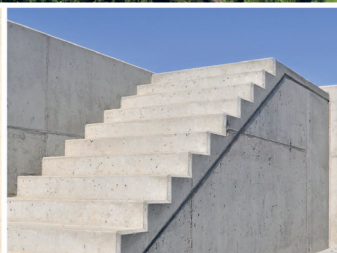


SYMPOSIUM

20. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2024

Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen Von der Ausnahme zur Regelbauweise



Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind, Maureen Denu (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen

Von der Ausnahme zur Regelbauweise

SYMPOSIUM

20. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2024

Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen
Von der Ausnahme zur Regelbauweise

Herausgegeben von

Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind, Maureen Denu

Mit Beiträgen von

Diethelm Bosold

Frank Dehn

Maureen Denu

Andreas Hofer

Jan P. Höffgen

Karin Lang

Daniel Laux

Reto Märki

Christoph Müller

Roland Murr

Johannes Preiß

Sebastian Rauscher

Jochen Reiners

Berthold Schäfer

Tobias Schiller

Veranstalter:

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

76131 Karlsruhe

VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.

Regionalgruppen 8 und 10

InformationsZentrum Beton GmbH

Gerhard-Koch-Straße 2+4

73760 Ostfildern

Bildrechte Titelbildcollage:

Oben: © IMAGO/Eibner Europa,
Unten links: © Guido Schiefer/Alamy Stock Photo,
Unten Mitte: © Zoonar GmbH/Alamy Stock Photo,
Unten rechts, oben: © Viennaslide/Alamy Stock Photo,
Unten rechts, unten: © Schoening/Alamy Stock Photo

Hinweis der Herausgeber

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2024 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-1338-4

DOI 10.5445/KSP/1000167485

Vorwort

Bereits in den beiden vorherigen Symposien wurde die Verantwortlichkeit der Beton- und Zementindustrie bei der Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Da die Möglichkeiten des Recyclings einen wichtigen Baustein zu einer ressourcenschonenden Betonbauweise darstellen, möchten wir im diesjährigen Symposium daran anschließen.

Die Themen konzentrieren sich auf die konkreten Umsetzungsmöglichkeiten beim Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen. Ein Schwerpunkt ist die Etablierung des Bauens mit Recyclingmaterial in den Regelwerken. Wie dieser Weg umgesetzt werden kann oder bereits Anwendung findet, wird im Vordergrund stehen.

Zum Auftakt erhalten Sie einen Überblick über die momentan geltenden Regelwerke hinsichtlich rezyklierter Materialien. Nach dieser Einführung präsentiert ein Vertreter aus der Praxis die Entwicklung der Aufbereitungstechnik. Darauf aufbauend lenken wir unseren Fokus auf die Verfügbarkeit von Recyclingmaterial im Markt und das Konzept der CO₂-Beaufschlagung. Der zweite Teil startet mit einem Grußwort des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Im Anschluss erhalten Sie Informationen zu den Eigenschaften der rezyklierten Materialien. Als konkretes Praxisbeispiel wird der Brenner Basistunnel vorgestellt. Den Schlusspunkt der Veranstaltung bildet ein Ausblick auf die IBA 2027.

Die Veranstalter

Inhalt

	Vorwort	I
Diethelm Bosold	Rezykliertes Material: Die Integration von R-Beton in den neuen Regelwerken	1
Sebastian Rauscher	Entwicklung bei der Aufbereitungstechnik von Altbeton	7
Berthold Schäfer	Rohstoff im Wandel: Verfügbarkeiten und Potenziale mineralischer Sekundärrohstoffe	15
Johannes Preiß Daniel Laux Maureen Denu Jan P. Höffgen Frank Dehn	Das Förderprogramm: Verwaltungsvorschrift R-Beton Baden-Württemberg	19
Reto Märki	Eine Analyse der CO ₂ -Beaufschlagung von rezyklierter Gesteinskörnung - Die technische Umsetzungsmöglichkeiten am Beispiel der Schweiz	25
Jochen Reiners Jan P. Höffgen Maureen Denu Christoph Müller Frank Dehn	Der Einfluss von Recyclingmaterial auf die Eigenschaften von Beton	31
Roland Murr	Praxisbeispiel: Brenner Basistunnel	45
Karin Lang Andreas Hofer Tobias Schiller	Aublick: IBA 2027	57
	Programm der Veranstaltung	71
	Autorenverzeichnis	73
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	75

Rezykliertes Material: Die Integration von R-Beton in den neuen Regelwerken

Diethelm Bosold

Zusammenfassung

Die Richtlinie *Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen* des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton regelt seit vielen Jahren den Einsatz von R-Beton. Mit zunehmender Diskussion um die Themen Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz steigt die Nachfrage nach rezyklierten Gesteinskörnungen. Dieser Entwicklung ist mit der Übernahme und Weiterführung der Regelungen der DAfStb-Richtlinie in die überarbeitete DIN 1045 Rechnung getragen worden. Auch in anderen Bereichen wie in der Zementherstellung spielt dieses Thema eine Rolle. So können in Zukunft auch die feinen Bestandteile der rezyklierten Gesteinskörnungen als weiterer Hauptbestandteil des Zements eingesetzt werden. Neben den teilweise einschränkenden Vorgaben der Regelwerke lassen sich über Zulassungen natürlich immer innovative Ideen umsetzen, also beispielsweise Betonbauteile, die ausschließlich rezyklierten Gesteinskörnungen enthalten.

Schlagwörter: Recycling-Beton, rezyklierte Gesteinskörnung, Nachhaltigkeit, DIN 1045-2:2023-08, Richtlinie

Abstract

The German Committee for Reinforced Concrete's guideline on concrete with recycled aggregates has regulated the use of recycled concrete for many years. With increasing discussion on the topics of sustainability and resource efficiency, the demand for recycled aggregates is growing. This development has been taken into account with the adoption and continuation of the regulations of the DAfStb guideline in the revised DIN 1045. This topic also plays a role in other areas such as cement production. In future, the fine components of recycled aggregates can also be used as a further main component of cement. In addition to the sometimes restrictive specifications of the regulations, innovative ideas can of course always be realised via approvals, for example concrete components that contain exclusively recycled aggregates.

Keywords: recycled aggregate concrete, recycled aggregate, sustainability, DIN 1045-2:2023-08, guideline

1 Allgemeines

Das Wissen um knapper werdende Ressourcen ist einer der wesentlichen Treiber für nachhaltige Entwicklung. Kreislaufwirtschaft ist ein Konzept, bei dem Produkte und Materialien so lange wie möglich in Wertschöpfungskreisläufen zirkulieren. Beton ist ein sehr dauerhafter Baustoff, der bei entsprechender Planung lange Nutzungszyklen ermöglicht. Nach der Nutzung kann Beton recycelt werden und ist als RC-Gesteinskörnung eine wertvolle und nachgefragte Ressource. Die technische Qualität und die Verwendbarkeit der Gesteinskörnung ist u. a. von der Reinheit abhängig. Die aus Abbruchmaterial gewonnene recycelte Gesteinskörnung kann einen Teil der aus der Natur gewonnenen Gesteinskörnungen ersetzen. Solch ein Beton darf genauso für die üblichen Bauteile im Hochbau eingesetzt werden wie Normalbeton. Bereits die Römer setzten Abbruchmaterial als Ersatz der natürlichen Gesteinskörnung in ihrem römischen Beton, dem Opus Caementitium, ein (Abbildung 1). Allerdings war die Motivation wohl eher ökonomischer als ökologischer Art. Zusätzlich konnte man durch das Zumischen von zerstoßenen Ziegelsteinen aus einem Luftkalk einen wasserbeständigen hydraulischen Kalk erzeugen.

In diesem vorliegenden Beitrag wird auf die aktuellen Entwicklungen in den Regelwerken eingegangen.

Die Überarbeitung der DIN 1045-2:2023-08 [1] ist mit der Ausgabe des Weißdrucks im August 2023 erfolgt. Allerdings ist die Einführung zum Redaktionsschluss dieser Veröffentlichung nicht abschließend geklärt. Da die überarbeitete DIN 1045 die technische Entwicklung wiedergibt, findet sie im Vortrag und in dieser Veröffentlichung Berücksichtigung.



Abb. 1: Stück eines römischen Opus Caementitium. Es sind zwei Schichten mit unterschiedlich großen Ziegelbruchstücken zu erkennen. Bild: IZB, D. Bosold

2 Begriffe

In DIN 1045-2 [1] gibt es weiterhin den Begriff „wiedergewonnene ausgewaschene Gesteinskörnung“. Damit ist die Gesteinskörnung gemeint, „die durch Waschen von Frischbeton gewonnen wird“. Neu ist die „wiedergewonnene gebrochene Gesteinskörnung“. Hiermit ist die Gesteinskörnung beschrieben, „die durch Brechen von Festbeton, der noch nicht beim Bauen verwendet wurde, gewonnen wird“. Im Gegensatz dazu wird die recycelte Gesteinskörnung durch Aufbereitung von vorher beim Bauen verwendeten anorganischen Stoffen gewonnen.

3 DAfStb-Richtlinie

In der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit recycelten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [2] wird seit vielen Jahren der Einsatz von R-Beton geregelt. Dabei werden zunächst die Anwendungsgebiete eines R-Betons beschrieben. Dies erfolgt über die Eingrenzung nach Expositionsklassen

bzw. anderen Anforderungen wie z. B. Beton mit hohem Wassereindringwiderstand. Dabei werden verschiedenen Expositionsklassen höchstzulässige Mengen der groben Gesteinskörnung in Volumenprozent vorgegeben. Neben den Expositionsklassen sind auch Vorgaben der damit eng verbundenen Feuchtigkeitsklassen formuliert. Zulässig sind bisher die Feuchtigkeitsklassen WO und WF.

Weiterhin werden Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung beschrieben. Das sind zunächst Vorgaben für enthaltene Abbruchmaterialien wie dem weit überwiegend enthaltenen Betonbruch, aber auch anderen Materialien wie Ziegel, Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton, bitumenhaltige Materialien, Glas und sonstige Stoffe. Viele weitere Anforderungen wie auch Auswirkungen auf Boden und Grundwasser müssen der Gesteinskörnungsnorm DIN EN 12620 [3] entsprechen.

4 DIN 1045-2 NEU

Die neue DIN 1045-2 [1] gibt die technische Weiterentwicklung auch beim R-Beton wider. So sind die Regelungen der DAfStb-Richtlinie [2] in die Norm übernommen und überarbeitet bzw. erweitert worden. Die Liste der zulässigen Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen ist erweitert worden.

Für die Expositionsklassen X0 und XC1 bis XC4 ist der maximal zulässige Anteil bei 45 Vol.-% für Typ 1 geblieben. Bei XF1, XF3 und Beton mit hohem Wassereindringwiderstand ist dieser Anteil um 10 Prozentpunkte auf ebenfalls 45 Vol.-% erhöht worden. Der zulässige Anteil für XA1 ist unverändert geblieben. Neu aufgenommen wurden unter der Feuchtigkeitsklasse WA die Expositionsklassen XD1, XD2, XS1, XS2, XF2 und XF4. Hier beträgt der zulässige Anteil für rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 (Abbildung 2) maximal 30 Vol.-%. Die Werte sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tab. 1: Zulässige Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen nach [1]

Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
Alkalirichtlinie	DIN 1045-2 [1]	Typ 1	Typ 2
WO (trocken)	X0, XC1	≤ 45 Vol.-%	≤ 35 Vol.-%
	X0, XC1 bis XC4		
WF (feucht)	XF1, XF3, Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 45 Vol.-% (+ 10 Vol.-%)	≤ 35 Vol.-% (+ 10 Vol.-%)
	XA1	≤ 25 Vol.-%	≤ 25 Vol.-%
WA (feucht + Alkalizufuhr von außen)	XD1 und XD2 XS1 und XS2 XF2 und XF4	≤ 30 Vol.-%	≤ 20 Vol.-%



Abb 2: Rezyklierte Gesteinskörnung Typ 1 (Betonsplitt). Bild: IZB, D. Bosold

5 DIN EN 197-6

In dieser relativ neuen Norm [4] wird Betonrecyclingmehl als weiterer Hauptbestandteil des Zements definiert und die hiermit möglichen Zementarten festgelegt. Betonrecyclingmehl trägt als Abkürzung den Buchstaben F. Mögliche Zemente sind CEM II F, CEM II M Zemente mit einem beliebigen weiteren Hauptbestandteil oder CEM VI Zemente mit allein Hüttensand als weiteren Hauptbestandteil. Betonrecyclingmehl kann dabei aus Aufbereitungsanlagen für rezyklierte Gesteinskörnungen oder aus wiedergewonnenen Gesteinskörnungen stammen.

Damit gibt es einen weiteren Hauptbestandteil der im Sinne der Kreislaufwirtschaft eingesetzt werden kann. Zusätzlich kann somit auch die feine rezyklierte Gesteinskörnung besser verwendet werden. In der Norm gibt es den Hinweis: „Das Betonrecyclingmehl darf, sofern notwendig, im Zementwerk weiterverarbeitet werden“. Diese Formulierung läßt die Möglichkeit offen, das Betonrecyclingmehl im Zementwerk auch mit CO₂ zu behandeln. Somit erhält man mit dem zukünftig im Zementwerk anfallende CO₂ eine sinnvolle Verwendung und kann das Betonmehl recarbonatisieren. Auf Grund der Feinheit eignet sich das Recyclingmehl mit seiner großen spezifischen Oberfläche besonders gut für die Aufnahme von CO₂.

6 R-Beton in anderen Regelwerken

Bereits gemäß der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ von 2010 [2] darf rezyklierte Gesteinskörnung für Beton mit hohem Wassereindringwiderstand verwendet werden. Dabei gibt es Bedingungen zur Herkunft des Altbetons und seiner Einstufung in eine Alkaliempfindlichkeitsklasse. Ungünstig hinsichtlich einer schädigenden AKR wirkt sich aus, dass der Altbeton und damit auch die alte Gesteinskörnung gebrochen wird und frische Bruchflächen aufweisen kann. Der bei Beton mit hohem Wassereindringwiderstand übliche maßvolle Zementgehalt in Verbindung mit üblicherweise klinkerreduzierten Zementen wirkt sich hingegen günstig aus. Die Einstufung aus der DAfStb-Richtlinie wurde in DIN 1045-2 [1] übernommen. Bei der Einstufung hinsichtlich Alkaliempfindlichkeitsklasse wurde etwas präzisiert. Berücksichtigt wird nun auch die Lage der abgebrochenen Bauwerke in den glazial beeinflussten Ablagerungsgebieten in Norddeutschland. Im ungünstigsten Fall erfolgt eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse EIII-S.

Für Sichtbeton gibt es verschiedene Merkblätter. Das für Ortbeton übliche DBV / VDZ-Merkblatt Sichtbeton [5] verbietet weder den Einsatz von R-Beton noch erlaubt es ihn explizit. Es wird hingegen abgeraten vom Einsatz von Restwasser und Restbeton aus dem Frischbetonrecycling. Erste Bauwerke mit Sichtbeton unter Einsatz von R-Beton zeigen, dass sich R-Beton gut einsetzen lässt. Die Farbe einer Sichtbetonfläche wird durch die feinen Bestandteile der Betonzusammensetzung bestimmt. Das sind die Zementart, der Sand und ggf. Betonzusatzstoffe oder Farbpigmente. Hier hat die rezyklierte Gesteinskörnung, die aktuell noch alleine

im groben Bereich zugegeben wird, keinen Einfluss. Sollte zukünftig auch die feine Gesteinskörnung eingesetzt werden dürfen, ist eine Beurteilung an den zu erstellenden Erprobungsflächen auch in dieser Hinsicht der Farbwirkung zu überprüfen. Die Optik einer Sichtbetonfläche wird besonders stark vom Schalungssystem bestimmt – also Trägerschalung, Rahmenschalung oder sonstige Schalung – und ist damit unabhängig von der Betonzusammensetzung.

Im neuen Merkblatt Sichtbetonfertigeteile [6] wird unter *Abschnitt 7.1.5 Beton* darauf hingewiesen, dass bei bestimmten Gesteinskörnungen „deren Wirkung oder Eignung ab der Sichtbetonklasse SB 2-FT durch die Herstellung von Erprobungsbauteilen dokumentiert werden“ sollten. Der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen ist also nicht explizit ausgeschlossen und wird zur Erprobung freigegeben.

Im Merkblatt Nr. 8 der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e.V. [7] über Architekturbeton wird unter *Allgemeines* auf „individuelle Betonrezepturen mit ausgesuchten Gesteinskörnungen und Zuschlägen“ hingewiesen. Dies ebnet natürlich den Weg, auch ausgesuchte rezyklierte Gesteinskörnungen einzusetzen. Auch hier gilt dann natürlich der weiter hinten formulierte Anspruch, dass „die Gesteinskörnungen aus einer Charge bevorratet werden“ müssen, was auch allgemein für hochwertigen Sichtbeton gilt. Gerade in bearbeiteten Oberflächen von Sichtbeton werden dann die eingesetzten rezyklierten Gesteinskörnungen sichtbar. Die Entwicklung zeigt, dass rezyklierte Gesteinskörnungen inzwischen zielsicher zur Herstellung von Architekturbeton eingesetzt werden. So sind die Fassadenbauteile beim neuen Anbau des Rathauses in Korbach mit bearbeitetem R-Beton ausgeführt worden (siehe Abbildung 3).



Abb. 3: Fassadenausschnitt am neuen Anbau des Rathauses in Korbach. Architekturbeton mit Anteilen rezyklierter Gesteinskörnung mit gestrahlter Oberfläche. Bild: IZB, D. Bosold

7 Zulassungen

Über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) sind Lösungen möglich, die von den aktuellen Regelwerken abweichen. Im Juni 2021 hat die Firma Büscher GmbH & Co. KG aus Heek eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) vom Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) für tragende und nichttragende Innenwandelemente aus Recyclingbeton erhalten, in denen die gesamte Gesteinskörnung durch rezyklierten Gesteinskörnungen ersetzt wurde.

8 Literatur

- [1] DIN 1045-2:2023-08; Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Beuth Verlag, Berlin
- [2] DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“: 2010-09, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Berlin
- [3] DIN EN 12620:2088-07; Gesteinskörnungen für Beton; Beuth Verlag, Berlin

- [4] DIN EN 197-6:2023-12; Zement - Teil 6: Zement mit rezyklierten Baustoffen; Beuth Verlag, Berlin
- [5] DBV/VDZ-Merkblatt "Sichtbeton": 2015-06; Deutscher Beton- und Bautechnikverein E.V. Berlin und Verein deutscher Zementwerke e. V. Düsseldorf
- [6] Merkblatt Sichtbetonfertigteile: 2023-01; Verband Beton- und Fertigteilindustrie Nord e. V. (VBF Nord), Unternehmerverband Mineralische Baustoffe (UVMB) e.V. Bayerischer Industrieverband Baustoffe, Steine und Erden e. V., Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart
- [7] Merkblatt Nr. 8 über Betonfertigteile aus Architekturbeton: 2020-03, Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V., Bonn

9 Autor

Dr.-Ing. Diethelm Bosold

InformationsZentrum Beton GmbH

Neustraße 1

59269 Beckum

diethelm.bosold@beton.org

Entwicklung in der Aufbereitungstechnik

Sebastian Rauscher

Zusammenfassung

Die Bau- und Recyclingindustrie befindet sich zurzeit in einer Phase des dynamischen Umschwungs. Angetrieben durch klima- und ressourcenpolitische Maßnahmen, allen voran die im August 2023 in Deutschland eingeführte Ersatzbaustoffverordnung, verschieben sich Masseströme und Aufbereitungsprozesse von Baustellen hin zu spezialisierten Recyclingzentren. Die Überwachung und Dokumentation mineralischer Ersatzbaustoffe ist ein zentraler Aspekt der Verordnung. Die Recyclingunternehmen können die gesteigerten Massen und komplexen Materialzusammensetzungen nur durch innovative Aufbereitungstechnik wieder hochwertig in den Stoffkreislauf zurückführen. Es existiert eine Vielzahl an Möglichkeiten Sekundärrohstoffe aufzubereiten, zu kontrollieren und zu behandeln. Die Heinrich Feeß GmbH & Co. KG (Feess) beteiligt sich aktiv an Forschungsprojekten, um innovative Wege in der Aufbereitungstechnik zu erkunden und die Herausforderungen der Praxis zu bewältigen. Dieser Text beleuchtet eine Auswahl an Projekten, die aktuell durch Feess bearbeitet werden. Vorgestellt wird das vielversprechende Projekt zur Karbonatisierung von Altbeton. Der Prozess, der auf der Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat basiert, kann dazu verwendet werden, umweltschädliches CO₂ in Recyclingprodukten zu binden. Die Karbonatisierung wird im großtechnischen Maßstab umgesetzt und in die logistischen Rahmenbedingungen eines Recyclingplatzes integriert. Ein weiteres Projekt befasst sich mit dem Aufbau einer effizienten Baustoffsartieranlage, um hochwertige Recyclinggesteinskörnungen herzustellen und die Recyclingquote zu erhöhen. Bei der Entwicklung dieser Anlage konnte Feess die jahrelange Erfahrung im Recycling von mineralischen Abfällen einfließen lassen. Ziel ist die maximale Wertschöpfung in einem wirtschaftlichen und in der Praxis umsetzbaren Rahmen. Ein drittes Projekt, KreiSBau, konzentriert sich auf das Verwerten der feinkörnigen gemischten Bauschuttfraktion im Hochbau. Durch die Reduzierung des Sulfatanteils und die Entwicklung von RC-Bauprodukten wird ein geschlossener Stoffkreislauf angestrebt, um Ressourceneffizienz zu steigern und die Deponierungsrate zu minimieren. Insgesamt zeigen diese Forschungsprojekte das Bestreben Deutschlands, eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Baubereich zu etablieren, indem innovative Technologien und Verfahren in der mineralischen Abfallaufbereitung vorangetrieben werden.

