Temperaturen,

Behandlungszeiten und Mahlfeinheiten untersucht wurden. Für erfolgsversprechende Materialien und Rezepturen wurden vertiefende Untersuchungen zu Reaktivität, Materialeigenschaften, Festigkeitsentwicklung, Verformungsverhalten und Dauerhaftigkeit durchgeführt. Damit legte das IMB/MPA die wissenschaftliche Grundlage für die Auswahl geeigneter Materialien und Prozessparameter.

TBS spielte eine zentrale Rolle bei der Entwicklung des reaktiven Betonzusatzstoffs und dessen Einsatz als Zementbestandteil. Hierfür wurden Anforderungen, Referenzemente und relevante Aufbereitungsparameter definiert und die thermomechanisch behandelten Betonfeinstoffe hinsichtlich ihrer Reaktivität und Eignung als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil untersucht. Vielversprechende Varianten wurden ausgewählt, weiter optimiert und anschließend in einen größeren Maßstab übertragen. TBS bildet damit die Schnittstelle zwischen der wissenschaftlichen Materialentwicklung und der industriellen Anwendung.

Gebr. Pfeiffer hat seine Expertise in der industriellen Mahl- und Aufbereitungstechnik eingebracht und mit Informationen zur Maschinerie der Prozesse unterstützt. Im werkseigenen

Technikum fand einer der zentralen Mahlversuche statt.

mbi übernahm die Überführung des entwickelten Zusatzstoffs in praxistaugliche Betonrezepturen. Hierfür wurden zunächst Betone mit unterschiedlichen Anteilen des neuen Zusatzstoffs hergestellt und hinsichtlich ihrer Eigenschaften untersucht. Geeignete Rezepturen wurden anschließend weiterentwickelt. Abschließend wurde die praktische Umsetzbarkeit durch die Herstellung und Untersuchung eines Demonstratorbauteils nachgewiesen.

peterbeton unterstützte die praxisnahe Erprobung und Demonstration des Recyclingbetons. Neben der Bereitstellung ausgewählter Betonbrechsande als Ausgangsmaterial unterstützte das Unternehmen mbi bei der Herstellung der Betone und stellte hierfür Produktionsmöglichkeiten, Arbeitsgeräte und Flächen zur Verfügung. Dadurch konnten die entwickelten Lösungen unter realitätsnahen Bedingungen erprobt werden.

Das **KIT-IIP** begleitete die gesamte Wertschöpfungskette aus systemischer, ökologischer und ökonomischer Perspektive. Zu Beginn wurde untersucht, welche Mengen an Betonabbruch künftig zu welchen Zeitpunkten an welchen Orten zur

Verfügung stehen werden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Material- und Betonentwicklung wurden die Prozessketten hinsichtlich Energie- und Ressourcenbedarfs, CO₂-Emissionen und Wirtschaftlichkeit bewertet. Ergänzend wurden Standorte, notwendige Kapazitäten und Transportwege analysiert und optimiert. Ziel war es, aufzuzeigen, wo und unter welchen Bedingungen die neue Verwertungsrouten technisch, ökologisch und wirtschaftlich sinnvoll umgesetzt werden kann.

Die Ergebnisse

Zemententwicklung

Zu Beginn des Projekts wurden von den Projektpartnern

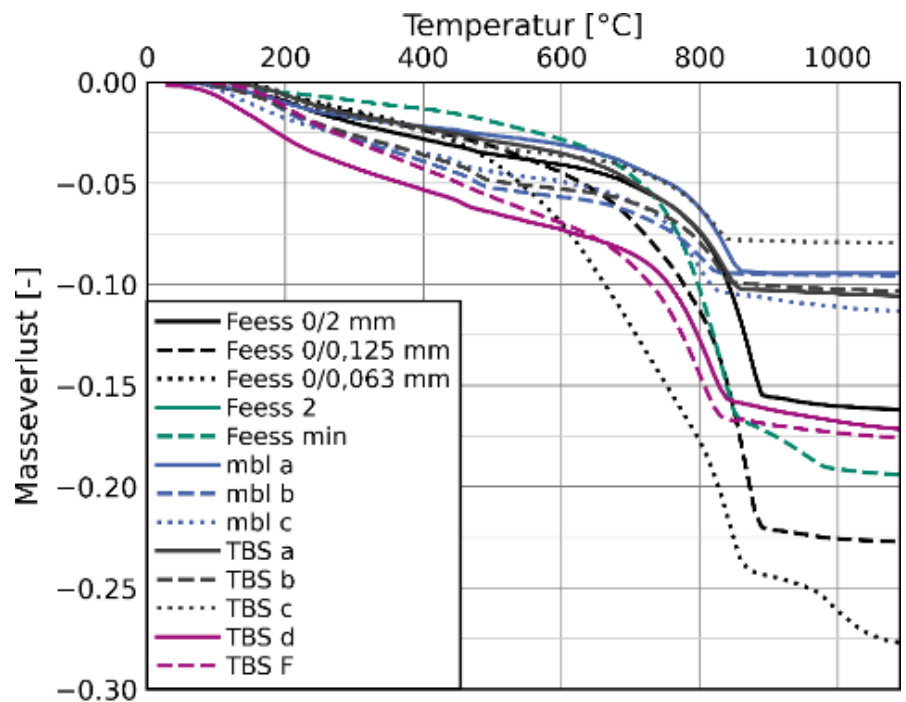


Abbildung 4: Masseverlust während der thermischen Aktivierung unterschiedlicher Betonbrechsande

Betonbrechsande beschafft, die am KIT-IMB/MPA thermisch aktiviert und gemahlen wurden. Diese wurden anschließend mit Zementklinker gemischt, um drei unterschiedliche Kompositzemente herzustellen

- CEM II/B-F 42,5 R mit 30 – 35 M. % Betonbrechsand
- CEM II/C-F 32,5 R mit 45 – 50 M. % Betonbrechsand
- CEM II/C-M (S-F) 42,5 R mit 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Betonbrechsand



Abbildung 5: Zusammensetzung der untersuchten Kompositzemente (v. l. n. r. CEM II/B-F, CEM II/C-F, CEM II/C-M (S-F) (M. Denu)

Für die thermische Aktivierung wurden zwei unterschiedliche Temperaturbereiche betrachtet, die in den vorangegangenen Untersuchungen zielführend waren: 400 °C und 600 °C. Als maßgebendes Kriterium wurde die Druckfestigkeit nach DIN EN 196 1 ermittelt. Zusätzlich wurden zwei Referenzzemente aus dem Produktportfolio von TBS geprüft. Die Ergebnisse bestätigten den Festigkeitszuwachs bei einer Aktivierung bei 600 °C

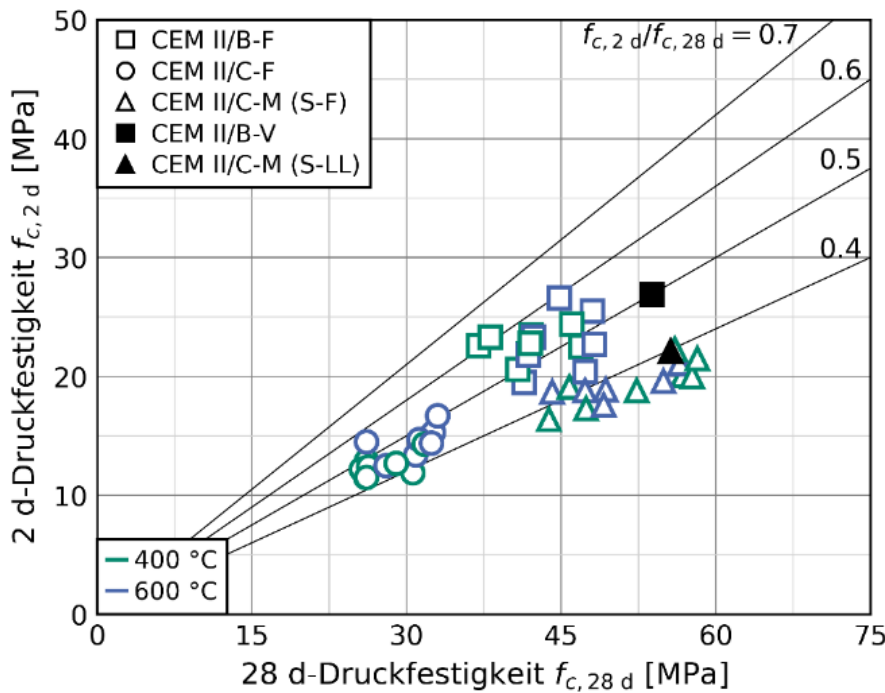


Abbildung 7: Druckfestigkeit der unterschiedlichen Kompositzemente im Alter von 2 d und 28 d (Quelle)

Da Steinkohlenflugasche jedoch aufgrund ihrer granulometrischen Eigenschaften die Frischbetonkonsistenz verbessert, die für den Einsatz als Transportbeton ein zentraler Parameter ist, wurden die Versuche durch umfangreiche Frischbetoncharakterisierungen flankiert.