Schlagwörter: Mineralischer Abfall, Aufbereitungstechnik, Massenstrom, Kreislaufwirtschaft, Karbonatisierung, Recycling-Beton

Abstract

The construction and recycling industry is currently in a phase of dynamic change. Driven by climate and resource policy measures, above all the Substitute Building Materials Ordinance introduced in Germany in August 2023, mass flows and treatment processes are shifting from construction sites to specialised recycling centres. The monitoring and documentation of mineral substitute building materials is a key aspect of the ordinance. Recycling companies can only return the increased masses and complex material compositions to the material cycle in high quality by using innovative processing technology. There is a wide range of options for processing, checking and treating secondary raw materials. Heinrich Feeß GmbH & Co. KG (Feess) is actively involved in research projects to explore innovative ways of processing technology and to overcome the challenges of practical application. This text highlights a selection of projects that Feess is currently working on. The promising project for the carbonation of old concrete will be presented. The process, which is

based on the conversion of calcium hydroxide to calcium carbonate, can be used to bind environmentally harmful CO₂ in recycled products. Carbonation is being implemented on an industrial scale and integrated into the logistical framework of a recycling site. Another project is concerned with the construction of an efficient building material sorting plant to produce high-quality recycled aggregates and increase the recycling rate. Feess was able to utilise its many years of experience in the recycling of mineral waste in the development of this plant. The aim is to maximise added value within an economical and practical framework. A third project, KreisBau, focuses on the utilisation of the fine-grained mixed construction waste fraction in building construction. By reducing the sulphate content and developing RC construction products, the aim is to achieve a closed material cycle in order to increase resource efficiency and minimise the landfill rate. Overall, these research projects demonstrate Germany's endeavours to establish a sustainable circular economy in the construction sector by driving forward innovative technologies and processes in mineral waste processing.

Keywords: mineral waste processing technology, mass flow, circular economy, carbonatisation, recycled aggregate concrete

1 Einleitung

Die Aufbereitungstechnik von mineralischen Abfällen erfährt gegenwärtig eine faszinierende Dynamik, die durch mehrere Schlüsselaspekte vorangetrieben wird. Die im August 2023 in Kraft getretene Ersatzbaustoffverordnung [1] stellt eine maßgebliche Triebkraft dar, indem sie den Fokus verstärkt auf die Überwachung und die Dokumentation mineralischer Ersatzbaustoffe legt. Es ist zu erwarten, dass durch die Einführung der Ersatzbaustoffverordnung eine Verlagerung der Aufbereitungsprozesse von der Baustelle in Richtung Recyclingzentren erfolgen wird. In solchen designierten Aufbereitungszentren kann der vorgeschriebene Überwachungsaufwand einfacher und wirtschaftlicher umgesetzt werden. Des Weiteren hat man im Rahmen einer zentralisierten Aufbereitung die Möglichkeit, innovative Wege in der Aufbereitungstechnik voranzutreiben und in der Praxis zu etablieren.

Aufgrund der Komplexität der Materialien und den Anforderungen an das Recycling gewinnen innovative Aufbereitungswege zunehmend an Bedeutung. Beispielhaft wären hierbei neue Sortiertechniken, das Ausschleusen und Eliminieren von Schadstoffen, KI-gestützte optische Bildverarbeitung bei der Annahme von mineralischen Abfällen [2] und die Karbonatisierung von Recyclingmaterial zu nennen. Die Heinrich Feeß GmbH & Co. KG bringt sich als Pionier und Praxispartner in entsprechenden Forschungsprojekten ein. Die multidimensionalen Entwicklungen auf dem Gebiet des mineralischen Recyclings zeugen von einem zukunftsorientierten Ansatz in der Abfallwirtschaft und unterstreichen Deutschlands Bestreben, eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft im Baubereich zu etablieren.

2 Aktueller Stand und Einfluss der Ersatzbaustoffverordnung

Bisher wurde ein Großteil der anfallenden Massen im Bereich Beton (AVV 170101) und Bauschutt (AVV 170107) direkt auf der Baustelle aufbereitet. Durch mobile Aufbereitungsanlagen wie Siebe und Brecher wurden sowohl zertifizierte Straßenbaustoffe als auch einfache Verfüllmaterialien vor Ort hergestellt. Üblicherweise genügte bis August 2023 eine einfache Deklarationsanalytik [3]. Bei speziellen bautechnischen Anforderungen, beispielsweise nach TL Gestein [4], war zusätzlich eine Baustoffprüfung notwendig. Der Umfang dieser Prüfungen war sowohl zeitlich als auch wirtschaftlich vertretbar. Durch die Aufbereitung direkt auf der Baustelle konnte Deponievolumen geschont und Transporte vermieden werden.

Mit dem Inkrafttreten der Ersatzbaustoffverordnung wurde eine Eignungsprüfung bei der Herstellung mineralischer Ersatzbaustoffe eingeführt. Um die Qualität der Recyclingmaterialien hoch und die Prozesse transparent zu halten, wurde eine Betriebsbeurteilung in Verbindung mit einer Erstprüfung bei jedem Wechsel der Baumaßnahme bei mobilen Aufbereitungsanlagen zur Pflicht [6]. Zusätzlich benötigen Aufbereiter ein System zur werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) und eine Fremdüberwachung durch eine akkreditierte Prüfstelle. Im Vergleich zu den außer Kraft gesetzten Verordnungen steigt sowohl der zeitliche als auch der monetäre Aufwand bei der Überwachung eines bauseits hergestellten RC-Materials. Neben den mobilen Anlagen, die direkt am Ort des Abfallanfalls betrieben werden, sind von den verschärften Regelungen auch kleine Aufbereitungsplätze stark betroffen. So wird die Aufbereitung indirekt auf größere Recyclinghöfe verlagert, da der Aufwand für die Etablierung und das fachgerechte Betreiben eines WPK-Systems in größeren Maßstäben niedriger ist. Diese Verlagerung kann allerdings zur Folge haben, dass es zu einem erhöhtem Transportaufkommen bei mineralischen Abfallströmen kommt. Im ländlichen Raum kann diese Entwicklung bereits beobachtet werden. Mineralische Abfälle stellen über 50 % des gesamten Abfallaufkommens Deutschlands dar [6]. Um eine sinnvolle und nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu erreichen, ist es deshalb zwingend notwendig ein flächendeckendes Netz von Recyclingzentren über die gesamte Bundesrepublik zu etablieren. Dabei sollte die Fläche eines Aufbereitungszentrums proportional zum Einzugsgebiet sein.

Als verantwortungsvolles Familienunternehmen ist Feess die Tragweite dieser Entwicklung bewusst. Im firmeneigenen Kompetenzzentrum für Kreislaufwirtschaft (K³) werden Schulungen und Beratungen angeboten, mit dem Ziel die durch jahrelange Praxis angeeignete Erfahrung an alle Interessierten weiterzugeben. Das K³ soll außerdem als Plattform für die Kreislaufwirtschaft der Vernetzung von Lehre, Forschung und Praxis dienen. Durch die Mitarbeit in unterschiedlichen Forschungsprojekten möchten wir einen Beitrag zur Transformation in Richtung nachhaltiger Kreislaufwirtschaft leisten und uns bestmöglich auf die Zukunft vorbereiten. Einige zentrale Aspekte dieser Bemühungen sind im Folgenden zusammengefasst.

3 Karbonatisierung

Im Bereich des Bauwesens wird der Begriff "Karbonatisierung" verwendet, um eine chemische Reaktion zu beschreiben, die in jedem Beton in Anwesenheit von Kohlendioxid und Feuchtigkeit stattfindet. Dabei wird aus dem Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ des Zementsteins unter Einwirkung von CO_2 Calciumcarbonat CaCO_3 , (...) gebildet. Diese chemische Umwandlung hat unmittelbar keinen schädlichen Einfluss auf den Beton. Tatsächlich kann die Bildung von Calciumcarbonat während des Karbonatisierungsprozesses zu einer Erhöhung der Festigkeit führen, was grundsätzlich als positiv betrachtet werden kann. Im Fall von Stahlbeton führt jedoch der durch diesen Prozess verursachte Verlust des alkalischen Milieus (Depassivierung) zur Korrosion der Bewehrung. Diese Bewehrungskorrosion kann zu erheblichen Schäden am Bauteil führen [7]. Bei Altbeton oder daraus hergestellten Recycling-Gesteinskörnungen spielt der pH-Wert allerdings nur eine untergeordnete Rolle, da dieser kaum Einfluss auf den pH-Wert eines daraus produzierten Betons hat.

In einem vom Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft geförderten Projekt setzt Feess in Zusammenarbeit mit dem Schweizer Start-Up Unternehmen Neustark den zuvor erprobten Karbonatisierungsprozess [8] in einem wirtschaftlich technischen Maßstab um. Die Karbonatisierung anfallender Restbetonmassen ist für Feess die logische Erweiterung der bestehenden Aufbereitungstechnik. Zur praktischen Umsetzung wurde eine Silo-Anlage gewählt. Diese ist effizient und platzsparend. Im silobasierten Karbonatisierungsprozess werden Betongranulat und weitere Recycling-Baustoffe während der Lagerung in Silokammern mit CO_2 behandelt. CO_2 wird dafür zunächst in verflüssigter Form angeliefert und in einem Tank gelagert. Vom Tank aus wird das Flüssiggas mittels eines atmosphärischen Verdampfers in die Gasphase umgewandelt und dann durch Injektionssysteme, die in den Silokammern montiert sind, präzise zugegeben. Die Prozesssteuerung erfolgt über eine Messung des CO_2 -Pegelstands im Silo. Zwischen Materialobergrenze und der oberen Siloöffnung ist eine Pufferzone von rund 1 m eingeplant, in welcher die CO_2 -Konzentration gemessen wird. Bei Erreichen eines definierten Füllstandes, wird die CO_2 -Zufuhr gedrosselt, bevor die Gefahr des CO_2 -Austritts über die Kammerbeschickungsöffnung entsteht. Um CO_2 -Verluste zu minimieren, sind die Abzugsförderbänder mit einem pneumatischen Klappen- und Abdichtungssystem versehen, welches sich immer

dann öffnet, wenn eine Materialentnahme aus dem Silo stattfindet. Die Anlage kann sowohl in einem kontinuierlichen als auch in einem Batchmodus betrieben werden. Im Batchmodus erfolgt die Behandlung mit CO₂ in allen Kammern gleichzeitig und typischerweise über Nacht. Im kontinuierlichen Betrieb erfolgt der Prozess auch tagsüber. Aus einer Kammer kann jeweils fertig behandeltes Material entnommen werden, während in mindestens einer Kammer die CO₂-Zugabe erfolgt und eine weitere Kammer mit Material befüllt wird.

4 Baustoffsortieranlage

In Zusammenarbeit mit Anlagenbau Günther GmbH entwickelt Feess eine Anlage zur Aufbereitung heterogener mineralischer Bauabfälle. Zielsetzung ist der Aufbau und die Inbetriebnahme einer effizienten Sortieranlage (siehe Abbildung 1) für mineralische Abfälle zur Herstellung von hochwertigen Recyclinggesteinskörnungen. Bauschutt und Baugrubenaushub sollen durch umkehrbare Förderbänder flexibel aufbereitet werden können. Die Zielsetzung der Anlage ist eine Aufbereitungsquote von über 90 %. Bestehende Prozesse lassen nur eine Aufarbeitung von ca. 60 % zu, während die restlichen 40 % deponiert werden müssen. Dies wird durch die Konzeption als Gesamtanlage mit optimaler Regelung der Aggregate untereinander und durch die Integration neuer Aufbereitungswege der feinkörnigen Materialanteile erzielt. Da die neue Aufbereitungsanlage trotz größerer Heterogenität des Bauschutts eine effektive Aufbereitung erlaubt, kann zudem der Aufwand für den selektiven Gebäude-Rückbau reduziert werden. Somit wird der Druck von den Rückbaubauustellen genommen, die vor allem im innerstädtischen Bereich mit Platz- und Zeitmangel zu kämpfen haben.

Für eine nachhaltige Bauwirtschaft ist eine energie- und ressourcenschonende Materialverwendung maßgeblich. Hochwertiges Recycling von Baustellenabbruch, um diesen wieder in den Wirtschaftskreislauf der Baustoffe zu integrieren, ist von entscheidender Bedeutung. Bauschutt eignet sich in der Regel nicht für hochwertigere Tief- und Straßenbauanwendungen wie beispielsweise Tragschichten, weshalb sich in Deutschland die Verwertung des Abfallschlüssels 170107 standardmäßig auf die Herstellung reiner Verfüllmaterialien beschränkt. Angestrebt werden sollten aber hochwertige Verwendungsmöglichkeiten wie z. B. als Zuschlagsstoff für R-Beton. Dadurch kann das Abfallmaterial zu großen Teilen wieder im Hochbau eingesetzt werden. Solche Aufbereitungsverfahren werden aus wirtschaftlichen Gründen nur selten in Deutschland betrieben. Es existieren unterschiedliche Hemmnisse für Aufbereitung von Bauschutt zu RC-Gesteinskörnung:

- Die Verfahren sind häufig nicht robust genug gegenüber Störstoffen. Daher muss auf der Baustelle ein streng selektiver Rückbau vorgenommen werden, bei dem eine händische Vorsortierung durch das Baustellenpersonal erfolgt. Da Platz und Zeit für Abrissunternehmen oft sehr begrenzt sind, findet ein selektiver Rückbau oft nicht statt. Entstehender Bauschutt lässt sich folglich nicht mehr wirtschaftlich hochwertig recyceln.
- Die bestehenden Prozesse bei Feess erlauben nur ein Recycling von Bauschutt der Korngrößen > 10 mm. Die verwendeten Sink-Schwimm-Verfahren verschlammen bei feinen Korngrößen, da die Partikel nicht schnell genug sedimentieren. Somit lässt sich ca. 40 % des Abfallstromes nicht wiederverwenden. Dieser muss aktuell deponiert werden.

Ziel soll es daher sein, ein neues Aufbereitungsverfahren, welches bei Feess entwickelt wurde, in einer großtechnischen Anlage umzusetzen. Mit diesem Verfahren ist auch eine Aufbereitung von nur grob sortiertem Baustellenabbruch möglich. Außerdem soll die Korngrößenfraktion 2 mm bis 10 mm nutzbar gemacht werden. Allein die Fraktion < 2 mm muss z. T. abgetrennt und deponiert werden. Dadurch reduziert sich der Anteil an nicht verwendbaren und deponiertem Material von 40 % auf < 10 %. Die bestehenden Aufbereitungsschritte wie Siebe, Sink-Schwimm-Verfahren und Brecher werden optimiert, zusammengeführt und durch zusätzliche Anlagenteile ergänzt.

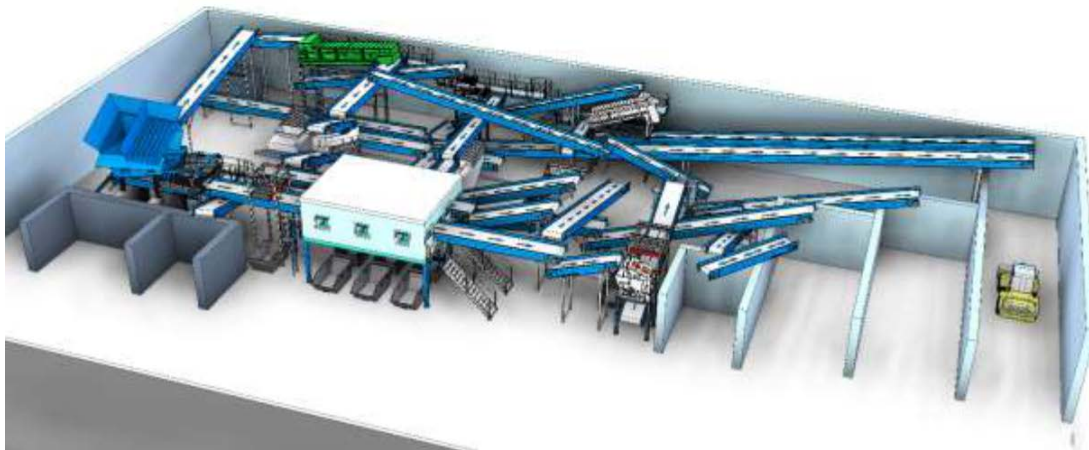


Abb. 1: Rendering Baustoffsortieranlage

Der sortierte Bauschutt wird weiter aufbereitet und anteilig als RC-Gesteinskörnung Typ 1 (90 % Beton, 10 % Bauschutt) und Typ 2 (70 % Beton, 30 % Bauschutt) nach DIN EN 12620 [9] an Betonwerke geliefert. Durch die Steigerung der Wertschöpfung kann langfristig auch eine erhöhte Nachfrage bedient werden. Durch die neue Anlagentechnik kann zwei bis drei Mal mehr Bauschutt im Recyclingpark aufbereitet werden.

5 KreiSBau - Projekt

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

Im deutschen Bausektor fallen jährlich etwa 60 Mio. Tonnen Bauschutt an [5]. Bisher wurde gemischter Bauschutt (AVV 170107) in erster Linie zu Verfüllmaterial aufbereitet. Es existieren allerdings Bestrebungen, diesen Materialstrom verstärkt auch im Hochbau zu nutzen. Die Herstellung einer rezyklierten Gesteinskörnung des Typs 2 bringt aktuell aber nach wie vor ein Problem mit sich. Auch nach der Novellierung der DIN 1045-2 [10] kann die Fraktion 0/2 aus Bauschutt oder Typ 2 nicht in der Betonproduktion eingesetzt werden. Dies stellt ein immenses Hemmnis bei Baustoff-Recyclern dar, da bei der Aufbereitung ca. 30 % Feinanteil < 2 mm anfallen und diese zum aktuellen Zeitpunkt teuer entsorgt werden müssen. Der Fokus des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung geförderten KreiSBau Projekts liegt deshalb auf der Fraktion unter 2 mm, insbesondere auf Brechsanden gemischter Bauschuttfraktionen mit heterogener Zusammensetzung und hohem Gipsanteil.

In einer Zusammenarbeit zwischen Heinrich Feeß GmbH & Co. KG, Leiblein GmbH, Leipfinger-Bader GmbH und dem Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) soll ein großtechnisches Verfahren entwickelt werden, das den Sulfatanteil aus Mauerwerksabbruch minimiert. Das Verfahren basiert auf der Grundlage des am Fraunhofer IBP entwickelten ENSUBA Prozesses [11]. Zusätzlich sollen RC-Bauprodukte aus den behandelten Fraktionen entwickelt werden. Die betrachteten Anwendungen konzentrieren sich auf Mauerziegel und Betonsteine. Das mit Sulfat angereicherte Prozesswasser kann in der Landwirtschaft als Düngemittel eingesetzt werden. Alternativ wird untersucht, ob sich Sulfat rückgewinnen und somit wieder in der Gipsindustrie nutzbar machen lässt.

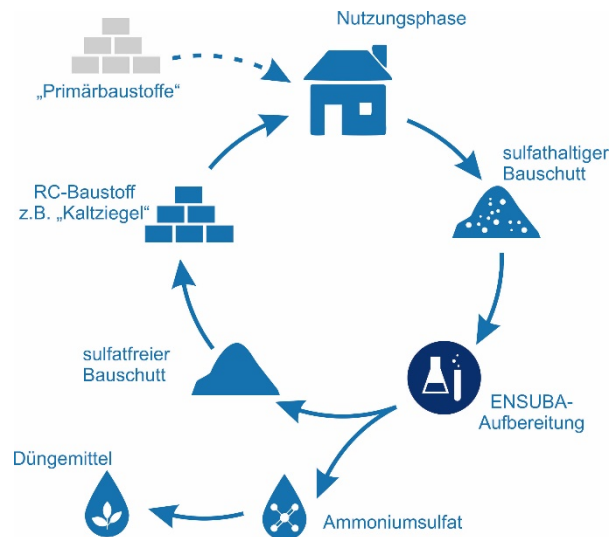


Abb. 2: Schematische Darstellung des angestrebten Entsulfatisierungsverfahrens (ENSUBA) [11].

Das Vorhaben zielt darauf ab, die Ressourceneffizienz im Baustoffbereich zu steigern und die Deponierungsrate von Bauschutt zu reduzieren. Durch die Optimierung von Wertschöpfungsketten und innovative Recyclingverfahren wird eine nachhaltige Rohstoffproduktivität angestrebt. Dies trägt zur Reduktion der Treibhausgasproduktion und somit zu den Zielen des Klimaschutzplans 2050 bei. Die wissenschaftlichen und technischen Ziele umfassen die Entwicklung von Anlagentechnik für die Fest-Flüssig-Trennung, die Bereitstellung dieser Technik für andere Bauschutt-aufbereitungsunternehmen, den Einsatz von aufbereiteten RC-Sanden in ressourcenschonenden Ziegeln sowie die Nutzbarmachung eines bisherigen Abfallstroms durch Verringerung der Sulfatbelastung. Das Fraunhofer IBP konzentriert sich auf die Umsetzung eines im Labormaßstab entwickelten Verfahrens auf großtechnischer Ebene und die Gewinnung vertiefter wissenschaftlicher Erkenntnisse bei der Skalierung des Prozesses.

6 Fazit

Um unsere Klimaschutzziele zu erreichen, müssen wir unseren Umgang mit Ressourcen und Abfällen umdenken. Eine vollständig nachhaltige Kreislaufwirtschaft lässt sich in der Praxis nur mit innovativen Lösungen und neuen Ansätzen erreichen. Die aktuelle Dynamik in diesem Bereich ist in der Bau- und Recyclingindustrie durchaus spürbar. Um einen tatsächlichen Fortschritt zu erreichen, dürfen Forschungsergebnisse und Innovationen nicht in Schubladen verschwinden, sondern müssen durch Vernetzung ausgetauscht werden. Forschung und Praxis müssen eng zusammenarbeiten, damit praxisorientierte und progressive Lösungen für die aktuellen und zukünftigen Probleme gefunden werden. Feess steht dabei wie viele andere Unternehmen als Praxispartner zur Verfügung, um einem Fokus auf Praxistauglichkeit und wirtschaftliche Umsetzbarkeit zu setzen. Die Ergebnisse und Erfahrungen werden im Kompetenzzentrum für Kreislaufwirtschaft in Kirchheim/Teck (K³) mit Interessierten geteilt. Das durch jahrelange Praxis angeeignete Wissen soll sowohl Schülern und Studenten als auch Unternehmen verfügbar gemacht und weitergegeben werden. Außerdem soll eine Plattform geschaffen werden, damit sich unterschiedliche Beteiligte vernetzen können.

7 Literatur

- [1] Ersatzbaustoffverordnung vom 9. Juli 2021 (BGBl. I S. 2598), die durch Artikel 1 der Verordnung vom 13. Juli 2023 (BGBl. 2023 I Nr. 186) geändert worden ist
- [2] <https://www.dbu.de/news/effizientes-bauschutt-recycling/>
- [3] Vorläufige Hinweise zum Einsatz von Baustoffrecyclingmaterial vom 13. April 2004, Ministerium für Umwelt und Verkehr Baden-Württemberg
- [4] TL G SoB-StB 20/23 Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau, Teil: Güteüberwachung
- [5] Allgemeine Anforderungen an die Güteüberwachung §4 Absatz 1 ErsatzbaustoffV
- [6] <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/abfallaufkommen#deutschlands-abfall>
- [7] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Carbonatisierung des Betons. Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung, in beton 7-1972, S. 296-299
- [8] ifeu Heidelberg / Feeß Kirchheim/Teck / Holcim Stuttgart, R-Beton klimafreundlich und noch ressourcenschonender, Forschungsprojekt gefördert durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2023
- [9] DIN EN 12620:2013-07 Gesteinskörnungen für Beton; Deutsche Fassung
- [10] DIN 1045-2:2023-08 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton
- [11] <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/projekte-referenzen/ensuba.html>

8 Autor

Sebastian Rauscher M. Sc.

Heinrich Feeß GmbH & Co. KG
Heinkelstraße 2
73230 Kirchheim/Teck
sebastian.rauscher@feess.de

Rohstoff im Wandel: Verfügbarkeiten und Potenziale mineralischer Sekundärrohstoffe

Berthold Schäfer

Zusammenfassung

Derzeit werden große Erwartungen daran geknüpft, durch Circular Economy Einsparungen beim Einsatz primärer Ressourcen und Verbesserungen beim Klimaschutz zu erreichen. Circular Economy soll dazu führen, vermehrt Sekundärrohstoffe zur Substitution primärer Rohstoffe zu nutzen und in möglichst hochwertigen Verwendungen einzusetzen. Der Bausektor steht dabei im Fokus, denn einerseits besteht hier ein großer Rohstoffbedarf, andererseits fallen erhebliche Mengen mineralischer Bauabfälle an. In diesem Beitrag wird aufgezeigt, welche mineralischen Sekundärrohstoffe tatsächlich verfügbar sind und welche zusätzlichen Ressourcen- und Klimaschutzpotenziale durch ihren Einsatz gehoben werden können.

Schlagwörter: Circular Economy, mineralischer Bauabfall, Recycling-Beton, Klimaschutzpotential

Abstract

There are currently great expectations that the circular economy will lead to savings in the use of primary resources and improvements in climate protection. The circular economy should lead to the increased use of secondary raw materials to replace primary raw materials and utilise them in the highest possible quality applications. The construction sector is at the centre of this, as there is a large demand for raw materials on the one hand and considerable quantities of mineral construction waste on the other. This article shows which mineral secondary raw materials are actually available and what additional resource and climate protection potential can be realised through their use.

Keywords: circular economy, mineral construction waste, recycled aggregate concrete, climate protection potential

1 Mineralische Rohstoffe im Bausektor

1.1 Durchschnittlicher Bedarf an mineralischen Rohstoffen im Bausektor

Im Durchschnitt besteht in Deutschland ein jährlicher Bedarf an mineralischen Rohstoffen für den Bausektor in Höhe von rund 580 Mio. t. Dieser Bedarf wird durch rund 480 Mio. t Primärrohstoffe und 100 Mio. t Sekundärrohstoffe gedeckt (Abbildung 1). Als Primärrohstoffe kommen ca. 250 Mio. t Kies und Sand sowie ca. 230 Mio. t Natursteine zum Einsatz. Die Sekundärrohstoffe bestehen aus ca. 70 Mio. t Recycling-Baustoffen und ca. 30 Mio. t industriellen Nebenprodukten.

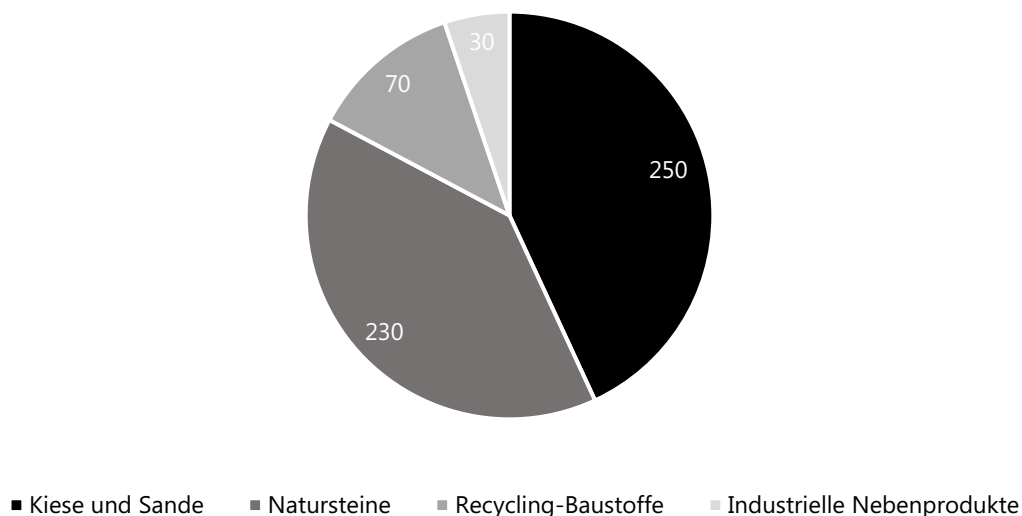


Abb. 1: Durchschnittlicher jährlicher mineralischer Rohstoffbedarf des Bausektors in Deutschland in Mio. t

1.2 Durchschnittliches Aufkommen mineralischer Bau- und Abbruchabfälle

Im Durchschnitt fallen in Deutschland jährlich rund 207 Mio. t mineralische Bau- und Abbruchabfälle an. Davon sind etwa 125 Mio. t Boden und Steine. Weitere 82 Mio. t bestehen aus überwiegend körnigem Material, das teilweise sortenrein, teilweise als Gemisch an Recyclinganlagen angeliefert wird. Im Durchschnitt werden jährlich rund 60 Mio. t RC-Gesteinskörnungen durch Recycling hergestellt. Zusätzlich werden aus der Fraktion Boden und Steine rund 10 Mio. t RC-Gesteinskörnungen gewonnen. Die insgesamt rund 70 Mio. t RC-Gesteinskörnungen werden zur Substitution primärer Gesteinskörnungen genutzt. Die Substitutionsquote liegt damit bei durchschnittlich rund 12 %.

1.3 Heutige Verwertung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle

Die Verwertungsmöglichkeiten der RC-Baustoffe hängen von ihren bautechnischen und umweltrelevanten Eigenschaften sowie ihrer stofflichen Zusammensetzung ab. Neben den Ausgangsqualitäten werden die Eigenschaften maßgeblich von der Verfahrensweise beim Abbruch bzw. Rückbau, der Getrennthaltung der Fraktionen und der eingesetzten Aufbereitungstechnik bestimmt. Im Durchschnitt werden heute rund 50 % der RC-Baustoffe im Straßenbau, 23 % im Erdbau, 22 % in der Asphalt- und Betonherstellung sowie 5 % im Deponiebau eingesetzt. Die Verwertungsquote der körnigen mineralischen Bau- und Abbruchabfälle liegt bei durchschnittlich rund 95 %, lediglich 5 % bzw. rund 4 Mio. t werden jährlich auf Deponien beseitigt.

2 Circular Economy

Der Circular Economy Ansatz ist im Bausektor beim Umgang mit mineralischen Bau- und Abbruchabfällen seit Jahrzehnten etabliert. Körnige mineralische Bau- und Abbruchabfälle werden heute fast vollständig einer umweltgerechten neuen Verwertung zugeführt und substituieren dadurch ansonsten erforderliche Primärrohstoffe.

Dennoch steht der Bausektor im Fokus der Circular Economy Diskussionen. Mit Verweis auf die Abfallhierarchie wird aus der Circular Economy Strategie die Zielsetzung abgeleitet, mineralische Bau- und Abbruchabfälle möglichst hochwertig zu verwerten. Dabei wird die Verwertung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle im Erd-, Tief-, Straßen- und Landschaftsbau sowie die Verfüllung von Abgrabungen als „Downcycling“ angesehen. Propagiert wird das „Upcycling“, bei dem aufbereitete mineralische Bau- und Abbruchabfälle zur Herstellung neuer Produkte eingesetzt werden sollen. Diese Sichtweise bedarf mehrerer Klarstellungen:

- Die heutige Verwertung mineralischer Bau- und Abbruchabfälle im Erd-, Tief-, Straßen- und Landschaftsbau entspricht der dritten Stufe der Abfallhierarchie. Die wiederverwerteten mineralischen Bau- und Abbruchabfälle sind nach öffentlich-rechtlichen Vorgaben zusammengesetzte Baustoffe, die einer Güteüberwachung unterliegen und zahlreiche Qualitätskriterien erfüllen müssen. Von einem „Downcycling“ kann daher keine Rede sein.
- Eine Umlenkung geeigneter Recyclingbaustoffe aus dem Erd-, Tief-, Straßen- und Landschaftsbau in die Herstellung neuer Produkte entspricht ebenfalls einer Verwertung in der dritten Stufe der Abfallhierarchie und stellt daher kein „Upcycling“ dar.
- Durch die Umlenkung von Stoffströmen aus dem Erd-, Tief-, Straßen- und Landschaftsbau in die Herstellung neuer Produkte können keine Primärrohstoffe eingespart werden. Denn die dem Erd-, Tief-, Straßen- und Landschaftsbau entzogenen Stoffströme müssen nun dort durch die Primärrohstoffe ersetzt werden, die bisher zur Herstellung neuer Produkte eingesetzt wurden.

3 R-Beton als hochwertige Verwertungsoption für RC-Gesteinskörnungen

Für RC-Gesteinskörnungen kommt als Verwertungsmöglichkeit im Produktbereich insbesondere ein Einsatz als Zuschlagstoff im Beton in Betracht. Der Einsatz von RC-Gesteinskörnungen im Beton ist seit Jahren bauaufsichtlich geregelt. Geeignetes Ausgangsmaterial zur Herstellung von RC-Gesteinskörnungen für die Verwendung im Beton stellen die Abfallfraktionen „Betonbruch“ (AVV 170101), „Gemische aus Beton, Fliesen und Keramik“ (AVV 170107) und der Anteil Steine aus der Fraktion „Boden und Steine“ (AVV 170504) dar. Das sich ergebende nutzbare Potenzial liegt bei rund 36 Mio. t RC-Gesteinskörnungen für den Einsatz im Beton. Unberücksichtigt bleibt dabei das Thema geringfügiger asbesthaltiger Anteile aus dem Rückbau von Bauwerken, die vor 1993 hergestellt wurden. Das potenzielle Angebot an RC-Gesteinskörnung ist damit größer als die Menge, die theoretisch im R-Beton eingesetzt werden kann. Da R-Beton hinsichtlich seiner Einsatzmöglichkeiten beschränkt ist, können nicht alle Betonsorten als R-Beton hergestellt werden. Die Aufnahmekapazitäten des R-Betons können mit etwa 30 Mio. t RC-Gesteinskörnung abgeschätzt werden.

Die Umlenkung der RC-Gesteinskörnung in den R-Beton wird derzeit stark vorangetrieben. So legt die EU-Taxonomieverordnung im Bereich Kreislaufwirtschaft ambitionierte Einsatzquoten für RC-Baustoffe im Hochbau fest. Bei den Rezyklateinsatzquoten wird allerdings übersehen, dass sich aus der Umlenkung der RC-Gesteinskörnung von den bisherigen Einsatzbereichen im Erd-, Tief-, Straßen- und Landschaftsbau in den R-Beton keine zusätzliche Schonung natürlicher Ressourcen ergibt. Je nach Aufbereitungsaufwand und zusätzlichen Transportwegen kann der Einsatz der RC-Gesteinskörnung im R-Beton sogar die ökologisch schlechtere Gesamtlösung sein. Eine Entscheidung im Einzelfall sollte daher pauschalen Rezyklateinsatzquoten vorgezogen werden.

4 Klimaschutzzpotenziale

Die Vorteile einer Stoffstromumlenkung liegen maßgeblich im Bereich des Klimaschutzes und ergeben sich vor allem dann, wenn die mineralischen Bauabfälle Beton, Ziegel und entsprechende Gemische in die Zementindustrie umgelenkt werden. So können Betonbrechsande und bestimmte Mauerwerksbrechsande als Klinkersubstitute oder als Rohmehlersatz in der Zementherstellung eingesetzt werden. Erste Untersuchungen zeigen, dass bei der Zementherstellung bis zu 18 % des Klinkers durch Betonbrechsand substituiert werden kann, wodurch die Prozessemissionen dieses Klinkeranteils entfallen und sich die CO₂-Emissionen des Zements entsprechend reduzieren.

Weiteres Klimaschutzpotenzial bietet die Rekarbonatisierung. Kalk- und zementhaltige Materialien, also z. B. Beton, Kalksandstein oder Porenbeton, haben die Eigenschaft, CO₂ aus der Atmosphäre aufnehmen zu können. Die CO₂-Aufnahme kann durch die Zerkleinerung der Materialien und die dadurch entstehende größere Oberfläche sowie durch Einstellung geeigneter Temperatur- und Feuchtigkeitsbedingungen beschleunigt werden. Auch wenn in diesem Bereich noch Forschungsbedarf besteht, belegen erste Pilot- und Praxisprojekte, dass die Klimaschutzzpotenziale durch Rekarbonatisierung sehr groß sind und vergleichsweise einfach gehoben werden können. Rekarbonatisierte Recycling-Baustoffe fungieren als CO₂-Senke, da sie das Treibhausgas dauerhaft einbinden und speichern. Die Verwendungsmöglichkeiten der Materialien sind durch die CO₂-Aufnahme nicht eingeschränkt, so dass sie problemlos zur Herstellung neuer Produkte, z. B. als RC-Gesteinskörnung für den R-Beton, eingesetzt werden können.

5 Fazit

Die zusätzlichen Potenziale mineralischer Bauabfälle liegen weniger im Bereich des Ressourcenschutzes, sondern vor allem im Bereich des Klimaschutzes. Die mineralischen Bauabfälle sollten daher jeweils dort eingesetzt werden, wo sie den größten Beitrag zum Klimaschutz leisten können. Dies setzt eine gezielte Aufbereitung und eine konsequente Bereitstellung der Materialien für die klimarelevanteste Verwendung voraus.

6 Autor

Dr. Berthold Schäfer

Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.

Kochstraße 6

10969 Berlin

b.schaefer@bvbaustoffe.de

Das Förderprogramm: Verwaltungsvorschrift R-Beton Baden-Württemberg

Johannes Preiß, Daniel Laux, Maureen Denu, Jan P. Höffgen und Frank Dehn

Zusammenfassung

Das Förderprogramm zur Verwaltungsvorschrift für ressourcen- und klimaschonende Betonbau im Hochbau (kurz: VwV R-Beton) verfolgt das Ziel, die Verwendung von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen, sog. R-Betone, und damit nachhaltigkeitsoptimierte Betonrezepturen im Hochbau zu fördern. Angestrebt wird, die Verfügbarkeit sowie den wirtschaftlichen, zirkulären Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen - ggf. in Verbindung mit einer CO₂-Beaufschlagung - oder Gesteinskörnung, die über eine Nassklassierungsanlage gewonnen wurde, zu unterstützen. Zudem sollen durch das wissenschaftliche Begleitprogramm Daten bezüglich der Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie der CO₂-Bindekapazität der verwendeten nachhaltigen Gesteinskörnung generiert werden. Diese werden im Anschluss ausgewertet und Verfahren zur CO₂-Beaufschlagung bzw. Messverfahren der CO₂-Speicherkapazität verglichen und weiterentwickelt. Ziel des Begleitprogramms stellt die mögliche Anpassung und Weiterentwicklung geltender Regelwerke und Vorschriften dar, um die Verwendung von R-Betonen zu erleichtern.

Schlagwörter: Verwaltungsvorschrift, ressourcenschonend, klimaschonend, rezyklierte Gesteinskörnung, Recycling-Beton, Nassklassierung, CO₂-Bindekapazität

Abstract

The funding programme within the administrative regulation for resource- and climate-friendly concrete construction in building construction (VwV R-Beton) aims to promote the use of recycled aggregate concrete, and thus sustainability-optimised concrete mix designs in structural engineering applications. The goal is to support the availability and economic circular use of recycled aggregates - possibly in conjunction with CO₂-addition - or aggregates obtained through a wet classification. In addition, the accompanying scientific programme will generate data on the fresh and hardened concrete properties as well as the CO₂-binding capacity of the sustainable aggregates used. This data will then be analysed and methods for CO₂-impact and measuring the CO₂-storage capacity will be compared and further developed. The aim of the accompanying programme is the possible adaptation and further development of applicable rules and regulations in order to facilitate the use of recycled aggregate concrete.

Keywords: administrative regulation, resource efficient, climate-friendly, recycled aggregates, recycled aggregate concrete, wet classification, CO₂-binding capacity

1 Einleitung

Das Umweltministerium Baden-Württemberg engagiert sich seit vielen Jahren für eine stärkere Verbreitung von ressourcenschonendem Beton (R-Beton). Auch die regulatorischen Rahmenbedingungen konnten mit Einführung der DIN 4226-101:2017-08 [3] im Jahr 2017 und der Fortschreibung der DIN 1045-2:2023-08 [2] im vergangenen Jahr weiter verbessert werden. Die zulässigen Austauschraten in verschiedenen Expositionen und Feuchtigkeitsklassen wurden im Vergleich zur aktuell geltenden DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [1] teilweise erhöht und die Verwendung feiner rezyklierter Gesteinskörnungen unter bestimmten Rahmenbedingungen zugelassen. Der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen zur Herstellung von R-Beton konnte in Baden-Württemberg von rund 39.000 Tonnen im Jahr 2010 auf rund 420.000 Tonnen im Jahr 2020 gesteigert werden. In Relation zu den etwa 19 Mio. Tonnen Transportbeton und 12,4 Mio. Tonnen Bauschutt, Straßenaufbruch und sonstigen Bau- und Abbruchabfällen, die in Baden-Württemberg jährlich hergestellt werden bzw. anfallen, sind die bisher erreichten Quoten allerdings steigerungsfähig. Ein flächendeckender Einsatz von R-Beton wird derzeit vor allem durch den höheren Preis aufgrund längerer Transportwege und fehlender regionaler Verfügbarkeit erschwert. R-Beton ist bisher nur in unmittelbarer Nähe einiger Bauschutt-Recyclingbetriebe verfügbar, konkret im mittleren Neckarraum und im Umfeld von Mannheim. Mit der „Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums über die Förderung von ressourcen- und klimaschonendem Beton im Hochbau (VwV R-Beton)“ strebt die Landesregierung eine möglichst flächendeckende Versorgung mit R-Beton an.

2 Förderprogramm R-Beton Baden-Württemberg

Das im Mai 2023 veröffentlichte Förderprogramm adressiert Transportbetonwerke und unterstützt diese bei der Herstellung von R-Beton mit einem Anteil von mehr als 25 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung bezogen auf die Gesamtkörnung, um ein flächendeckendes Angebot an R-Beton aufzubauen. Dieser Mindestanteil wurde vor dem Hintergrund der neuen DIN 1045-2:2023-08 [2], die im Laufe des Jahres 2024 bauaufsichtlich eingeführt werden soll und nach der Beton mit einem Anteil von weniger als 25 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung nur noch optional als R-Beton bezeichnet wird, festgeschrieben, um die Sichtbarkeit von R-Beton weiter zu erhöhen. Die Förderung erfolgt über einen Zuschuss für die Beschaffung von rezyklierter Gesteinskörnung, die zur Herstellung von R-Beton verwendet wird. Der Zuschuss bezieht sich auf die Beschaffungsmenge und unterstützt dadurch den wirtschaftlichen Einsatz von R-Beton. Darüber hinaus sind auch Erstprüfungen für die Verwendung von R-Beton und die Beschaffung von Gesteinskörnung, die über eine Nassklassierung gewonnen wurde, förderfähig. Ein zusätzlicher Zuschuss kann für die Beschaffung von rezyklierter Gesteinskörnung, die mit CO₂-beaufschlagt wurde, beantragt werden.

Durch die Förderanreize sollen insbesondere Transportbetonunternehmen, die bislang noch keinen R-Beton herstellen, eine finanzielle Hilfestellung erhalten. Aber auch Unternehmen, die bereits R-Beton herstellen und vertreiben, können für geplante zukünftige Beschaffungen rezyklierter Gesteinskörnung eine Förderung beantragen. Pro Unternehmen kann zudem eine Zuwendung für maximal drei erweiterte Erstprüfungen erfolgen. Die Zuwendung wird auf Antrag in Form eines nicht rückzahlbaren Zuschusses gewährt und beträgt mindestens 20.000 Euro und maximal 100.000 Euro je Unternehmen. Die Höhe der Zuwendung kann der nachfolgenden Tabelle 1 entnommen werden.

Tab. 1: Höhe der Zuwendungen je Art des Förderantrags der VwV R-Beton

	Erweiterte Erstprüfung für R-Beton	Rezyklierte Gesteinskörnung		Zulage für CO ₂ -beaufschlagte, rezyklierte Gesteinskörnung (Typ 1 oder Typ 2)	Gesteinskörnung, die über eine Nassklassierungsanlage gewonnen wurde
		Typ 1	Typ 2		
Nach	[1], [2]	[3]			
Höhe der Zuwendung	2.000 € pro nachgewiesener Erstprüfung	≤ 15 € pro Tonne ¹	≤ 25 € pro Tonne ¹	≤ 40 € pro Tonne ^{1, 2} ≤ 20 € pro Tonne ^{1, 3}	≤ 5 € pro Tonne ^{1, 4}

¹ Soweit die Ausgaben für den Kauf der Gesteinskörnung die in der Tabelle jeweilig genannte Zuwendungshöhe unterschreiten, gilt der jeweilige Einkaufspreis als Höchstzuwendung.