Ein Transportbeton muss eine festgelegte Konsistenz und Stabilität aufweisen, sodass er nach einer bis zu einstündigen Fahrt auf der Zielbaustelle eingebaut werden kann. Zentraler Materialparameter ist hierbei das Ausbreitmaß, das im Betonwerk eingestellt wird. Neben der Zusammensetzung des Betons aus Gesteinskörnungen, Wasser, Zement und Betonzusatzstoffen kommen hierbei Betonzusatzmittel in Form von Betonverflüssigern oder Fließmitteln sowie Stabilisatoren zum Einsatz. Die Effektivität von

gegenüber 400 °C. Da die Betonbrechsande jedoch nachweislich nur geringe Mengen an Portlandit enthalten, tritt die geringe Erhöhung der Festigkeit gegenüber der signifikanten Erhöhung des Energiebedarfs für die Aktivierung in den Hintergrund.

Im Ergebnis zeigten die Kompositzemente mehrheitlich die erforderliche Druckfestigkeit von $R_c = 42,5 \text{ N/mm}^2$ (Festigkeitsklasse 42,5 R) bzw. $R_c = 32,5 \text{ N/mm}^2$ (Festigkeitsklasse 32,5 R) nach 28 Tagen. Um eine Unterschreitung der Mindestfestigkeit auszuschließen, wurde aufbauend auf den Ergebnissen beschlossen, für die Betonversuche Substitutionsraten an der unteren Grenze der o. a. Spannweiten zu wählen. Der Kompositzement

CEM II/C-M zeigte in den Versuchen keine Verbesserung gegenüber der Referenz, die inertes Kalksteinmehl anstelle der aktivierten Betonbrechsande verwendete, und wurde daher in den weiteren Versuchen nicht beachtet.

Betonentwicklung

Betonversuche fanden zunächst im kleinen Maßstab bei mbl statt. Hierbei wurden Transportbetone aus dem Lieferprogramm von peterbeton, die derzeit mit Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff hergestellt werden, identifiziert. Der erste Schwerpunkt der Untersuchungen war die unabhängige Überprüfung des Modells für den Festigkeitsbeitrag anhand eines praxisüblichen Transportbetons.



Abbildung 6: Mischung der mineralischen Betonkomponenten (J. Gleß)



Abbildung 8: Frischbetonprüfung bei mbl (M. Denu)

Zusatzmitteln muss dabei stets nicht nur auf die einzelnen Betonausgangsstoffe eingestellt werden, sondern hängt zudem von der Mischtechnik ab. Dank der Expertise des Labors von mbl konnten Betone im Chargenmischer hinsichtlich ihrer Zusatzmitteldosierung kalibriert werden, um die Übertragbarkeit auf Transportbetone im industriellen Maßstab vorzubereiten.

Die Untersuchungen zur Betondruckfestigkeit umfassten eine Zementsubstitution von 20 – 50 M. % bei unterschiedlichen Verhältnissen von Wasser zu Zement bzw. Bindemittel (sog. w/z bzw. w/b-Wert). Anhand der Änderung der Druckfestigkeit infolge der Substitution können die w/b-Werte der Mischungen mit aktivierten Betonbrechsanden und die w/z-Werte der Referenzmischungen ineinander umgerechnet werden, wobei

der Festigkeitsbeitrag der Betonbrechsande als Skalierungsfaktor (sog. k-Wert) berechnet wird. Für den exemplarisch verwendeten Betonbrechsand wurde dabei ein k-Wert von 0,17 ermittelt – der exemplarisch verwendete Betonbrechsand weist also 17 % des

Festigkeitsbeitrags verglichen mit dem verwendeten Zement auf. Das o. a. Modell zur Abschätzung des k-Werts anhand des Masseverlusts hatte $k = 0,18$ vorausgesagt.