² Bei Bindung von zusätzlich mindestens 10 kg CO₂/t rezyklierter Gesteinskörnung

³ Bei Bindung von zusätzlich mindestens 5 kg CO₂/t rezyklierter Gesteinskörnung

⁴ Gesteinskörnung, sofern diese für R-Beton im Sinne dieser VwV eingesetzt wird

3 Wissenschaftliches Begleitprogramm zur VwV R-Beton

3.1 Allgemeines

Neben der finanziellen Unterstützung von Transportbetonunternehmen ist die Generierung von Daten anhand der (erweiterten) Erstprüfungen des R-Betons geplant. Hierbei werden die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie bspw. die tatsächliche CO₂-Bindekapazität untersucht. Diese Daten werden im Anschluss wissenschaftlich ausgewertet, um das Potential des Einsatzes von R-Betonen zu ermitteln [5]. Aus diesem Grund wurde neben der VwV R-Beton ein „Wissenschaftliches Begleitprogramm zur VwV R-Beton“ erstellt, welches im Folgenden genauer erläutert wird.

3.2 Ziel

Ziel des wissenschaftlichen Begleitprogramms zur VwV R-Beton ist es, nachhaltigkeitsoptimierte Betonrezepturen aus praxisbezogenen Daten zu entwickeln. Die Daten werden anhand der Betone und Gesteinskörnungen generiert, deren Hersteller den Zuschuss der VwV R-Beton beantragen. Die verwendete Gesteinskörnung soll hinsichtlich ihrer Eigenschaften sowie ihres Potentials der maximalen CO₂-Beaufschlagung untersucht werden. Zudem soll - falls beantragt - die industriell erreichte CO₂-Aufnahme ermittelt und mit anderen experimentellen Verfahren verglichen werden. Als abschließendes Ziel sind die Anpassung und Weiterentwicklung geltender Regelwerke und Vorschriften anhand der ermittelten Ergebnisse vorgesehen, um die Verwendung von R-Betonen langfristig zu erleichtern und zu fördern.

3.3 Vorgehensweise

Bei Gewährung des Zuschusses der VwV R-Beton werden zunächst die Stoffströme der geförderten Transportbetonhersteller abgefragt. Dies verfolgt das Ziel, eine gesamtheitliche Betrachtung der identifizierten Stoffströme zu ermitteln und die Auswirkung des VwV R-Betons vor und nach der Förderung auf die Marktentwicklung nachvollziehen zu können. Somit wird die Möglichkeit der Erstellung eines landesweiten, kartierten Katasters zu Herstellern, Volumina und Stoffströmen, Verfügbarkeit sowie Art und Eigenschaften der rezyklierten Materialien geschaffen. Hierfür werden die in den Unternehmen durchgeführten (erweiterten) Erstprüfungen dokumentiert und Proben der aufbereiteten, rezyklierten Gesteinskörnung in einer wissenschaftlichen Vor-Ort-Begleitung entnommen. Die entnommenen Proben werden im Anschluss an der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (MPA) Karlsruhe charakterisiert. In einem weiteren Schritt wird die CO₂-Beaufschlagung bei Rezyklaten natur-/ingenieurwissenschaftlich betrachtet. Es wird vor sowie nach der

Beaufschlagung der CO₂-Gehalt der Probe über geeignete, zunächst festzulegende Messverfahren bestimmt und anhand dessen eine Bilanz gezogen, um die CO₂-Bindekapazität abzuschätzen. Somit erfolgt eine die Beaufschlagung begleitende Erfolgskontrolle, um die Reproduzierbarkeit und Zuverlässigkeit der Beaufschlagung nachzuweisen. Im Anschluss erfolgt eine Empfehlung für eine wirtschaftliche sowie chemisch-physikalisch korrekte Nachweismethode der CO₂-Beaufschlagung.

Als letzter Schritt werden eventuelle Anpassungen geltender Regelwerke und Vorschriften mit direktem Bezug zur Praxis entwickelt. Hierbei werden neueste Regelwerksänderungen wie bspw. die Ergänzungen zu Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen in DIN 1045-2:2023-08 [2], dem Normentwurf DIN prEN 1992-1-1:2021-10 (Eurocode 2) [4], pre-normative Grundlagen, bspw. *fib* Model Code 2020 [8], der *fib* Task Group 4.7 Structural Applications of Recycled Aggregate Concrete - Properties, Modeling and Design, sowie des RILEM TC RAC [6], [7], und der Ersatzbaustoffverordnung [9] in Baden-Württemberg berücksichtigt.

Diese Anpassungen sowie die gesammelten Ergebnisse der Untersuchungen der Rezyklate und Verfahren sowie der Daten zu den Stoffströmen sind in einem praxisorientierten Workshop mit Vertretern der Industrie/Wirtschaft, Verbänden, Verwaltung sowie Wissenschaft am Institut für Massivbau und Baustofftechnologie sowie Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (KIT-IMB/MPA) Karlsruhe zu diskutieren und zu erörtern.

4 Aktuelles Fördergeschehen und Ausblick

Für das Förderprogramm stehen bis Ende 2024 Haushaltsmittel in Höhe von insgesamt 2 Mio. Euro zur Verfügung. Bis Mitte Januar 2024 haben insgesamt 14 Unternehmen eine Gesamtfördersumme in Höhe von rund 1 Mio. Euro beantragt. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf der Förderung von rezyklierter Gesteinskörnung Typ 1 nach DIN 4226-101:2017-08 [3]. Einzelne Unternehmen erhalten auch eine Förderung für den Zukauf rezyklierter Gesteinskörnung Typ 2 nach DIN 4226-101:2017-08 [3] und Gesteinskörnung, die über Nassklassierungsanlagen gewonnen wurde. Rund 43 % der Unternehmen haben angegeben, im Rahmen des Förderprogramms erstmalig R-Beton herzustellen.

Ergänzend zur VwV R-Beton hat das Umweltministerium Ende 2023 den Bau einer Karbonatisierungsanlage zur CO₂-Beaufschlagung rezyklierter Gesteinskörnung im Großraum Stuttgart mit 0,4 Mio. Euro gefördert. Durch den schnellen Aufbau einer ersten Infrastruktur für diese Technologie sollen die Vorteile von R-Beton insbesondere auch im Bereich des Klimaschutzes weiter ausgebaut werden. Perspektivisch ist eine Ausweitung auf weitere Anwendungsbereiche für CO₂-beaufschlagte, rezyklierte Gesteinskörnungen wie den Tief- oder Straßenbau sowie den Garten- und Landschaftsbau denkbar. Des Weiteren stellt das Umweltministerium derzeit Überlegungen an, das Förderprogramm über das Jahr 2024 hinaus fortzuführen und gegebenenfalls weitere Branchen wie die Betonfertigteilmindustrie zu berücksichtigen.

5 Literatur

- [1] 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
- [2] DIN 1045-2:2023-08 (2023); Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [3] DIN 4226-101:2017-08 (2017); Rezyklierte Gesteinskörnung für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen, Beuth Verlag GmbH, Berlin

- [4] DIN prEN 1992-1-1:2021-10 (2021) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Regeln – Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke, Beuth Verlag GmbH, Berlin
- [5] Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (2023), Verwaltungsvorschrift des Umweltministeriums über die Förderung von ressourcen- und klimaschonendem Beton im Hochbau (VwV R-Beton)
- [6] J. Xiao, Y. Zhang, S. Amardeep, und Z. Zhao (2022), Report on Recycled Aggregate Concrete: Part I – Material Properties, RILEM Technical Committee for Structural behaviour and innovation of recycled aggregate concrete (RAC), Materials Report 273
- [7] J. Xiao, Y. Zhang, S. Amardeep, und Z. Zhao (2022), Report on Recycled Aggregate Concrete: Part III – Standards and Specifications of RA and/or RAC, RILEM Technical Committee for Structural behaviour and innovation of recycled aggregate concrete (RAC), Code or guideline
- [8] 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>.
- [9] Vorschriftensammlung der Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg (2023), Verordnung über Anforderungen an den Einbau von mineralischen Ersatzbaustoffen in technische Bauwerke (Ersatzbaustoffverordnung – ErsatzbaustoffV)“, Gewerbeaufsicht Baden-Württemberg, Baden-Württemberg, Vorschriften-sammlung, Zugegriffen: 9. Januar 2024. [Online]. Verfügbar unter: https://gewerbeaufsicht.baden-wuerttemberg.de/documents/20121/178317/2_2_28.pdf

6 Autoren

Johannes Preiß, M.Sc.

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
johannes.preiss@um-bwl.de

Dr. Daniel Laux

Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg
Kernerplatz 9
70182 Stuttgart
daniel.laux@um-bwl.de

Maureen Denu, M.Sc

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

Jan Höffgen, M.Sc

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

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

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

Eine Analyse der CO₂-Beaufschlagung von rezyklierter Gesteinskörnung – Die technische Umsetzungsmöglichkeiten am Beispiel der Schweiz

Reto Märki

Zusammenfassung

Die Eberhard Unternehmungen setzen sich bereits in der dritten Generation für eine bessere Ressourcennutzung und Umweltschonung im Bausektor ein. Die neueste Innovation betrifft die zirkuläre Verwendung von Betongranulat als Zuschlagsstoff für zirkulit® und zireco® Beton. Unter dem Dach der zirkulit Beton AG haben sich am 23. Oktober 2023 fünf Familienunternehmen zusammengeschlossen. Grisoni-Zaugg SA, JMS-Gruppe (Johann Müller AG), Kästli Bau AG, Lötscher Plus Gruppe und die Eberhard Bau AG schreiben gemeinsam das nächste Kapitel des zirkulären Bauens. So kann im großen Stil schweizweit CO₂ permanent im Betongranulat gespeichert werden. Ihr Ziel ist es, ab 2030 schweizweit jährlich 25.000 Tonnen CO₂ im Beton zu binden. Gleichzeitig werden so über 2 Mio. Tonnen Bauabfälle hochwertig in den Kreislauf zurückgeführt. Das schweizweite Potenzial der dabei zum Einsatz kommenden Technologie ist beachtlich. Theoretisch könnten pro Jahr über 50.000 Tonnen CO₂ im Betongranulat gespeichert werden. Der daraus produzierte zirkuläre Beton ist kreislauffähig und weist einen minimalen CO₂-Fußabdruck auf. Die zirkulit AG, die im April 2021 gegründet wurde, verfolgt die Vision «das kreislauffähige Haus auf mineralischer Basis». zirkulit® und zireco® Beton verfolgt den ganzheitlichen zirkulären Ansatz. Der Primärressourcenverbrauch wird auf weniger als ein Drittel reduziert. Der CO₂-Fußabdruck beim zirkulit® Beton wird zusätzlich durch eine von zirkulit entwickelte CO₂-Speichertechnologie reduziert und das bei gleichbleibenden technischen Eigenschaften wie bei einem Primärbeton.

Schlagwörter: CO₂-Bindekapazität, Beton, Kreislaufwirtschaft, Bauabfall, Ressourcenverbrauch

Abstract

The Eberhard companies are now in their third generation of campaigning for better resource utilisation and environmental protection in the construction sector. The latest innovation involves the circular use of concrete granulate as an aggregate for zirkulit® and zireco® concrete. On 23 October 2023, five family-owned companies joined forces under the umbrella of zirkulit Beton AG. Grisoni-Zaugg SA, JMS Group (Johann Müller AG), Kästli Bau AG, Lötscher Plus Group and Eberhard Bau AG are jointly writing the next chapter of circular construction. In this way, CO₂ can be permanently stored in concrete granulate on a large scale throughout Switzerland. Their goal is to bind 25,000 tonnes of CO₂ in concrete across Switzerland every year from 2030. At the same time, over 2 million tonnes of high-quality construction waste will be returned to the cycle. The Swiss-wide potential of the technology used is considerable. Theoretically, over 50,000 tonnes of CO₂ could be stored in the concrete granulate every year. The circular concrete produced from this is recyclable and has a minimal CO₂ footprint. zirkulit AG, which was founded in April 2021, pursues the vision of "the circular house on a material basis". zirkulit® and zireco® concrete pursue the holistic circular approach. The consumption of primary resources is reduced to less than a third. The CO₂ footprint of zirkulit® concrete is additionally reduced by a CO₂ storage technology developed by zirkulit, while maintaining the same technical properties as primary concrete.

Keywords: CO₂-storage, concrete, circular economy, construction waste, consumption of resources



Abb. 1: Grisoni-Zaugg SA, JMS-Gruppe (Johann Müller AG), Kästli Bau AG, Lötscher Plus Gruppe, Eberhard Bau AG

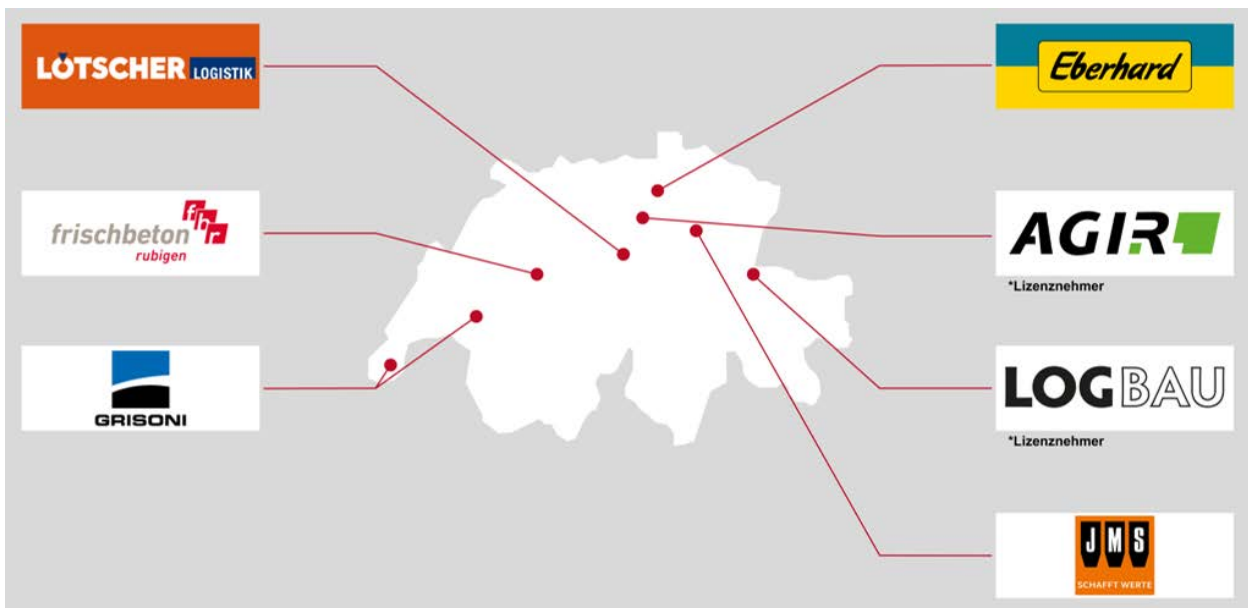


Abb. 2: Der schweizweite Zusammenschluss der Familienunternehmungen



Abb. 3: Das kreislauffähige Haus auf mineralischer Basis, für jedes Bauprodukt im Haus das passende zirkulit® Produkt

1 Merkmale zirkulit® Beton in der Schweiz

1.1 Minimaler CO₂-Fußabdruck

Der zirkulit® Beton zeichnet sich aus durch den kleinstmöglichen CO₂-Fußabdruck. Dies wird durch folgende Schritte erreicht:

1. Minimierung des Zementgehalts:
Der minimale Zementgehalt richtet sich primär an die gültigen Normen (SN EN 206:2013+A2:2021). Um den minimalen Zementgehalt zu erreichen, wird für die Produktion des zirkulit® und zireco® Beton das Betongranulat hochwertig in Einzelfractionen aufbereitet.
2. Verwendung von CO₂-armen Zementsorten:
Der Zement hat den höchsten Einfluss auf die Ökobilanz des Betons. Im zirkulit® und zireco® Beton kommen daher ausschließlich CO₂-optimierte Zemente - aktuell der CEM II/B-M - zum Einsatz.
3. CO₂-Speichertechnologie der zirkulit AG:
Mit der CO₂-Sequestrierung im Betongranulat wird CO₂ permanent im zirkulit Beton gespeichert. Pro Kubikmeter zirkulit Beton werden auf diesem Weg mindestens 10 kg CO₂ gespeichert. Die Speichertechnologie der zirkulit AG wird sukzessive weiterentwickelt zur Maximierung der CO₂-Speicherung im Beton.

2 CO₂ aus schweizerischen Biogasanlagen

In Biogasanlagen gewinnt man Biogas aus Abfallstoffen wie Grüngut oder Klärschlamm. Da wir auf Rohstoffe wie Mais oder Raps für die Herstellung von Biogas verzichten, entsteht dabei keine Konkurrenz zur Produktion von Nahrungs- und Futtermitteln. Pflanzen und Reststoffe können in Biogasanlagen zu Biogas umgewandelt werden und als Energiequelle für die Strom- und Wärmeproduktion oder sogar über die weitere Veredlung zu Biomethan als Erdgasersatz in Kraftwerken und Motoren dienen. Zudem hat Biogas den Vorteil, dass es speicherbar ist. In einer Biogasanlage wird Biogas durch Vergärung von Biomasse produziert, indem Mikroorganismen organische Masse unter Ausschluss von Sauerstoff zu Biogas umwandeln. Das Biogas ist ein Gasgemisch aus überwiegend Methan (CH₄) und Kohlenstoffdioxid CO₂. Das Kohlenstoffdioxid CO₂ aus biogener Herkunft wird an der Quelle abgeschieden und die zirkulit AG entnimmt es am Kamin, bevor das CO₂ in die Atmosphäre ausgeschieden wird.

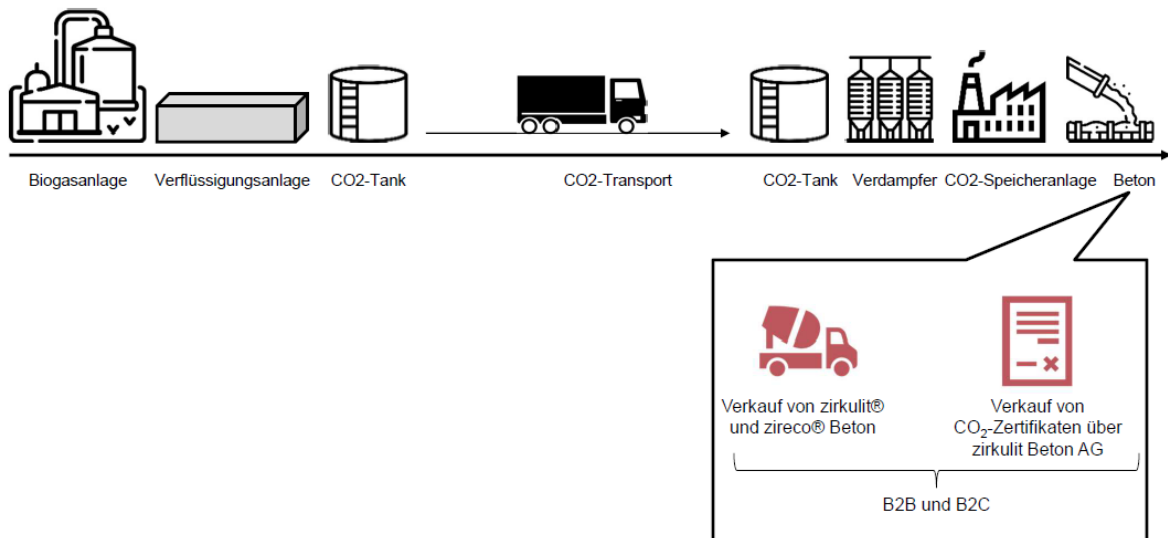


Abb. 4: Ablauf CO₂-Speicherprozesses

3 CO₂-Speichertechnologie in der Schweiz

3.1 Mit zirkulit® Beton CO₂ permanent speichern

Mit der von der zirkulit AG entwickelten CO₂-Speichertechnologie werden mindestens 10 kg CO₂ pro Kubikmeter zirkulit® Beton gespeichert. Alter Beton hat das Potential in den Poren CO₂ einzulagern. Dabei wird das CO₂ durch eine chemische Reaktion in Form von Kalkstein gebunden. Die zirkulit AG hat eine Technologie entwickelt, um diese Eigenheit des Betongranulats zu nutzen und so CO₂ im Betongranulat zu sequestrieren.

Die Bindung von CO₂ im Beton ist ein natürlicher Prozess, der bereits beim in der Stadt verbauten Beton abläuft. Dieser Prozess läuft sehr langsam ab und am Ende eines Lebenszyklus ist in der Regel rund ein Drittel des CO₂-Bindungspotentials ausgeschöpft. Kommt der Beton am Ende eines Lebenszyklus in einem Aufbereitungszentrum an, wird der Beton verwertet. Das heißt, die angelieferten Betonbrocken werden zerkleinert, sortiert und von Fremdstoffen befreit. Bevor die so gewonnenen Granulate als neue Zuschlagstoffe für neuen Beton verwendet werden, werden sie in der Speicheranlage behandelt. So kann ein großer Teil des restlichen Potentials an CO₂-Bindung ausgeschöpft werden. Durch den chemischen Prozess der Karbonatisierung wird Kohlenstoffdioxid im Betongranulat gespeichert. Im Betongranulat, respektive im Zementstein in den Poren des Betongranulats, ist Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) enthalten, welches unter Zugabe von Kohlenstoffdioxid (CO₂) zu Calciumcarbonat (CaCO₃, Kalkstein) und Wasser (H₂O) reagiert (siehe Gleichung 1).



mit Ca(OH)₂ = Calciumhydroxyd
 CO₂ = Kohlenstoff
 CaCO₃ = (natürlicher) Kalkstein
 H₂O = Wasser

Durch diese chemische Reaktion ist das Kohlenstoffdioxid durch die Mineralisierung dauerhaft und unter üblichen Einsatzbedingungen irreversibel im Gestein gebunden. Auch eine erneute Aufbereitung des aus dem CO₂-Betongranulat produzierten Betons macht die Sequestrierung nicht rückgängig.



Abb. 5: zirkulit CO₂-Speicherprozess

Bei der Entwicklung der Speichertechnologie stand für die zirkulit AG die Skalierung auf industriellen Maßstab im Zentrum. Der Speicherprozess ist im Anlagenprozess integriert. Die manuellen Arbeiten sind auf ein Minimum reduziert. Zudem wird, soweit möglich, die vorhandene Infrastruktur in einem Betonwerk genutzt. In der Regel sind lediglich für die Lagerung von CO₂ bauliche Maßnahmen notwendig. Die Fremdüberwachung des Speicherprozess der zirkulit AG erfolgt durch die EBP AG. Als vom BAFU zugelassene Validierungsstelle ist die EBP AG spezialisiert auf die Überprüfung von Kompensationsprojekten. Zudem bringt die EBP AG großes Know-how in allen Disziplinen rund um den Bau mit. Dank dieses breiten Fachwissens ist EPB der optimale Partner, um diesen Sequestrierungsprozess im Betongranulat zu überwachen.

4 Autor

Reto Märki

Geschäftsführer
zirkulit Beton AG
Steinackerstrasse 56
8302 Kloten
reto.maerki@beton.zirkulit.ch

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 Wasserzementwerten 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 Wasserzementwerten 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 dehydratisiert, 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.

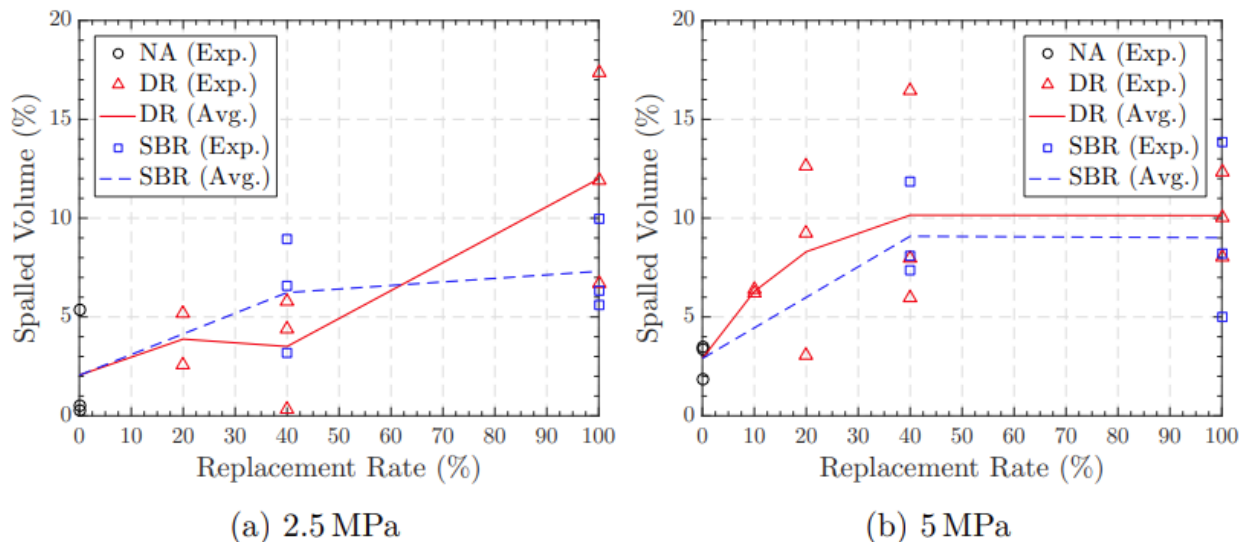


Abb. 1: Abhängigkeit des abgeplatzten Betonvolumens vom Anteil rezyklierter Gesteinskörnung unter einaxialer äußerer Belastung senkrecht zur erhitzten Oberfläche [22]

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 CO₂-Konzentrationen ein puzzolanisch reaktives Siliciumoxidgel gebildet [34]. Die Ökobilanz der Reaktivierung hängt dabei von verschiedenen Randbedingungen (Trocknung, Aufbereitungstemperatur, CO₂-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/m³ CEM I; w/z=0,50) am Beispiel der Parameter Treibhauspotenzial (GWP) und nicht erneuerbarer Primärenergie (PE_{ner}), 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 CO₂-Äq/m³ zum GWP und mit 39 MJ/m³ 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.

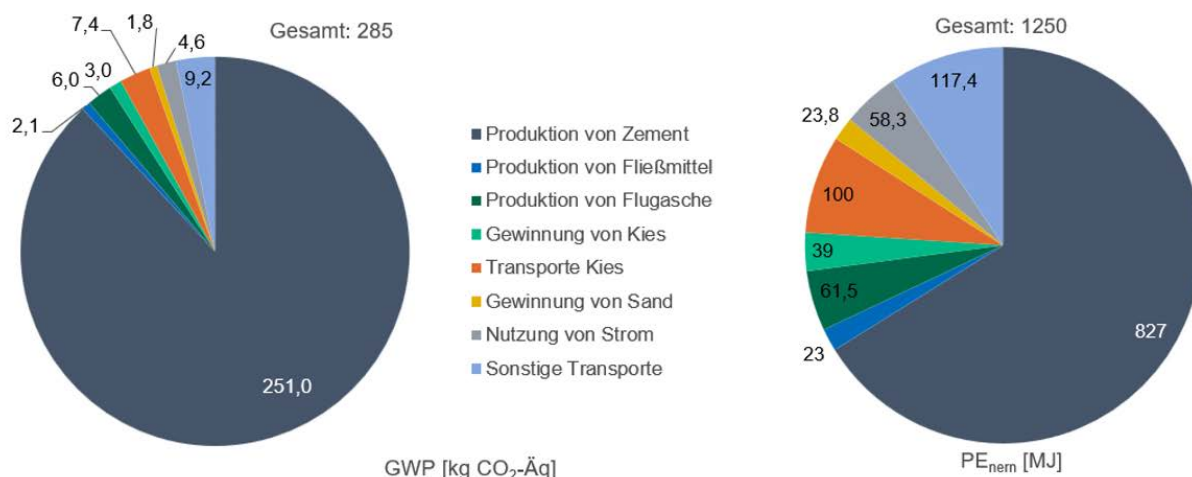


Abb. 2: Einflussfaktoren auf Treibhauspotenzial und Gesamteinsatz nicht erneuerbarer Primärenergie eines im Verbundforschungsvorhaben untersuchten Betons [32]

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.
- [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

Praxisbeispiel – Brenner Basistunnel

Roland Murr

Zusammenfassung

Der Brenner Basistunnel (BBT) ist ein bilaterales Projekt im europäischen Kontext, mit dem Ziel, durch eine neue Zug-Infrastrukturanlage mit Flachbahncharakter eine Verkehrswende entlang des Brenner-Korridors zu ermöglichen. Infolgedessen werden die ökonomische Effizienz und ökologische Verträglichkeit des Verkehrs in den europäischen Lebens- und Wirtschaftsräumen verbessert. Als ein Kernstück des Eisenbahn-Hochleistungs-Korridors zwischen Stockholm und Palermo unterquert der BBT die Alpen auf österreichischem und italienischem Staatsgebiet. Als technische Herausforderungen sind neben einer komplexen Geologie vor allem logistische Randbedingungen und eine im Vergleich zum Bedarf beschränkten Verfügbarkeit von Ressourcen bei der Projektumsetzung zu lösen. Um der beschränkten Verfügbarkeit von Rohmaterial entgegenzuwirken, wurde im Projekt Tunnelausbruchmaterial als Gesteinskörnung für Beton aufbereitet. Im folgenden Beitrag wird neben der Vorstellung des Projekts über die Voraussetzungen, die Vorversuche, die Umsetzung und die daraus abgeleiteten Erkenntnisse berichtet.

Schlagwörter: Brenner Basistunnel, Zugtransport, Aufbereitung, ökologische Verträglichkeit, Wirtschaftlichkeit, rezyklierte Gesteinskörnung, Tunnelbau

Abstract

The Brenner Basistunnel (BBT) is a bilateral project in the European context, with the aim of facilitating a turnaround in transport along the Brenner corridor by means of a new train infrastructure facility with a flat railway character. As a result, the economic efficiency and ecological compatibility of transport in the European living and economic areas will be improved. As a core section of the high-capacity railway corridor between Stockholm and Palermo, the BBT crosses under the Alps on Austrian and Italian territory. In addition to complex geology, the main technical challenges to be overcome during project realisation are logistical constraints and the limited availability of resources compared to demand. To counteract the limited availability of raw materials, tunnel excavation material was processed as aggregate for concrete in the project. In addition to presenting the project, the following article reports on the prerequisites, the preliminary tests, the realisation and the resulting findings.

Keywords: Brenner Basistunnel, train transport, recycling, ecological compatibility, economic efficiency, recycled aggregate, tunneling

1 Projektüberblick - Brenner Basistunnel

Der Brenner Basistunnel unterquert als wesentliches Teilstück des ScanMed-Eisenbahn Hochleistungskorridors TEN (siehe Abbildung 1) den Alpenhauptkamm zwischen Innsbruck (Österreich) und Franzensfeste (Italien) in einer Länge von 55 km. Der Güterverkehr wird über einen Umfahrungs- und Verbindungstunnel vor Innsbruck abgeleitet, vor der Nothaltestelle Innsbruck wieder in die Haupttunnelröhren eingeleitet und endet beim Portal Franzensfeste. Der Abschnitt für den Güterverkehr erreicht eine Gesamttunnellänge von 64 km und wird somit die längste unterirdische Eisenbahnverbindung weltweit.

Das gesamte Tunnelsystem des Brenner Basistunnels (siehe Abbildung 2) erreicht eine Länge von über 220 km. Die beiden getrennten, eingleisigen Haupttunnelröhren mit einem Ausbruchsquerschnitt von 60 m² bis 80 m² weisen einen Achsabstand von 70 m auf. Mittig und ca. 12 m tiefer liegt der mit 40 m² bis 60 m² Ausbruchsquerschnitt projektierte Erkundungsstollen, dessen Nutzung vielfältig ist (siehe Abbildung 3).



Abb. 1: TEN – Trans European Network; die 11 Hochleistungsbahnstrecken der EU

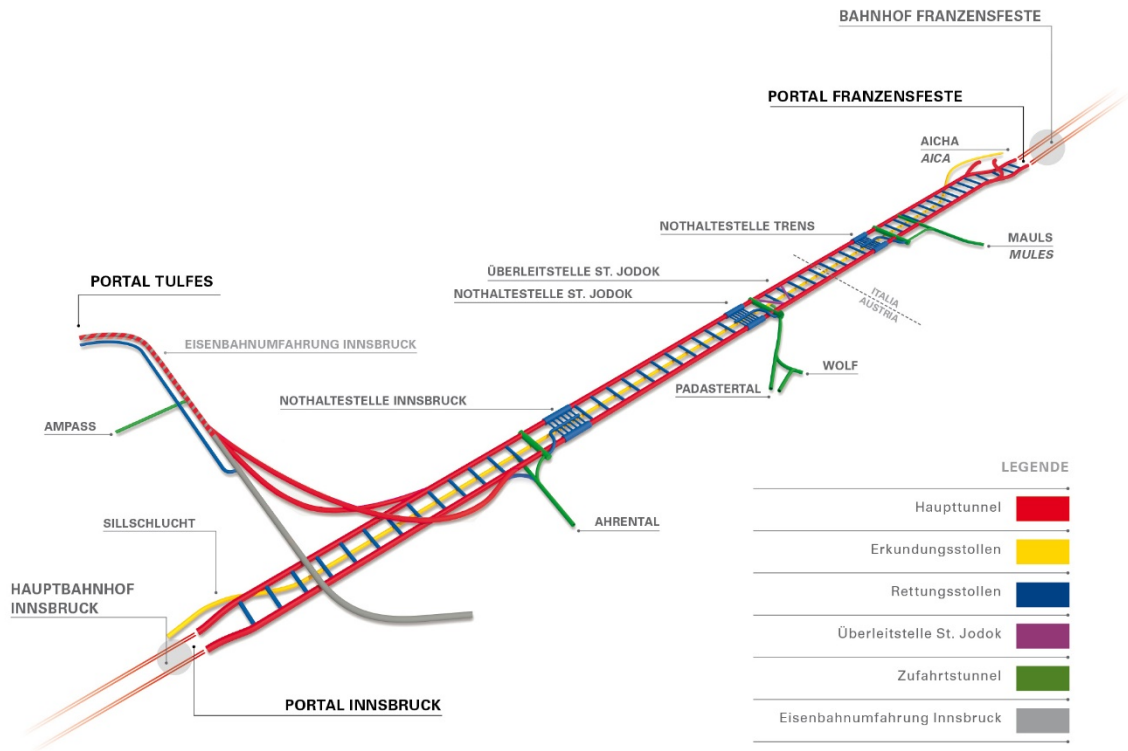


Abb. 2: Tunnelsystem des Brenner-Basistunnels, Grafik BBT-SE

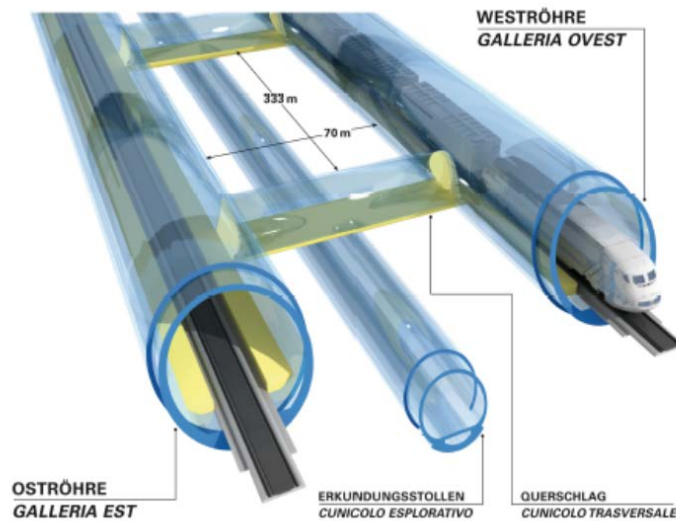


Abb. 3: Anordnung der Tunnelquerschnitte Brenner Basistunnel, Grafik BBT-SE

In der Projektierung und dem Bau wird der Erkundungsstollen für die vorauseilende, detaillierte Erkundung der Geologie und eine kontrollierte Drainagierung des Gebirges genutzt. Nach Abschluss der Rohbauarbeiten wird er für die Unterbringung von Tunnelausrüstung vorgesehen wodurch ein weitgehend unterbrechungsfreies Servizieren im Betrieb ermöglicht werden soll. Der vorwiegend für den Güterverkehr vorgesehene Umfahrungsbereich von Innsbruck besteht abweichend dazu aus zwei getrennten, sich räumlich überschneidenden Verbindungstunneln. Die räumliche Überschneidung ist wegen des Fahrtrichtungswechsels zwischen dem Linksverkehr in Italien und dem Rechtsverkehr in Österreich und Deutschland erforderlich. Im

größeren Querschnitt des Verbindungstunnels ist der Rettungsbereich integriert, wird jedoch durch eine Brandschutzwand vom einspurigen Fahrraum abgetrennt. Die hochfeste Innenschale kam im Bereich der Verbindungstunnel zum Einsatz, die Wiederverwertung von aufbereitetem Tunnelausbruch als Gesteinskörnung für Beton kam im Baubereich Wolf/Padastertal zum Einsatz.

Insgesamt werden für das Projekt Brenner Basistunnel etwa insgesamt 5 Mio. m³, im österreichischen Projektgebiet rund 3 Mio. m³, an Konstruktionsbeton verwendet. Insgesamt ist ca. 60 % des Betonvolumens durch Ortobet, ca. 20 % durch Spritzbeton und ca. 20 % durch Beton für Tübbinge abzudecken.



Abb. 4: Insgesamt wurden mit Stand November 2023 in Österreich und Italien 163 km des Brenner Basistunnels ausgebrochen, Grafik BBT-SE

2 Beton mit aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial

2.1 Motivation, Geologie und Maschinenteknik

2.1.1 Motivation

Im Bauabschnitt Wolf herrschten mit einer Talsohlenbreite des „Wipptales“ von etwa nur 100 bis 300 m beengte Platzverhältnisse, innerhalb derer der natürliche Fluss „Sill“ und die Brenner Bundesstraße B 182 die Talsohle erschwerend einengen. Zusätzlich war die Anlieferung von Ausgangsmaterialien bis zur Fertigstellung des Vorbereitungsbauloses E52, Wolf II, nur über LKW möglich, eine im direkten Nahbereich gelegene Kiesabbaugrube nicht vorhanden. Diese Randbedingungen in Kombination mit dem Auftrag zur Ressourcenschonung führten während des Projektes zur Prüfung, ob der Tunnelausbruch für eine Verwendung als Baustoff geeignet wäre:

- Die Verwendung von aufbereitetem Tunnelausbruch verringert den logistisch aufwendigen Antransport und die Zwischenlagerung extern bezogener Gesteinskörnung
- Reduktion des Deponievolumens
- Reduktion von Transporten inerter Gesteinskörnungsmaterialien außerhalb des Standorts
- Ressourcenschonung
- Einhaltung der AWG-Anforderung, dass Tunnelabraum recycelt wird
- Verbesserung der Ökobilanz (z. B. CO₂, SO₂, nicht erneuerbare Energie- und Mineralressourcen nach (BBT-intern, 2015)

2.1.2 Geologie und Maschinenteknik

Geologisch befand sich der Vortrieb des Zufahrtstunnels innerhalb des Bündner Schiefer Gebirgskomplexes. Der Bündner Schiefer besteht mehrheitlich aus Wechsellagen von Kalkschiefern und Kalkphylliten mit Einschaltungen von Schwarzphylliten und graphitischen Einschlüssen und zeichnet sich vor allem durch eine gute Spaltfestigkeit entlang der Scherflächen mit einem flachen Erscheinungsbild aus. Dadurch ist die Neigung zur Feinteilbildung bei der Zertrümmerung und der Bildung einer ungünstigen Kornform beim Brechen des Korns bestimmend. Auf Grund dieser nicht idealen Eigenschaften des Rohstoffs fiel besonderes Augenmerk auf eine stufenweise Aufbereitung mit optimierter Auswahl und Zusammenstellung der Maschinenteknik. Weitere Kriterien für die Wahl der Anlagentechnik waren das Erfordernis eines geringen Platzbedarfs auf Grund der beengten Platzverhältnisse, der schnellen Verfügbarkeit der Maschinenteknik sowie die Wahl

einer flexiblen Systemkonstellation durch den Einsatz mobiler Geräte. Um die Investitionskosten gering zu halten, wurde bei den Brechern auf gebrauchte Geräte zurückgegriffen. Als Anforderung an den hohen Qualitätsstandard erfolgte eine Nassaufbereitung des Tunnelausbruchs mit neuer Gerätschaft. Für eine Reduktion der Feinteile und Verbesserung der Qualität des Rohmaterials wurde eine Vorabsiebung vorgesehen. Das gesamte der weiteren Aufbereitung zugeführte Material wurde mit einem Trennschnitt bei 32 mm zweigeteilt, wobei der Anteil 0 mm bis 32 mm auf die Deponie gebracht wurde und nur der Anteil > 32 mm bis Größtkorndurchmesser der weiteren Aufbereitung zugeführt wurde. Die Ausführung sah folgende Maschinenteknik vor:

- Gitterrost
- Backenbrecher
- Vorabsiebung bei 32 mm Durchmesser
- Prallmühle
- Zwischensiebung (für eine mögliche Herstellung von Filterkies 16/32 mm)
- Vertikalmühle
- Klassierung mit Nasssiebung 0/4, 4/8, 8/22 mm
- Nachwaschen des Sandes 0/4 mm im Schöpfgrad
- Schlammwässerung in Filtersäcken

Zur Vermeidung von Staub- und Lärmemissionen wurde das im konventionellen Vortrieb ausgebrochene Material über den Vorbrecher und die Vorabsiebung bereits im Tunnel im Aufweitungsbereich einer Lüfterkaverne getrennt, die restlichen Aufbereitungsschritte erfolgten an dem Deponie Baufeld im seitlichen Padastertal. Die Entscheidung, die Gesteinskörnung in die 3 Kornfraktionen 0/4 mm, 4/8 mm und 8/22 mm zu klassieren, wurde auf Grund von Materialbedarf und vorhandenem Lagerplatz getroffen. Da der Anteil an Spritzbeton mit Größtkorn 8 mm im Baulos über 50 % betrug, war der Bedarf an Sand und Kies bis 8 mm vorherrschend. Der Bedarf an Gesteinskörnung für den Konstruktionsbeton konnte gut mit der weitgestuften Körnung 8/22 mm abgedeckt werden, zumal der Anteil an Gesteinskörnern > 16 mm durch den Aufbereitungsprozess gering war.



Abb. 5: Übersicht über die Materialaufbereitungsanlage im Padastertal, Foto BBT-SE

Die im Baufeld des seitlichen Padastertales situierte Aufbereitungsanlage (siehe Abbildung 5) produzierte ab Inbetriebnahme die gesamte Gesteinskörnung für den Beton des BBT-Vorbauloses H52, die in weiterer Folge direkt ohne Verlassen des Baubereichs der vor Ort befindlichen Baustellenmischanlage zugeführt wurde.

2.2 Rezepturfindung Spritzbeton

Der im Baulos E52 Wolf benötigte Spritzbeton wurde zur Vortriebs- und Ausbruchsicherung des konventionell aufgefahrenen Tunnels eingesetzt. Dafür wurde die Güte SpC 25/30/II/J2/XC4/GK8 gefordert. Die Rezepturfindung lief in mehreren weitgehend parallel ablaufenden Phasen statt. Zum einen wurden Untersuchungen an Bindemittelleimen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und unterschiedlichen Erstarrungsbeschleuniger-Produkten durchgeführt, zum anderen wurden für eine Optimierung der Sieblinie und der Maschineneinstellungen in der Aufbereitungsanlage Spritzversuche durchgeführt. In den Bindemittelleim-Untersuchungen wurden für die jeweilige beschleunigte Kombination die Erstarrungszeiten und der Festigkeitsverlauf bis 24 Stunden gemäß ÖBV-Richtlinie Spritzbeton [2] untersucht. Für ausgewählte Kombinationen wurde am Mörtel auch der Festigkeitsabfall im Alter von 7 Tagen im Vergleich zum unbeschleunigten Null-Mörtel gemäß [2] überprüft.