Ökobilanzierung und ökonomische Analyse

Im Rahmen der ökologischen Bewertung wurden verschiedene Varianten des Recyclingprozesses untersucht, die sich unter anderem hinsichtlich der eingesetzten konventionellen und innovativen Aufbereitungs- und Brenntechnologien, der Energieversorgung sowie der Transport- und Lagerbedingungen unterscheiden. Die Ergebnisse zeigen, dass die thermische Aktivierung von

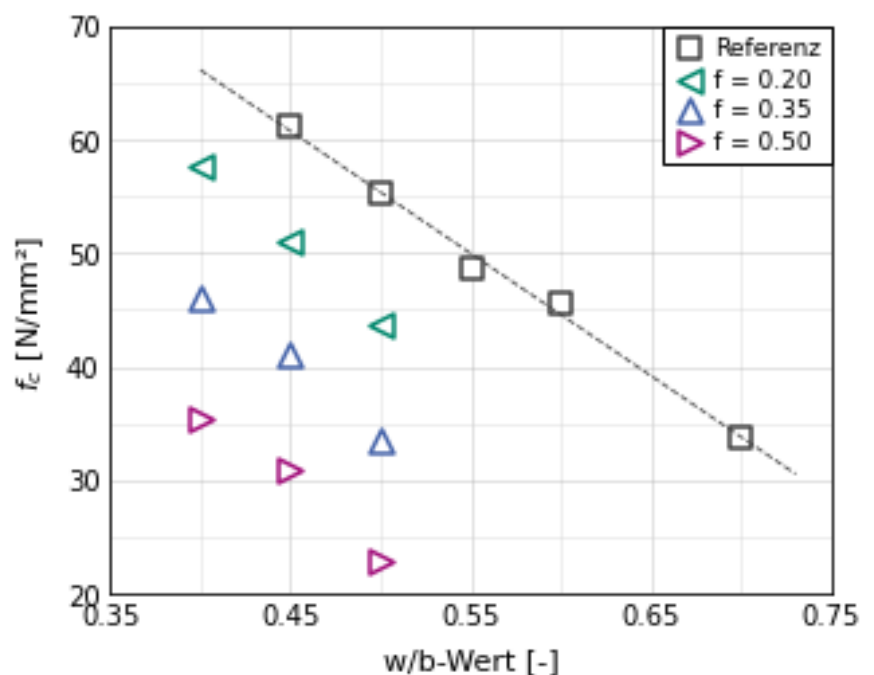


Abbildung 9: Druckfestigkeit f_c in Abhängigkeit des w/b-Werts zur Ermittlung des Anrechenbarkeitsfaktors bei Substitutionsraten $f = 0.2 - 0.5$ [8] (angepasst)

Betonbrechsand über alle untersuchten Varianten hinweg ein deutliches Potenzial zur Reduktion der Treibhausgasemissionen bietet. Die größten Einsparungspotenziale ergeben sich durch die Substitution von Zement, während die Umweltwirkungen des Recyclingprozesses insbesondere durch die eingesetzte Brenntechnologie, den Energiebedarf und die Transportwege beeinflusst werden. Im Vergleich der Verfahren zeigen vor allem energieeffiziente Brennverfahren eine vorteilhafte Umweltbilanz, während konventionelle Verfahren wie Drehrohröfen tendenziell höhere Umweltwirkungen verursachen. Auch auf Betonebene bestätigt sich, dass der Einsatz des thermisch aktivierten Materials als Zementersatz die Umweltwirkungen reduzieren und damit zu einer ressourcen- und klimaschonenderen Betonproduktion beitragen kann.

Die ökonomische Analyse zeigt ebenfalls ein deutliches Potenzial für die wirtschaftliche Umsetzung des entwickelten Recyclingprozesses. Die Produktionskosten werden insbesondere durch die eingesetzte Brenntechnologie und den damit verbundenen Energiebedarf bestimmt. Auch auf Betonebene zeigen die untersuchten Varianten Kostenvorteile gegenüber konventionellem Beton, die mit



Abbildung 10: Mühle im Technikum von Pfeiffer SE (C. Woywadt)

zunehmendem Substitutionsanteil des Zements tendenziell zunehmen.

Der Demonstrator

Zum Projektabschluss wurde die gesamte Wertschöpfungskette demonstriert. Hierfür wurden zunächst zwei Betonbrechsande in ausreichender Menge beschafft. Für die Aktivierung verfolgte TBS zwei Routen:

- Thermische Aktivierung in einem statischen Ofen mit anschließender Vermahlung in

einer Walzenschüsselmühle bei Gebr. Pfeiffer

- Thermische Aktivierung in einem Drehrohrföfen mit anschließender Vermahlung in einer Wälzmühle

Zielparameter waren die Aktivierungstemperatur von mindestens 400 °C und ein mittlerer Partikeldurchmesser von $d_{50} \approx 25 \mu\text{m}$. Die erfolgreiche Aktivierung der Betonbrechsande wurde durch thermogravimetrische Untersuchungen und Partikelgrößenanalysen nachgewiesen.



Abbildung 12: Herstellung des InnoBeton-Demonstrators (M. Denu)

Die aktivierten Brechsande wurden anschließend mit Portlandzement vermischt. Dadurch entstanden zwei Kompositzemente:

- CEM II/B-F 42,5 R mit 30 M. % Betonbrechsand
- CEM II/C-F 32,5 R mit 45 M. % Betonbrechsand

Diese wurden aufbauend auf dem in den Laborversuchen festgelegten Ablauf hinsichtlich ihrer Festigkeit, Frühfestigkeit, Erstarrungszeiten und Hydrationswärmeentwicklung geprüft. Die Ergebnisse zeigen eine Erhöhung der Leistungsfähigkeit der industriell aufbereiteten Kompositzemente gegenüber den Laborversuchen im Kleinmaßstab.



Abbildung 11: Zementmisanlage von TBS (J. Gilles)

Abschließend wurde der CEM II/B-F 42,5 R eingesetzt, um bei peterbeton einen Transportbeton herzustellen. Dabei wurde demonstriert, dass die Überführung in einem Transportbetonfahrzeug und der Einbau in eine typische Betonschulung ohne Einschränkungen funktionieren. Zusätzlich



Abbildung 13: Einfüllen der InnoBeton-Mischung in eine Schalung (M. Denu)

wurden Prüfkörper für zusätzliche Untersuchungen im Labormaßstab gewonnen. Im Vergleich zu einem analog hergestellten Referenzbeton mit einem etablierten Zement der gleichen Festigkeit konnten keine relevanten Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften festgestellt werden.

Die Innovation

Die besten Innovationen sind unscheinbar. Im Vergleich mit etablierten Zementhauptbestandteilen zeichnet sich aktivierter Betonbrechsand durch

eine leicht rötliche Färbung aus, die aus der Oxidation von geringen Mengen Eisenoxid im Zementstein herrührt. In Kompositzementen oder Betonen ist davon fast nichts mehr zu sehen. NutzerInnen dieser Betone sehen nur mit Blick auf den Lieferschein, dass der Zement bis zu 50 % aus „Abfall“ besteht. Im Projekt konnte nachgewiesen werden, dass Betone mit brechsandhaltigen Zementen diverse Anforderungen an unterschiedliche Festigkeits- und Expositionsklassen einhalten und daher für eine Vielzahl von Betonbauteilen geeignet sind.

Das Neue steckt dabei im Detail: Die thermische Aktivierung erhöht die maximale Zementklinkersubstitution durch Brechsande, sodass in der Gesamtbetrachtung trotz der thermischen Aktivierung bei gleichbleibenden Betoneigenschaften eine positive Auswirkung auf die Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit erzielt wird. Überschlägige Berechnungen zu Beginn des Projekts hatten eine Reduktion des thermischen Energiebedarfs von 2,34 GJ und der CO₂-Emissionen von 680 kg je Tonne CEM I, der durch thermisch aktivierten Betonbrechsand substituiert wird, ergeben. Eine genaue Betrachtung ist dabei stets abhängig von konkreten Rahmenbedingungen. Gleichzeitig werden natürliche Ressourcen geschont, indem ein bisheriger Abfallstoff, der in Deutschland kontinuierlich in großen Mengen anfällt, aufbereitet wird.