Die Zementleimversuche zeigten, dass die produktabhängige Erstarrungsbeschleuniger-Dosierung für vergleichbare Erstarrungsverhalten bei ausgewählter Bindemittelkombination lediglich zwischen 2 % v. B. und 4 % v. B. betrug. Die Erstarrungsbeschleunigung führte allerdings bei Mörtelprismen produktabhängig zu teilweise deutlich unterschiedlichen Festigkeitsverlusten im Vergleich zu unbeschleunigten Mischungen. Die Spritzversuche verdeutlichten, dass die Erstarrungsbeschleuniger-Bindemittelleim-Kombinationen mit einer geringen Dosierung und einer kurzen Zeitspanne zwischen Erstarrungsbeginn und -ende Schwierigkeiten in der Dosierung verursachten und dass sich höhere Frühfestigkeiten zu einer verringerten Festigkeitsleistung im höheren Alter, bzw. durch einen erhöhten Festigkeitsabfall bemerkbar machten. Seitens Bindemittelzusammensetzung kam nach Optimierungen eine Mischung von einem CEM I 52,5 N und einem CEM II/A-M (S-L) 42,5 N zu je 50 % mit Zugabe eines Zusatzstoffs Typ II in Form eines „Anrechenbaren Hydraulisch Wirksamen Zusatzstoffes“ (AHWZ) in einem Anteil von 11 % vom Bindemittel zur Anwendung. Der relativ hohe Bindemittelgehalt wurde durch den erhöhten Wasserbedarf der aufbereiteten Gesteinskörnung erforderlich (siehe Tabelle 1).

Tab. 1: Mixdesign Spritzbeton

Ausgangsstoff	Sorte / Type	Menge je m ³ Spritzbeton
Zement 1	CEM I 52,5 N	210 kg/m ³
Zement 2	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	210 kg/m ³
AHWZ (Zusatzmittel Typ II)	Fluasit	50 kg/m ³
Wasser	-	220 l
Sand 0/4 mm	Aufbereiteter Sand	1119 kg/m ³
Kies 4/8 mm	Aufbereiteter Kies	488 kg/m ³
Zusatzmittel	Fließmittel, Konsistenzhalter, Luftporenbildner	Nach Erfordernis

2.3 Ausführung - Kennwerte

Für die Ausführung wurde direkt vor Ort ein Baustofflabor installiert. Durch ein verdichtetes Überwachungs- und Überprüfungsprogramm an der Mischanlage und an der Einbaustelle erfolgte die Kontrolle und Steuerung der Produktion. Im Bereich der Ausgangsstoffe wurde wöchentlich eine Kontrolle der Sieblinie der Einzelfraktionen und des Feinanteils durchgeführt (siehe Abbildung 6). Für den Beton erfolgte täglich die Frischbetonkennwerteermittlung und Kontrolle der Frühfestigkeitsentwicklung des Spritzbetons.

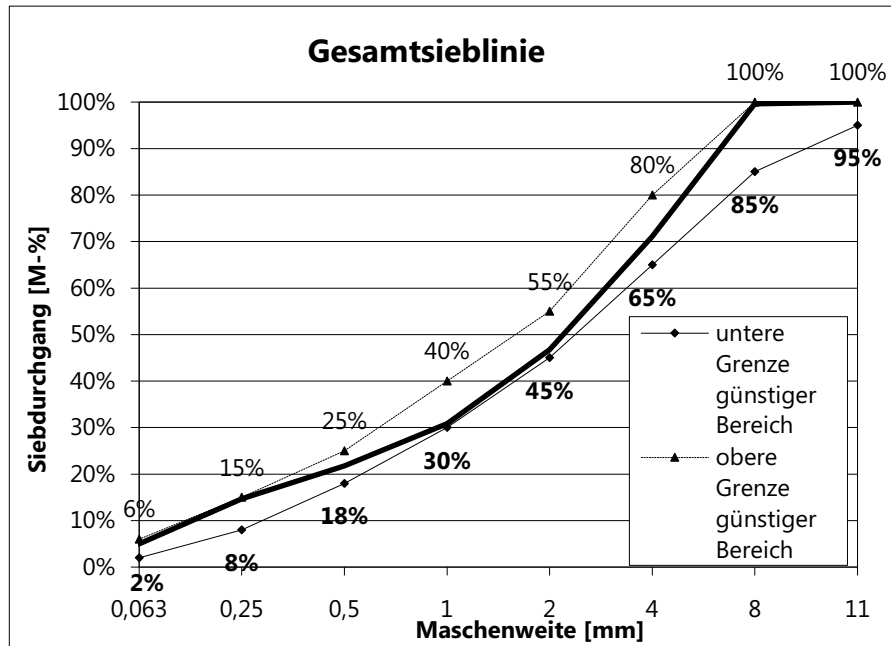


Abb. 6: Typische Gesamtsieblinie des aufbereiteten Tunnelausbruchmaterials für Spritzbeton während der Ausführungsphase

Durch die Verwendung des aufbereiteten Tunnelausbruchmaterials stellte sich materialbedingt ein relativ hoher Feinteilgehalt im oberen Bereich des günstigen Bereiches ein, wodurch gegenüber Standardmischungen ein erhöhter Wasseranspruch des Betons vorherrschend war. Dem erhöhten Wasseranspruch wurde durch Verwendung eines zweistufigen Verflüssiger-Systems, bestehend aus einem Hochleistungsfließmittel und einem Konsistenzhalter, gegengesteuert. Allerdings musste in der Produktion ein konstant höherer Wasseranspruch bei einer homogenen Produktion akzeptiert werden. Für die Nachweise der Druckfestigkeiten, der E-Modulentwicklung und der Gefügedichte wurden Bohrkerne sowohl aus Spritzkisten als auch dem Bauwerk entnommen. Die Frisch- und Festbetonkennwerte der durchgeführten Prüfungen sind in Tabelle 2 zu sehen.

Tab. 2: Frisch- und Festbetonkennwerte aus Prüfungen

	ABM	Luft	Rohdichte	Wasser	Nullmischung		Spritzbeton		
	10 Min.	Gehalt	-	Gehalt	Rohdichte	Druckfestigkeit	Rohdichte	Druckfestigkeit	Betonalter
	-	LP-Topf	LP-Topf	Röstng.	56 Tage	56 Tage	-	-	-
	cm	%	kg/m ³	kg/m ³	kg/m ³	N/mm ²	kg/m ³	N/mm ²	Tage
Anzahl an Prüfungen	196	195,0	196	196	196	84,0	65	65,0	65,0
Mittelwert	64	6,6	2.204	224	2.220	40,6	2.231	31,0	72,2
Minimum	52	2,5	2.097	201	2.150	5,9	2.154	25,5	28,0
Maximum	70	12,0	2.330	249	2.310	50,6	2.288	40,2	156,0
Standardabweichung	4	1,7	44	8	34	5,0	26	2,9	26,8

Aus den Untersuchungen wurde bestätigt, dass der Spritzbeton auf Grund der Materialeigenschaften des Bündner Schiefers ein sehr gutmütiges Materialverhalten aufwies. Die mit der Lastumverteilung einhergehenden Verformungen konnten durch den tiefen E-Modul bei den auftretenden Spannungen (siehe Abbildung 7) weitgehend ohne Schäden der Spritzbetonschale hervorragend aufgenommen werden.

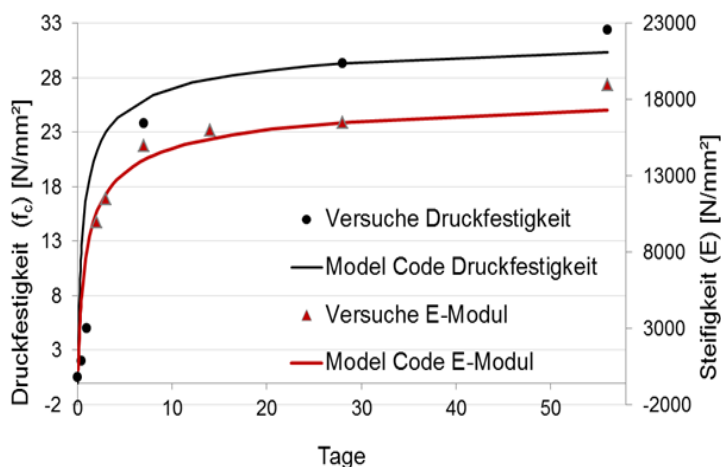


Abb. 7: Entwicklung von E-Modul und Druckfestigkeit (Prüfwerte, Rechnung), [1]

2.4 Studien zur Optimierung des Mixdesigns

Basierend auf der Erkenntnis, dass das vor allem aus phyllitischen Bündner Schiefer aufbereiteten Rohmaterials einen hohen Wasserbedarf für sich beansprucht, wurden Laboruntersuchungen zu einer weiteren Rezeptoptimierung durchgeführt. Da der Wasseranspruch der Gesteinskörnung wesentlich vom Wasseranspruch des Sandes abhängig ist, wurde im Speziellen der Zusammenhang zwischen Wasserbedarf und einem teilweisen bis zu 50%-igen Austausch der aufbereiteten Sandfraktion 0/4 mm durch eine kalzitische Sandfraktion 0/4 mm untersucht. Beim stufenweisen Austausch des Sandes war es notwendig, die Zusatzmitteldosierungen oder auch die Produkte selbst für die einzelnen Mischungsrezepturen anzupassen. Folgende Mischungen wurden verglichen, wobei das Bindemittel unverändert blieb (siehe Tabelle 3):

Tab. 3: Mixdesign für Optimierungsversuche Spritzbeton

Ausgangsstoff	Sorte / Type	Menge je m ³ Spritzbeton
Zement 1	CEM I 52,5 N	210 kg/m ³
Zement 2	CEM II/A-M (S-L) 42,5 N	210 kg/m ³
AHWZ (Zusatzmittel Typ II)	Fluasit	50 kg/m ³
Nullmische NM	0/4 kalzitisch / 0/4 aufbereitet	0 % / 70 %
M20	0/4 kalzitisch / 0/4 aufbereitet	20 % / 50 %
M35	0/4 kalzitisch / 0/4 aufbereitet	35 % / 35 %
M50	0/4 kalzitisch / 0/4 aufbereitet	50 % / 20 %
Kies 4/8 mm	4/8 aufbereitet	30 %
Zusatzmittel	Fließmittel, Konsistenzhalter, Luftporenbildner	Nach Erfordernis

In Abbildung 8 ist das ermittelte Potential zur Wassereinsparung bei Verwendung eines Sandes mit geringerem Wasserbedarf bei vergleichbarer Verarbeitbarkeit des Frischbetons graphisch dargestellt.

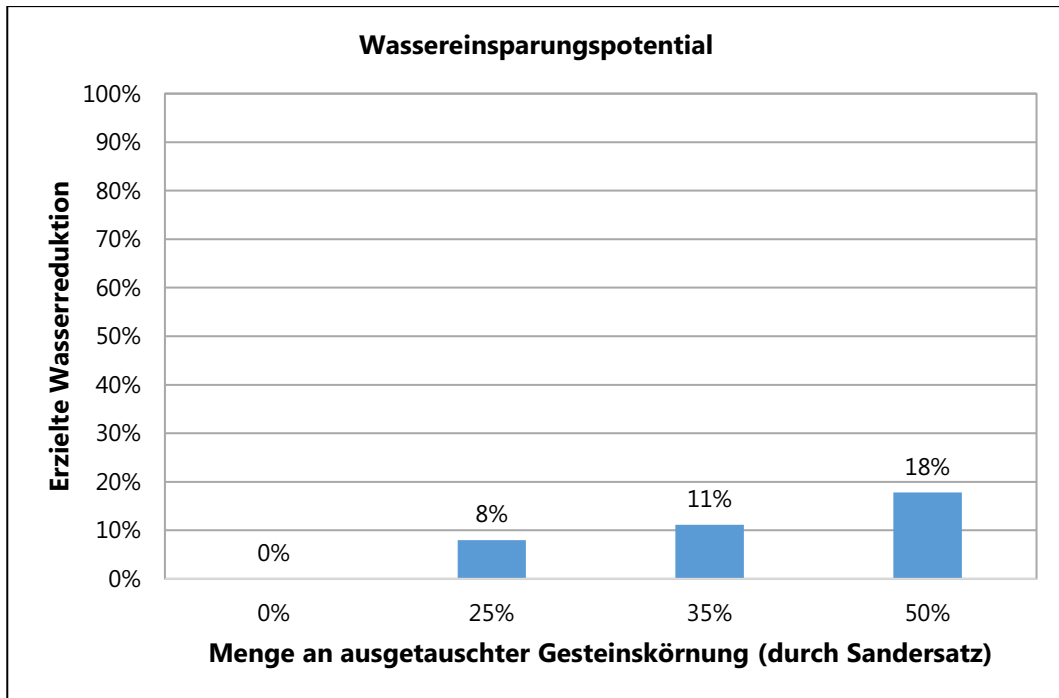


Abb. 8: Wassereinsparungspotential bei Sandaustausch

Zufolge des Wassereinsparungspotentials ergeben sich bei vergleichbaren Verarbeitungseigenschaften des Frischbetons deutliche Unterschiede in der zu erreichenden Festigkeit (siehe Abbildung 9).

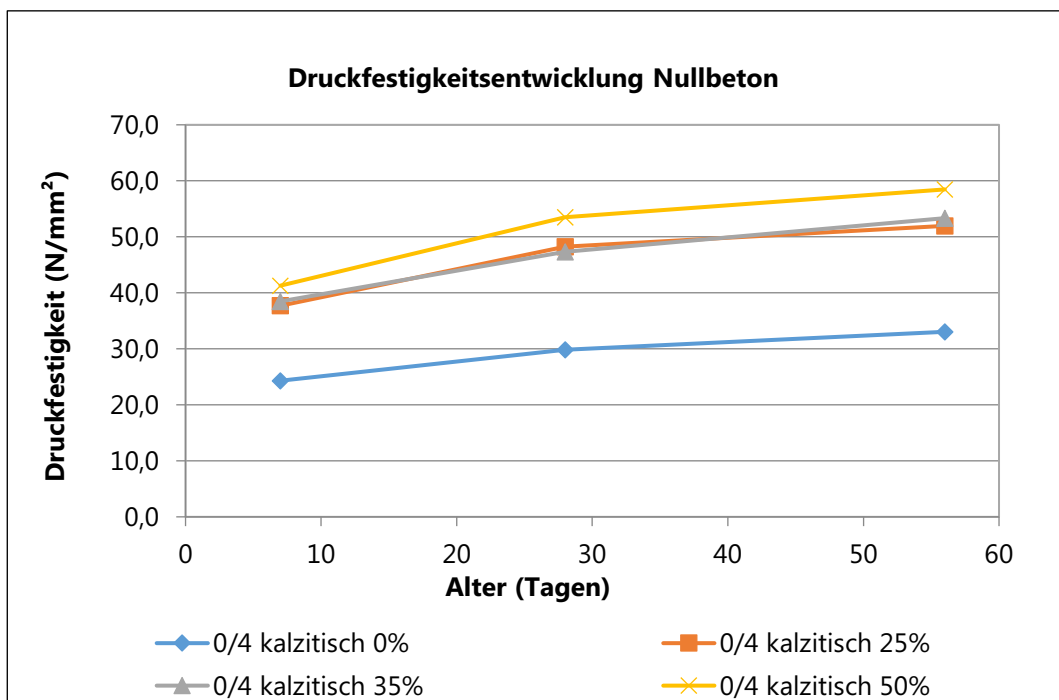


Abb. 9: Betonfestigkeitskurve für NM, M20, M35 und M50 Mischungen (unbeschleunigte Betone)

In den Optimierungsversuchen konnte durch systematischen Ersatz von aufbereitetem Bündner-Schiefer-Sand durch kalzitischen Sand 0/4 mm aufgezeigt werden, dass mit zunehmendem Ersatz der Wasseranspruch deutlich reduziert werden könnte, wodurch sich die Möglichkeit einer deutlichen Druckfestigkeitssteigerung des Spritzbetons, bzw. einer möglichen Reduktion des erforderlichen Bindemittelgehalts anbieten würde.

3 Lessons learned

3.1 Erfolge

Insgesamt wurden im Projekt Wolf II knapp 80 % des Betons mit aufbereitetem Tunnelausbruchmaterial hergestellt. Der Anteil an zugelieferter Gesteinskörnung wurde vor der Installation der Aufbereitungsanlage benötigt, ab der Inbetriebnahme der Aufbereitungsanlage wurde eine autarke Versorgung der Baustelle mit Gesteinskörnung aus Tunnelausbruch erreicht.

Tab. 4: Betonkubaturen Vorbaulos H52, Wolf II mit angelieferter u. aufbereiteter Gesteinskörnung

Produkt	Menge	Anteil
Spritzbeton mit Gesteinskörnung angeliefert	25.000 m ³	26 %
Spritzbeton mit Gesteinskörnung aufbereitet	72.000 m ³	74 %
Spritzbeton gesamt	97.000 m ³	100 %

Produkt	Menge	Anteil
Konstruktionsbeton mit Gesteinskörnung angeliefert	16.000 m ³	18 %
Konstruktionsbeton mit Gesteinskörnung aufbereitet	72.000 m ³	82 %
Konstruktionsbeton gesamt	88.000 m ³	100 %

Produkt	Menge	Anteil
Beton mit Gesteinskörnung angeliefert	41.000 m ³	22 %
Beton mit Gesteinskörnung aufbereitet	144.000 m ³	78 %
Beton gesamt	185.000 m ³	100 %

Durch die Aufbereitung wurden die externen Materialtransporte außerhalb des Baustellenbereichs um ca. 250.000 Tonnen reduziert. Diese Tonnage entspricht einer Einsparung von ca. 10.000 externen LKW- Fahrten.

3.2 Benennung von Eckpunkten und Schwierigkeiten

Neben der Qualität des Ausgangsmaterials kommt der Aufbereitungstechnik und dem Durchsatz eine wesentliche Bedeutung zu. Dabei ist ein Optimum zwischen Aufbereitungsmenge und Aufbereitungsqualität zu finden. Für eine Steuerung ist eine konstante, baustellengebundene Laborbetreuung mit hinterlegten Prüfbläufen und Häufigkeiten unbedingt erforderlich. Die hergestellte Gesteinskörnung muss die Anforderungen an die erforderlichen Betongütern abdecken können. Dazu sind Überlegungen anzustellen, bis zu welcher Betongüte welche Grenzwerte bereits für die Gesteinskörnung vorzugeben und einzuhalten sind. Unabhängig davon ist eine Prüfung des Endprodukts Beton durch Nachweise am Festbeton in diese Überlegungen verstärkt einzubeziehen. Ebenfalls wesentlich ist die Berücksichtigung der unterschiedlichen jahreszeitlichen Randbedingungen für die Aufbereitung, Lagerung und Deponierung des Rohmaterials und Wertkorns, im vorliegenden Fall verschärft durch die Anwendung im alpinen Raum (z. B. frostsichere Aufbereitung, Wasseraufbereitung, Entwässerung des aufbereiteten Materials und des Rückstandes). Diese Erschwernisse konnten zum Großteil gut gelöst werden. Der hohe Wasseranspruch des Sandanteils bereitete jedoch erhöhte Schwierigkeiten und Aufwendungen.

3.3 Erforderliche Anforderungen und Regelungen – aus Sicht der Projekterfahrung

Die folgenden Überlegungen beruhen auf den bereits beschriebenen Erfahrungen, sind projektspezifisch anzupassen und nicht allgemein gültig. Sie schaffen einen Konnex zwischen Geologie und Qualitätsanspruch an das Rohmaterial. Nach Kenntnis der Geologie könnte eine Einteilung des Rohmaterials unter Bewertung

des Mineralbestands in 4 Kategorien erfolgen: Kat. A - gut geeignet, Kat. B - geeignet, Kat. C - bedingt geeignet und Kat. D - ungeeignet. Den jeweiligen Kategorien, die Qualitätsklassen des Ausgangsmaterials darstellen, können erzielbare Betongüten zugeordnet werden, z. B. Material der Kat. A - Betone bis zur Festigkeitsklasse C35/45, Material der Kat. B - Betone bis zur Festigkeitsklasse C25/30, Material der Kat. C - Füllbetone u. Betone bis zur Festigkeitsklasse C16/20. Unabhängig davon wären bei einer erneuten Aufbereitung mit gegenständlicher Geologie folgende Schritte vorgesehen. Grobe Gesteinskörnung kann zur Gänze, Sandfraktion 0/4 mm kann nur bis zu einem Anteil von max. 40 % mit aufbereitetem Ausbruchmaterial zur Anwendung kommen. Das bedeutet allerdings auch, dass 60 % des Sandes zugeführt werden müssen. Bestimmte Aufbereitungsschritte, z. B. Vorabsiebung des Rohmaterials, Kategorisierung des Rohmaterials sind frühzeitig vor dem Aufbereitungsprozess analog zur Ausbaufestlegung und Definition von zumindest erforderlichen logistischen Maßnahmen, z. B. Notabwurf, Seitenaufgabe, Zwischenbunker vorzuschreiben. Zur Steuerung und Zuordnung von Massenströmen sind redundante Erfassungssysteme idealerweise online erforderlich. Es empfiehlt sich auch, Regelungen zur personellen Besetzung mit Anforderungsprofil zu Schlüsselstellen in der Abwicklung der Aufbereitung zu definieren und einzufordern, da der Vortrieb und der Baubetrieb nicht ursächlich die Bedürfnisse der Aufbereitungslogistik und Aufbereitungstechnik im Fokus haben müssen. Für die Qualitätsanforderungen an das Produkt müssen klare Zielvorgaben und Grenzwerte mit dem dazugehörigen Prüf- und Überwachungsplan (Produktionskontrolle) ausgearbeitet und umgesetzt werden.