Der Ausblick

Nach dem Projektabschluss planen die beteiligten Unternehmen die industrielle Umsetzung. TBS bereitet die Investition in einen Drehrohrofen und eine Mühle vor, um künftig selbst mit Zementstein angereicherte Betonbrechsande zu aktivieren und sie in das Produktportfolio zu integrieren. Die Zemente sollen perspektivisch frei

verkäuflich sein oder in Form von Transportbetonen an Endkunden vertrieben werden. Auch peterbeton plant die Aufnahme von Betonen mit aktivierten Betonbrechsanden als Betonzusatzstoff in das Produktportfolio.

Für einen Einsatz müssen jedoch nach dem derzeitigen Stand der Normung Verwendbarkeitsnachweise erbracht werden. Dies kann in der Form von Zustimmungen im Einzelfall (ZiE) oder Allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) in Verbindung mit vorhabensbezogenen oder allgemeinen Bauartgenehmigungen (vbG/abG) erfolgen. Die entsprechenden Nachweise müssen jeweils experimentell erbracht werden, wobei das KIT-IMB/MPA eine hohe grundsätzliche Erfolgswahrscheinlichkeit gezeigt hat. Gleichzeitig arbeitet das KIT daran, thermisch aktivierte Betonbrechsande als

Zementhauptbestandteil oder Betonzusatzstoff in die nächste Generation der Baunormen einzubringen.

Literatur

- [1] Höffgen, J.P., Bauer, M., Dehn, F., 2022. Entwicklung einer Strategie zum Umgang mit Betonbrechsanden in Baden-Württemberg, ThinkTank Industrielle Ressourcenstrategien. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe.
<https://doi.org/10.5445/IR/1000169796>
- [2] Höffgen, J.P., Bruckschögl, S., Wetz, B., Dehn, F., 2025. Influence of thermally activated industrial concrete fines of different origin on mortar strength development. Case Stud. Constr. Mater. 23, e05427.
<https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e05427>
- [3] Höffgen, J.P., Dehn, F., 2025. Influence of thermally activated artificial concrete fines composition on mortar strength development. Dev. Built Environ. 24, 100775.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2025.100775>
- [4] Höffgen, J.P., Schmitt, M., Dehn, F., 2026. Influence of Thermally Activated Artificial Concrete Fines Composition on Concrete Long-Term Behavior. Journal of Building Engineering 122, 115767.
<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2026.115767>
- [5] Höffgen, J.P., Reichert, L., Susset, B., Walz, A., Grathwohl, P., Dehn, F., 2026. Influence of Thermally Activated Industrial Concrete Fines of Different Origin on Concrete Long-Term Behavior. Dev. Built Environ. 26, 100948.
<https://doi.org/10.1016/j.dibe.2026.100948>
- [6] Höffgen, J.P., 2026. Thermally Activated Concrete Fines as Supplementary Cementitious Materials. Dissertation, Karlsruher Institut für Technologie (KIT).
<https://doi.org/10.5445/IR/1000193861>
- [7] Frank, A.L.C., Volk, R., Bischof, R., Schultmann, F., 2026. Quantifying Future Post-Demolition Concrete in Germany: A Multi-Model Projection until 2080“. Journal of Cleaner Production 565, 148446.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2026.148446>
- [8] Gleß, J., 2025. Experimentelle Untersuchung der Eignung thermisch-mechanisch aktivierter Betonbrechsande als Betonzusatzstoff. Bachelorarbeit, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Autoren

Text

Dr.-Ing. Jan P. Höffgen,
KIT-IMB/MPA
Antonia L. C. Frank, M.Sc.,
KIT-IIP

Design

Ulrike Eggmann,
KIT-IMB/MPA
Dr.-Ing. Jan P. Höffgen,
KIT-IMB/MPA

Kontakt

hoeffgen@kit.edu

Förderkennzeichen

03EN2102A (KIT)
03EN2102B (TBS)
03EN2102C (mbl)

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Energie

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Impressum

Karlsruher Institut für Technologie
(KIT)
Institut für Massivbau und Baustoff-
technologie
Abteilung Baustoffe und Betonbau
Materialprüfungs- und Forschungs-
anstalt, MPA Karlsruhe
Kompetenzzentrum für Material-
feuchte, CMM Karlsruhe
Gebäude 50.31
Gotthard-Franz-Str. 3
D-76131 Karlsruhe