4 Literatur

- [1] Cordes, T.; Hofmann, M. Murr, R.; Bergmeister: Aktuelle Entwicklungen der Spritzbetontechnologie u Spritzbetonbauweise am Brenner Basistunnel. In: Spritzbetontagung 2018, In: Kusterle, W. (Hrsg.): Spritzbeton - Tagung 2018, Alpbach, 11.- 12.1.2018, Eigenverlag, 2018.
- [2] ÖVBB (ÖBV): Richtlinie Spritzbeton, Österreichische Vereinigung für Beton und Bautechnik, 2009.
- [3] ÖBV: Richtlinie Innenschalenbeton, Österreichische Bautechnik Vereinigung, 2012
- [4] ÖBV: Richtlinie Erhöhter baulicher Brandschutz für unterirdische Verkehrsbauwerke aus Beton, 2015

5 Autor

Dipl.-Ing. Roland Murr

Bauausführung AT, Betontechnologie und Qualitätssicherung
Brenner Basistunnel SE
Amraserstraße 8
A - 6020 Innsbruck
roland.murr@bbt-se.com

Die IBA'27: Quartiere für die Stadt der Zukunft

Karin Lang, Andreas Hofer und Tobias Schiller

Zusammenfassung

100 Jahre nach dem Aufbruch der Architekturmoderne am Stuttgarter Weissenhof sucht die Internationale Bauausstellung 2027 StadtRegion Stuttgart (IBA'27) nach der Zukunft des Bauens und Zusammenlebens in einem der wirtschaftlich stärksten Zentren Europas. Ihre Ausstellungsorte im Jahr 2027 sind sozial und funktional gemischte Häuser und Quartiere. Mit klugen und mutigen Bauprojekten (siehe Abbildung 3) will die IBA'27 zeigen, wie das Zusammenleben, Wohnen und Arbeiten in der Region zukünftig funktioniert - ihre Nähe und Vielfalt, ihre Kraft und die Produktivität, in der ganzen Region Stuttgart.

Schlagwörter: Internationale Bauausstellung, IBA'27, Architekturmoderne, Zukunft, Ausstellung, Bauprojekte, Vielfalt, Produktivität

Abstract

100 years after the dawn of architectural modernism at Stuttgart's Weissenhof, the International Building Exhibition 2027 StadtRegion Stuttgart (IBA'27) is looking for the future of building and living together in one of Europe's strongest economic centres. Its exhibition sites in 2027 are socially and functionally mixed houses and neighbourhoods. With clever and bold building projects, the IBA'27 aims to show how living together, housing and working in the region will function in the future - its proximity and diversity, its strength and productivity, in the entire Stuttgart Region.

Keywords: International Building Exhibition, IBA'27, architectural modernism, future, exhibition, building projects, diversity, productivity



Abb. 1: Lichtinstallation auf der Fassade des Doppelhauses von Le Corbusier in der Weissenhofsiedlung bei einer IBA'27-Veranstaltung in Stuttgart (Foto: IBA'27 / Franziska Kraufmann)

1 Wie wollen wir zukünftig leben?

1.1 Die IBA'27 als internationales Schaufenster

Eine zehnjährige Reise, ein gemeinsamer Aufbruch, das Ziel: die Stadtregion Stuttgart als lebenswerter, zukunftsfähiger Raum. Was zum Präsentationsjahr der Internationalen Bauausstellung 2027 gebaut, genutzt und ausgestellt sein soll, wirft als Ausgangspunkt zahlreiche Fragen auf: Wie wollen wir in der Region Stuttgart in den kommenden Jahrzehnten zusammenleben? Wie bauen wir zukunftsfähige Häuser? Wie begegnen Städte, Dörfer und Siedlungen der hoch industrialisierten Metropolregion Stuttgart dem gesellschaftlichen, technologischen und ökologischen Wandel?

Die Ausstellungsorte der IBA'27 sind Bauten und Infrastrukturen, die den Aufbruch in der Stadtregion Stuttgart sicht- und greifbar machen: Häuser und Quartiere, die Funktionen und Lebensbereiche mischen und so Nähe zwischen Menschen schaffen. Kleine und große Stadtbausteine, die urbane Dichte herstellen und das öffentliche Leben feiern. Landschaftsräume, die Ökologie und Nutzung durch den Menschen in Einklang bringen.

Den Vorhaben und Projekten der IBA'27 gemeinsam ist der Wille zu einem nachhaltig wertschätzenden Umgang mit Materialien, Räumen und sozialen Beziehungen. Sie entstehen durch die Transformation reiner Gewerbe- und Wohnviertel oder durch die Neuerfindung monofunktionaler Großstrukturen der 1960er- und 1970er-Jahre auf dem Weg zur durchmischten produktiven Stadt. Sie entwickeln Knotenpunkte des öffentlichen Verkehrs zu Orten der Begegnung weiter oder suchen die Rückeroberung des Neckars als Lebensraum und identitätsstiftendes Band der Region. Ihr Kreis schließt sich mit der Erneuerung der Werkbundsiedlung am Stuttgarter Weissenhof und ihrer Neuerschließung für die Bewohnerinnen und Bewohner, für die Wissenschaft und das Publikum.

1.2 Die IBA'27 gehört den Menschen

Die IBA'27 ist ein offenes und dialogorientiertes Format für alle Menschen der Region Stuttgart. Theorie trifft auf Praxis, Visionen erzeugen Aufbruchsstimmung, stoßen auf Kritik, entwickeln sich weiter – das Forum der IBA'27 lebt vom Austausch, der Vielfalt an Meinungen und der Frage, die uns eint: Wie wollen wir in Zukunft leben, wohnen und arbeiten?

2 Organisation der IBA'27

Gesteuert wird die Internationale Bauausstellung von der IBA'27 Stadtregion Stuttgart GmbH. Gesellschafter sind die Landeshauptstadt Stuttgart, der Verband Region Stuttgart und die Wirtschaftsförderung Region Stuttgart GmbH, die Architektenkammer Baden-Württemberg und die Universität Stuttgart. Ein internationales Kuratorium begleitet den Qualifizierungsprozess und empfiehlt dem Aufsichtsrat der IBA'27 ein Vorhaben zur Aufnahme als Projekt. Die inhaltliche Verantwortung liegt beim Intendanten Andreas Hofer, die kaufmännische Geschäftsführung bei Karin Lang. Seit 2021 wird die GmbH von dem Verein IBA'27 Friends e.V. unterstützt.

Von der Projekt sammlung zur Aus stellung

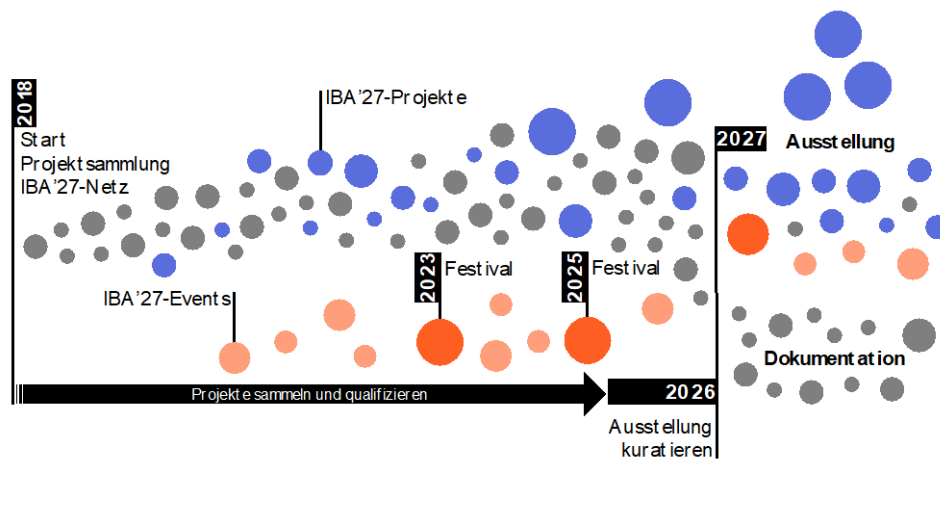


Abb. 2: Ablauf der IBA'27 (Bild: IBA'27)

3 Neuerfindung einer Stadtregion

3.1 Die fünf Themen und Räume

Seit dem Start der Projektsammlung im Oktober 2018 bewerben sich Kommunen, Initiativen, Unternehmen und private Träger mit kleinen und großen Vorhaben um Aufnahme in das Netz der IBA'27. Obwohl es sich oftmals um vielschichtige Herausforderungen handelt, ähneln sich viele Themen. In unterschiedlicher räumlicher Ausprägung finden sie sich an verschiedenen Orten der Region Stuttgart wieder. Die Benennung dieser Themen und Räume gibt der IBA'27 in der Stadtregion Stuttgart ein Gesicht und macht sie erlebbar. Über ihre konkreten Bauten, Orte und Typologien schreiben sie die Geschichte des Bauens und der Stadtentwicklung in hoch industrialisierten Metropolregionen in die Zukunft. Über den Lauf der IBA'27 werden sich die Themen weiter formen. Sie ermöglichen es, spezifische Strategien und Antworten zu entwickeln. Wo sind die Erkenntnisse der IBA'27 regionstypisch und nicht übertragbar? Wo sind sie allgemein, brauchen aber Anpassungen an die lokalen Gegebenheiten? Und wo liegt ein Kern, der so universell ist, dass er als Baustein neuer urbaner Praktiken, vergleichbar dem Anspruch der Moderne, zur Erkenntnis wird?

3.1.1 Die produktive Stadt

Digitale Transformation, roboterisierte Fabrikation und neue Mobilitätskonzepte verändern Produkte und Produktionsweisen in der Region Stuttgart. Es entstehen neue vertikal verdichtete Fabrik- und Gewerbekonzepte und ihre Nähe zu lärmempfindlichen Nutzungen, wie zum Beispiel dem Wohnen oder der Bildung (siehe Abbildung 3). Für viele Räume in der Region eröffnet sich damit die Chance, sich neu zu erfinden. Die Produktion kehrt in die Stadt zurück und Industriearaele werden zu Stadtbausteinen. Kleinteilige urbane Landwirtschaft versorgt die Stadt mit hochwertigen Lebensmitteln, moderiert das Klima und erhöht die Biodiversität.



Abb. 3: Unten arbeiten, oben wohnen: Entwurf für Neubauten im Quartier Neckarspinnerei in Wendlingen als Beispiel für die »Produktive Stadt« (Bild: Rustler Schriever Architekten mit gornik denkmal Landschaftsarchitekten)

3.1.2 Die Zukunft der Zentren

Durch großflächige Einkaufszentren vor der Stadt, Onlinehandel und veränderte Einkaufsgewohnheiten sind die Innenstädte unter Druck geraten. Die klassische Bankfiliale verschwindet, Gastronomie und Hotellerie kämpfen mit kleinen Margen und strukturellen Problemen. Schließungen setzen einen Abwertungsprozess in Gang und überlassen die im Nachkriegsboom stolzen Fußgängerzonen und Einkaufsstraßen den Wettbüros, Ramschläden und Take-away-Buden und in letzter Konsequenz dem Leerstand. Große Einkaufsinfrastrukturen in Gewerbegebieten setzen den innerstädtischen Handel weiter unter Druck, werden ihrerseits aber ebenfalls zu Treffpunkten und Freizeitzentren. Einige Kommunen in der Region Stuttgart suchen zusammen mit der IBA'27 nach neuen Strategien, um dieses Geflecht neu zu strukturieren und identitätsstiftende Orte des gesellschaftlichen Zusammenhalts neu zu definieren.

3.1.3 Orte der Bewegung und Begegnung

Die Zukunft der Mobilität beschäftigt die Region Stuttgart als Standort der Automobilproduktion, als vielfältig verflochtener Metropolraum mit Stau- und Umweltproblemen und als konfliktreiche Großbaustelle von Stuttgart 21. Als Bauausstellung fokussiert sich die IBA'27 beim Thema »Mobilität« auf die räumlichen Auswirkungen bei den Knoten des öffentlichen Verkehrs. Diese sind im S-Bahn-Netz häufig reine Halte, Ein- und Ausstiegspunkte, umgeben von Busbahnhöfen und Park-and-ride-Anlagen mit minimaler Infrastruktur. Abgesehen vom funktionalen Druck, den steigende Passagierzahlen auslösen, haben diese Bahnhöfe ein großes Verdichtungspotenzial. Mit ergänzenden Funktionen und Bauwerken können sie in Zukunft zu Orten der Verkehrsminderung werden. Coworking-Spaces, temporäres Wohnen, Kultur, Sport, Freizeit und Kinderbetreuungseinrichtungen ermöglichen dies.

3.1.4 Der Neckar als Lebensraum

Den fehlenden Bezug zum Wasser bezeichnen viele Menschen in Stuttgart als eines der größten Defizite ihrer Stadt. Der Neckar fließt an Stuttgart vorbei. Die Qualität des Wassers und die Nutzung als Wasserstraße verhindern das Baden, der Fluss ist ein technischer Kanal, an dem sich die Industrie entwickelte. Die Rückge-

winnung des Neckars und seiner Nebenflüsse als Lebensraum und identitätsstiftendes Band der Region Stuttgart ist eine Generationenaufgabe. Sie bedarf des gemeinsamen Gestaltungswillens und der Kraftanstrengung vieler regionaler Akteure. Die IBA'27 will mit Pilotprojekten und Experimenten die Transformierbarkeit des Flusses sichtbar machen und seinen ökologischen Umbau weiter vorantreiben.

3.1.5 Das Erbe der Moderne

Der hundertste Geburtstag der Weissenhofsiedlung ist der Anlass der IBA'27. Die hier gesetzten Maßstäbe entwickelten sich über die Charta von Athen zum universellen Anspruch der Moderne.

Nach dem Zweiten Weltkrieg entfaltete sie ihre ganze Wucht: beim Wiederaufbau der zerstörten Städte, in Trabantenstädten und dem Umbau der Innenstädte zu autogerechten Räumen. Die großen Gebäudekomplexe der 1960er und 1970er Jahre waren Höhe- und gleichzeitig Endpunkt dieser Entwicklung (siehe Abbildung 4). Seither ringen wir mit dem Erbe dieses kurzen, modernen zwanzigsten Jahrhunderts. Mehrere Projekte der IBA'27 suchen Strategien für den Umgang mit dem Bestehenden und seiner Weiterentwicklung. Wie können sich Siedlungen in Quartiere verwandeln? Wie lassen sich die gebauten Großstrukturen an neue Bedürfnisse anpassen und technisch so ertüchtigen, dass sie in einer postfossilen Welt funktionieren? Und nicht zuletzt: Wie kann dieser Prozess gesellschaftlich begleitet werden, so dass die teilweise negativ wahrgenommenen Gebäude Akzeptanz finden? Neben dem Erhalt einer baukulturell wichtigen Epoche wie auch bereits verbauter »grauer« Energie inspirieren dabei auch die häufig vergessenen sozialen Ansprüche der Moderne, beispielsweise ihre gemeinschaftlichen Wohnexperimente.



Abb. 4: Die Großstruktur des alten Sindelfinger Krankenhauses aus den 1960er-Jahren soll zu einem gemischten Stadtquartier umgebaut werden (Foto: IBA'27 / Niels Schubert)

4 Was wird 2027 zu sehen sein?

4.1 Die IBA'27 als Wendepunkt und Zukunftsangebot

Derzeit sind rund 100 Vorhaben & Projekte im IBA'27-Netz. Davon sind 24 »IBA'27-Projekte«, die in enger Zusammenarbeit mit dem IBA'27-Team entwickelt werden. Acht IBA'27-Projekte liegen in Stuttgart, 15 in den

umliegenden Landkreisen. Zu den Projekten werden weitere hinzukommen, einzelne können auch wegfallen. Abbildung 5 zeigt ein Überblick der Projekte in der Region Stuttgart.

- Alle IBA'27-Projekte: www.iba27.de/projekt
- Alle Vorhaben im IBA'27-Netz: www.iba27.de/netz

24 IBA'27-Projekte

- 09 Quartiersentwicklung Hangweide (Kernen i.R.)
- 10 Postareal Böblingen
- 13 Bahnstadt Nürtingen
- 15 Quartier Mühlkanal (Salach)
- 25 C1Wagenhallen / Maker City (Stuttgart)
- 31 Neue Mitte Leonhardsvorstadt (Stuttgart)
- 32 Der neue Stöckach (Stuttgart)
- 33 Quartier Böckinger Straße (Stuttgart)
- 46 Krankenhausareal Sindelfingen
- 48 Quartier Backnang West
- 54 Produktives Stadtquartier Winnenden
- 67 KaepseLE Goldäcker (Leinfelden-Echterdingen)
- 69 Agriculture meets Manufacturing (Fellbach)
- 75 Quartier der Generationen (Schorndorf)
- 76 Quartier am Rotweg (Stuttgart)
- 87 Neckarspinnerei (Wendlingen)
- 93 Adaptives Hochhaus (Stuttgart)
- 110 Neues Wohnen Korber Höhe (Waiblingen)
- 135 Zukunft Münster 2050 (Stuttgart)
- 136 Wohnen am Fluss (Stuttgart)
- 140 Tobias-Mayer-Quartier (Esslingen a.N.)
- 146 Leben in der Vorstadt (Schorndorf)
- 158 Postareal Leonberg
- 167 Holzparadies Schwanenweg Wendlingen

● Vorhaben im IBA'27-Netz

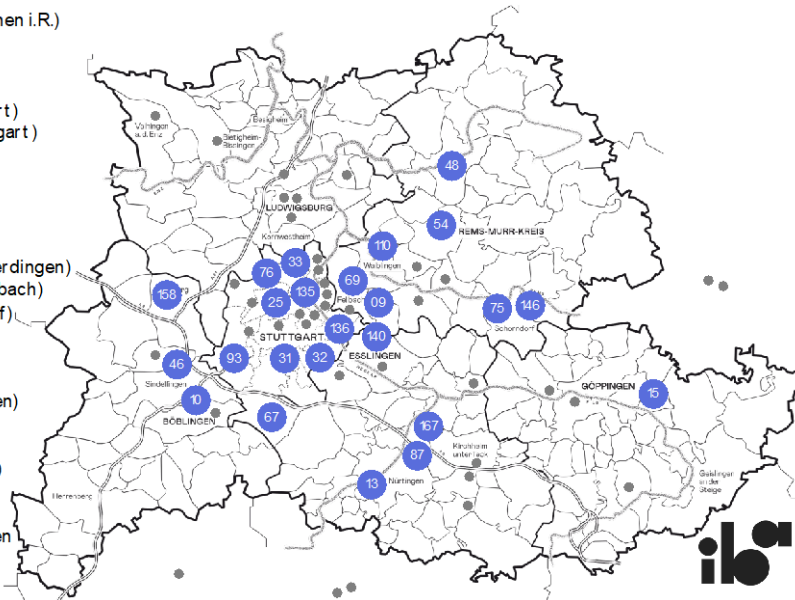


Abb. 5: Karte der derzeit 24 »IBA'27-Projekte« in der Region Stuttgart (Bild: IBA'27)

Das Ausstellungsprogramm für 2027 wird gegen Ende der Laufzeit der IBA'27 aus dem gesamten Portfolio (Projekte und Netz) kuratiert. Bei rund 45 Vorhaben und Projekten sieht die IBA'27 derzeit gutes Potenzial, Teil der Ausstellung zu werden, von großen Quartiersentwicklungen bis zu Einzelgebäuden.

Sie alle entstehen im Kontext globaler Unsicherheiten – und werden Antworten auf die multiplen Krisen unserer Zeit zeigen. Dazu gehören beispielsweise effiziente und lebendige Quartiere für eine Lebenswirklichkeit, in der die Grenzen zwischen Arbeiten und Wohnen zunehmen verschwimmen, vielfältige anpassbare Grundrisse für bezahlbares Wohnen in allen Lebensphasen, einfach, ressourcenschonend und modular konstruierte Häuser mit Materialien aus nachwachsenden Rohstoffen, und sorgfältig gestaltete, grüne öffentliche Räume nach dem Schwammstadt-Prinzip.

Aktuell macht sich die angespannte Situation in der Immobilien- und Bauwirtschaft auch bei der Entwicklung der Vorhaben und Projekt zur IBA bemerkbar. Allerdings sind bislang nur wenige pausiert oder zurückgestellt worden. So werden im Jahr 2027 nach heutigem Stand mindestens 20 Vorhaben und Projekte fertiggestellt sein – zumindest in wesentlichen Teilen. Andere werden im Bau sein und einzelne Häuser zeigen können. Bei wenigen Vorhaben wird der Beitrag zur Ausstellung die Dokumentation guter Prozesse sein, samt Plänen, was nach 2027 kommen wird.

4.1.1 Gemischte Quartiere

Die meisten IBA-Projekte sind große Quartiersentwicklungen – wesentlich mehr, als anfangs erwartet. Diese sind komplex und brauchen Zeit: Die Bebauung von Quartieren mit bis zu 17 Hektar Fläche wie z. B. in Backnang weist weit über den Zeitraum einer IBA hinaus. Einige Quartiere werden zum Ausstellungsjahr voraussichtlich dennoch vollständig realisiert sein, in anderen werden zumindest erste exemplarische Häuser fer-

tiggestellt und zu besichtigen sein. Mit und durch die IBA werden zudem die Grundlagen für die wirtschaftlich, ökologisch und sozial anspruchsvolle Weiterentwicklung dieser Quartiere nach dem Ausstellungsjahr geschaffen. Dazu gehören unter anderem folgende Projekte:

Quartier Böckinger Straße (Stuttgart)

Die SWSG baut im Austausch mit der IBA'27 und der Evangelischen Gesellschaft (eva) ein sozial durchmischtes Stadtquartier mit über 400 Wohnungen. 2027 soll das Quartier fertiggestellt sein. Eine Besonderheit ist u. a. das zentral gelegene »IBA-Haus« als Experimentierfeld für neue Bau- und Wohnformen. Die Visualisierung des Projektes zeigt die Abbildung 6.

<https://www.iba27.de/projekt/quartier-boeckinger-strasse/>



Abb. 6: Visualisierung aus dem IBA'27-Projekt »Quartier Böckinger Straße« Stuttgart (Bild: HildundK, München | Berlin)

Genossenschaftliches Quartier am Rotweg (Stuttgart)

In Stuttgart-Rot entwickeln die Baugenossenschaften Neues Heim und Zuffenhausen gemeinsam mit der IBA'27 ein Quartier, das genossenschaftliches Zusammenleben in die Zukunft führt. Derzeit startet der Rückbau der Bestandsgebäude, 2027 sollen die 10 neuen Gebäude fertiggestellt sein.

<https://www.iba27.de/projekt/quartier-am-rotweg/>

Postareal Böblingen

Anstelle der alten Post direkt am Böblinger Bahnhof entsteht ein Paradebeispiel für die Zukunft städtischer Zentren: Ein Ensemble aus drei großen Gebäuden (darunter ein Holzhochhaus) mit einer Mischung aus Handel, Gastronomie, öffentlichen Einrichtungen, unterschiedlichen Wohnungstypen und begrünten öffentlichen Flächen als Begegnungsorte. Der städtebauliche Vertrag wurde jüngst unterzeichnet und der Bebauungsplan genehmigt. Das Projekt soll bis 2027 in Teilen realisiert sein.

<https://www.iba27.de/projekt/postareal-boeblingen/>

KaepseLE Goldäcker (Leinfelden-Echterdingen)

Am Rand von Echterdingen entwickeln Investor:innen, Stadtverwaltung und Planungsteams in einem besonderen, von der IBA vorgeschlagenen und begleiteten Verfahren ein beispielgebendes Wohngebiet mit bezahlbarem Wohnraum in klimaneutralen Gebäuden. Alle Häuser entstehen in modularer Holzbauweise, auch

Recyclingmaterialien und lokal verfügbare Baustoffe werden eingesetzt. Das Quartier soll 2027 fertiggestellt sein – und nach 15 Jahren CO₂-neutral: in Bau und Betrieb.

<https://www.iba27.de/projekt/kaepsele/>

Wohnen am Fluss in Untertürkheim (Stuttgart)

Gegenüber dem Stuttgarter Inselbad verwandelt die Bietigheimer Wohnbau ein bisher gewerblich genutztes Grundstück in ein lebenswertes Quartier, das Wohnen und Arbeiten am Fluss zusammenbringt. Das Projekt zeigt beispielhaft, wie in einem industriell geprägten Umfeld Lebensraum mit hoher Aufenthaltsqualität entsteht. Rund 140 Wohnungen sind vorgesehen, in den Erdgeschossen sollen Gewerbe und soziale Nutzungen unterkommen. 2027 soll mit dem Umbau eines Bestandsgebäudes der erste Bauabschnitt realisiert sein.

<https://www.iba27.de/projekt/wohnen-am-fluss-in-untertuerkheim/>

Zukunft Münster 2050 (Stuttgart)

Die Baugenossenschaft Münster am Neckar entwickelt mit Unterstützung der IBA'27 ein ambitioniertes sozial und ökologisch nachhaltiges Quartier im Holzbau – ein vorbildliches Projekt mit großen Häusern, die unterschiedliche Wohnformen mit Flächen für die Gemeinschaft ermöglichen (siehe Abbildung 7). Das Projekt wurde in mehrere Bauabschnitte aufgeteilt, was eine Rochade der Bestandsmieter:innen ermöglicht. 2027 wird der erste Bauabschnitt mit rund 55 Wohneinheiten fertiggestellt sein, inkl. Sonderformen wie Pflege-WG, Senioren-WG und Clusterwohnung. Es entstehen insgesamt 195 Wohnungen.

<https://www.iba27.de/projekt/zukunft-muenster-2050/>



Abb. 7: Visualisierung aus dem Entwurf zum IBA'27-Projekt »Zukunft Münster 2050« (Bild: joyjoy studio, Architektur: PPAG architects)

Quartier Neckarspinnerei (Wendlingen)

Gemeinsam mit der IBA transformieren die Besitzer das Gelände einer ehemaligen Spinnerei zu einem gemischten, produktiven Stadtquartier. Hier wird zu besichtigen sein, wie Wohnen, industrielle Produktion und öffentliche Nutzungen zusammenkommen können. Die denkmalgeschützten Bestandsgebäude werden bereits jetzt teilweise umgebaut, erste Nutzer:innen sind schon eingezogen. Im angrenzenden Neubaugebiet sollen bis 2027 zwei bis drei der insgesamt sechs neuen Gebäude fertiggestellt sein.

<https://www.iba27.de/projekt/quartier-neckarspinnerei/>

Quartier Backnang-West

Mit der IBA wurde die Entwicklung der Altindustrieflächen zu einem Prototyp einer gemischten »produktiven Stadt« mit Fabriken, Gewerbeflächen, Wohnungen, Büros, Labors und Freizeitangeboten angestoßen. Die Aufsiedlung des gesamten Areals (siehe Abbildung 8), das ungefähr so groß wie die Backnanger Altstadt ist, wird bis weit in die 2030er-Jahre dauern. Zum Ausstellungsjahr 2027 sollen exemplarisch erste Gebäude fertiggestellt sein, etwa der Umbau und die Aufstockung eines bestehenden Fabrikgebäudes.

<https://www.iba27.de/projekt/quartier-backnang-west/>

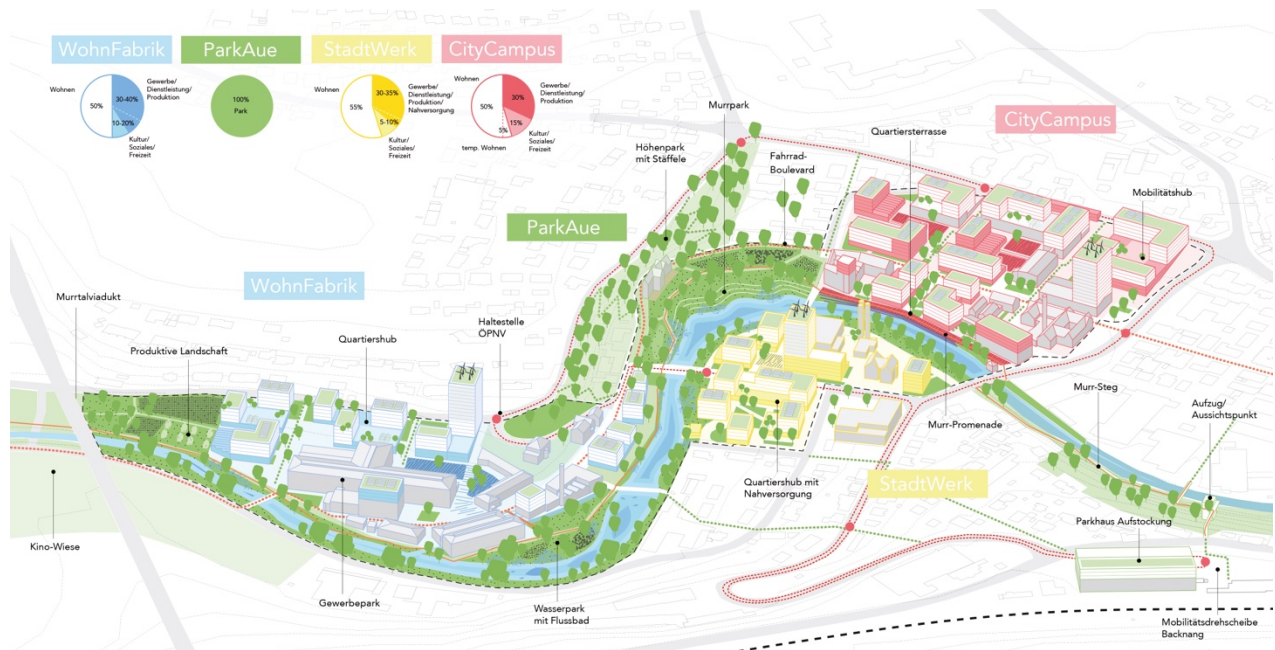


Abb. 8: »Quartier Backnang West«: Strukturplan zum städtebaulichen Entwurf von Teleinternetcafe Architektur und Urbanismus zusammen mit Treibhaus Landschaftsarchitektur (Bild: Teleinternetcafe/Treibhaus)

Quartier der Generationen Schorndorf

Auf dem ehemaligen Betriebsgelände des Bauhofs Schorndorf, direkt an der Rems und fußläufig zur Innenstadt, entsteht ein vorbildhaftes Quartier für Wohnen und Arbeiten, u. a. mit großzügigen Freiflächen, neuen Wohntypologien, nutzungs-offenen Freiräumen, offenen Werkstätten und Gemeinschaftsbüros.

<https://www.iba27.de/projekt/quartier-der-generationen/>

Tobias-Mayer-Quartier (Esslingen)

Im Norden von Esslingen entwickeln die Esslinger Wohnungsbau und die Baugenossenschaft Esslingen zusammen mit einer Wohninitiative ein sozial nachhaltiges Quartier: eine grüne Oase, die mit einem hohen Anteil an bezahlbarem Wohnraum gemeinschaftliches Leben fördert. 2027 sollen die ersten Bauabschnitte fertig sein. Dazu gehören das L-Gebäude sowie das im Wettbewerb als »IBA'27-Experimentierhaus« definierte Kettenhaus, das von der Initiative AIWo (Alternatives Wohnen Esslingen) realisiert wird. Das flexible Holzhaus bietet mit unterschiedlichsten Wohnungsangeboten Raum für viele Formen des Zusammenlebens.

<https://www.iba27.de/projekt/tobias-mayer-quartier/>

Quartiersentwicklung Hangweide (Kernen im Remstal)

Auf dem Areal der ehemaligen Behinderteneinrichtung Hangweide entwickelt die Projektgemeinschaft Hangweide in engem Austausch mit Bürger:innen und IBA'27 ein »urbanes Dorf«, das die Qualitäten städtischer und ländlicher Wohnsituationen vereint: Ein Vorbild, wie ein zukunftsfähiges Quartier im eher ländlich geprägten Umfeld aussehen kann. Vorgesehen sind rund 640 Wohneinheiten für rund 1.300 Menschen. Der Rückbau des Bestands ist fast abgeschlossen und der Beschluss des Bebauungsplans erfolgte Ende 2023. Bis

2027 wollen die Projektpartner mindestens die Quartiersmitte inkl. Infrastruktur und Kita gebaut haben. Insbesondere die Kreisbaugesellschaft Waiblingen hat im Sommer 2023 ein deutliches Signal zur zügigen Umsetzung gesendet:

<https://www.iba27.de/projekt/hangweide/>

AGRICULTURE meets MANUFACTURING (Fellbach)

Das IBA'27-Projekt zeigt exemplarisch, wie bestehende industrielle und landwirtschaftliche Produktion mit »Stadt« zusammenkommen können. Zeitlich weist das Projekt weit über die IBA hinaus, bis zum Ausstellungsjahr werden aber mehrere Bauprojekte und Maßnahmen sichtbar sein, die diese Transformation exemplarisch greifbar machen. Dazu gehört zum Beispiel die Bebauung eines Grundstücks an der Eppingerstraße, die beispielgebend für qualitätsvollen Wohnungsbau in einer heterogenen Umgebung aus Wohn- und Gewerbeflächen sein wird (siehe Abbildung 9).

<https://www.iba27.de/projekt/agriculture-meets-manufacturing/>



Abb. 9: Das Gelände des IBA'27-Projekts »AGRICULTURE meets MANUFACTURING« in Fellbach: 110 Hektar Gewerbe- und Landwirtschaftsflächen (Foto: Stadt Fellbach / NiessnerDesign)

4.1.2 Einzelgebäude

Weissenhof 2027: Besucher- & Informationszentrum (Stuttgart)

Zur Hundertjahrfeier der Weissenhofsiedlung – dem Ausstellungsjahr der IBA – soll im Innenhof der Kunstakademie in direkter Nachbarschaft der Siedlung ein multifunktionales Besucher- und Informationszentrum entstehen. Derzeit läuft das Generalübernehmerverfahren zur Realisierung, bei dem sich Teams aus Architekt:innen und Baufirmen mit innovativen Gestaltungs- und Realisierungskonzepten beworben haben. Mit einer Entscheidung und Beauftragung kann Mitte 2024 gerechnet werden. Die Umsetzung bis 2027 ist zwingend und realistisch.

<https://www.iba27.de/generalubernehmer-verfahren-biz-weissenhof/>

<https://www.iba27.de/aufforderung-zum-experiment/>

Holzparkhaus Schwanenweg Wendlingen

Das konzeptionell und bautechnisch hochinnovative Projekt – einmalig in Europa – ist zurzeit im Bau (siehe Abbildung 10). Die Zukunft ist hier bereits eingebaut: Das Holz kann bei einem Rückbau recycelt und wiederverwendet werden, auch sind künftige Umnutzungsmöglichkeiten bereits bei der Planung berücksichtigt. Fertigstellung und Eröffnung soll im Frühjahr 2024 sein.

<https://www.iba27.de/projekt/holzparkhaus-schwanenweg-wendlingen/>

<https://www.stuttgarter-zeitung.de/inhalt.architektur-rekord-in-wendlingen-das-groesste-holzparkhaus-deutschlands.1a5bfc53-3858-4fa6-8c69-8bc56203196.html>



Abb. 10: Baustelle des Holzparkhaus Schwanenweg in Wendlingen am Neckar im September 2023 (Foto: Achim Birnbaum)

Adaptives Demonstrator-Hochhaus (Stuttgart)

Das Forschungsgebäude ist in Betrieb. Mit ihm wird ausprobiert, wie sich Häuser an ihre Umwelt anpassen können, zum Beispiel in dem sie sich aktiv in den Wind lehnen – dadurch kann in der Konstruktion Material eingespart werden. Außerdem wird das Verhalten von unterschiedlichen, innovativen Fassadenelementen erprobt. Das Projekt stößt durch seine Anschaulichkeit bereits jetzt auf großes Interesse, etwa beim IBA'27-Festival im Sommer 2023.

<https://www.iba27.de/projekt/adaptives-demonstrator-hochhaus/>

4.1.3 Baustellen

Einige Vorhaben werden 2027 komplett im Bau sein; auch sie können Teil der Ausstellung werden: mit Baustellenführungen – zum Beispiel zu neuen Bautechnologien – und mittels Visualisierungen, wie die fertiggestellten Projekte aussehen werden. Ein Beispiel dafür ist das Postareal Leonberg.

Postareal Leonberg

Mitten in Leonberg entsteht ein bautechnisch und energetisch innovatives Quartier. So sollen beispielsweise beim Bau neuartige Konstruktionen und Materialien eingesetzt und auf ihre Marktfähigkeit überprüft werden. Die Gebäude entstehen aus CO₂-reduzierten Materialien, die in einem planungsbegleitenden Monitoring kontinuierlich auf ihr Einsparungspotenzial überprüft werden. Diese und weitere Themen können im Ausstellungsjahr 2027 vor Ort zum Anfassen gezeigt werden.

<https://www.iba27.de/projekt/postareal-leonberg/>

4.1.4 Prozesse & Visionen

Bei einigen Vorhaben ist bereits heute erkennbar, dass 2027 wahrscheinlich noch wenig tatsächlich Gebautes sichtbar sein wird. Mit ihren vorbildlichen Prozessen und konkreten Planungen können sie wertvolle Beiträge zur Ausstellung 2027 leisten, wie bspw. das

Krankenhausareal Sindelfingen

Die durch einen Klinikneubau freifallenden Gebäude aus den 1960er-Jahren (siehe Abbildung 4) sollen zu einem durchmischten Quartier mit Schwerpunkt Wohnen umgebaut werden. Zurzeit läuft der Realisierungswettbewerb in einem besonderen von der IBA'27 vorgeschlagenen und begleiteten Verfahren. Der Baustart ist jedoch abhängig von der Fertigstellung des neuen Klinikstandorts. Dieser ist auf 2025/26 terminiert. Der Umbau einer solchen Gebäude-Großstruktur aus den 1960er-Jahren und der Planungsprozess sind allerdings so vorbildhaft, dass dieses Projekt auch ohne bereits gebaute Anschauungsobjekte einen wertvollen Beitrag zur Ausstellung 2027 leisten kann.

<https://www.iba27.de/projekt/konversion-sindelfinger-krankenhausareal/>

4.1.5 Aus dem Scheitern lernen

Teil der Ausstellung können außerdem einzelne Vorhaben werden, die nicht umgesetzt wurden: Als Lernobjekte, warum aus unterschiedlichsten Gründen die geplanten Vorhaben nicht in dem geplanten Zeitrahmen nicht ansatzweise realisiert werden können.

5 Die IBA'27-Festivals

Die IBA'27-Festivals in den Jahren 2023 und 2025 geben bereits vor dem Ausstellungsjahr 2027 Einblicke in Arbeitsweisen, Projekte und Ideen der IBA. Als interaktive und experimentierfreudige Formate und Feste machen sie Stadtentwicklung als gemeinsamen Prozess in der Region Stuttgart erlebbar. Mit dem überaus erfolgreichen »IBA'27-Festival #1« 2023 hat die Internationale Bauausstellung 2027 Stadtregion Stuttgart bereits vor dem Ausstellungsjahr 2027 Einblicke in die Arbeitsweisen, Projekte und Ideen der IBA geben können. Vier Wochen lang hat die IBA zusammen mit vielen Partnerinnen ein vielseitiges Programm auf die Beine gestellt. Mehr als 120 Veranstaltungen fanden während des Festivalmonats statt. Auf drei Projektbühnen in Backnang, Fellbach und Stuttgart-Rot standen die Themen »Wohnen«, »Bauen« und »Produzieren« bei verschiedensten Aktionen im Mittelpunkt. In der Königstraße mitten in Stuttgart gab es eine Festivalzentrale mit großer Ausstellung, die während der dreimonatigen Laufzeit von rund 9.000 Menschen besucht wurde (siehe Abbildung 11).



Abb. 11: Besuch Ministerpräsident Winfried Kretschmann in der IBA'27-Festivalzentrale im September 2023 (Foto: IBA'27 / Franziska Kraufmann)

6 Autoren

Karin Lang

Geschäftsführung IBA'27
Alexanderstraße 27
70184 Stuttgart
karin.lang@iba27.de

Andreas Hofer

Geschäftsführung IBA'27
Alexanderstraße 27
70184 Stuttgart

Tobias Schiller

Leitung Kommunikation / Pressesprecher
Alexanderstraße 27
70184 Stuttgart

Programm des 20. Symposiums

19. März 2024, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

09:00 Uhr	Anmeldung Kaffee	12:15 Uhr	Mittagspause
09:30 Uhr	Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	13:45 Uhr	Preisverleihung zum 20. Jubiläum des Symposiums Baustoffe und Bauwerkserhaltung
09:45 Uhr	Rezykliertes Material: Die Integration von R-Beton in den neuen Regelwerken Dr.-Ing. Diethelm Bosold InformationsZentrum Beton GmbH	14:00 Uhr	Grußwort des Umweltministeriums Baden-Württemberg StS. Dr. Andre Baumann Umweltministerium Baden-Württemberg
10:15 Uhr	Entwicklungen bei der Aufbereitungstechnik von Altbeton Sebastian Rauscher Heinrich Feess GmbH & Co. KG	14:15 Uhr	Der Einfluss von Recyclingmaterial auf die Eigenschaften von Beton Dr. Jochen Reiners VDZ Technology gGmbH Jan Höffgen Maureen Denu Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
10:45 Uhr	Kaffeepause	14:45 Uhr	Kaffeepause
11:15 Uhr	Rohstoff im Wandel: Verfügbarkeiten und Potenziale mineralischer Sekundärrohstoffe Dr.-Ing. Berthold Schäfer Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.	15:15 Uhr	Praxisbeispiel: Brenner Basistunnel Dipl.-Ing. Roland Murr BBT SE – Brenner Basistunnel
11:45 Uhr	Eine Analyse der CO₂-Beaufschlagung von rezyklierter Gesteinskörnung Das Förderprogramm: Verwaltungsvorschrift R-Beton Baden-Württemberg Johannes Preiß Dr. Daniel Laux Umweltministerium Baden-Württemberg Maureen Denu Jan Höffgen Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Die technischen Umsetzungsmöglichkeiten am Beispiel der Schweiz Reto Märki zirkulit AG	16:00 Uhr	Ausblick: IBA 2027 Karin Lang Internationale Bauausstellung 2027 StadtRegion Stuttgart GmbH (IBA'27)
		16:45 Uhr	Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
		17:00 Uhr	Umtrunk Imbiss

Autorenverzeichnis

20. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen – Von der Ausnahme zur Regelbauweise

Dipl.-Ing. Diethelm Bosold

InformationsZentrum Beton GmbH, Neustraße 1, 59269 Beckum

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Maureen Denu

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Andreas Hofer

Internationale Bauausstellung 2027 StadtRegion Stuttgart GmbH,
Alexanderstraße 27, 70184 Stuttgart

Jan Höffgen

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Karin Lang

Internationale Bauausstellung 2027 StadtRegion Stuttgart GmbH,
Alexanderstraße 27, 70184 Stuttgart

Dr. Daniel Laux

Umweltministerium Baden-Württemberg,
Konrad-Adenauer-Straße 3, 70173 Stuttgart

Reto Märki

zirkulit AG,
Steinackerstraße 56, 8302 Kloten

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Dipl.-Ing. Roland Murr

BBT SE – Brenner Basistunnel,
Amraserstraße 8, A – 6020 Innsbruck

Johannes Preiß

Umweltministerium Baden-Württemberg,
Konrad-Adenauer-Straße 3, 70173 Stuttgart

Sebastian Rauscher

Heinrich Feess GmbH & Co. KG,
Heinkelstraße 2, 73230 Kirchheim/Teck

Dr.-Ing. Jochen Reiners

VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Dr.-Ing. Berthold Schäfer

Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.,
Kochstraße 6, 10969 Berlin

Tobias Schiller

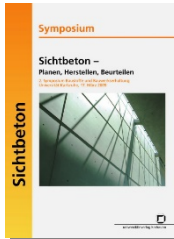
Internationale Bauausstellung 2027 StadtRegion Stuttgart GmbH,
Alexanderstraße 27, 70184 Stuttgart

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2023)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist
ISBN 978-86644-098-2



2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Innovationen in der Betonbautechnik
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-86644-008-1



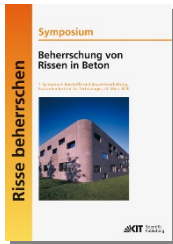
4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Industrieböden aus Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Bearbeitung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-341-9



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Beherrschung von Rissen in Beton

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist

ISBN 978-3-86644-487-4

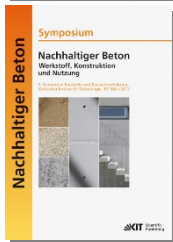


8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischen Angriff

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist

ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer

ISBN 978-3-86644-820-9

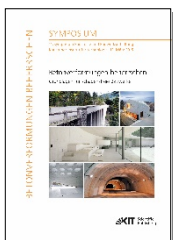


10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und Funktion

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer

ISBN 978-3- 73150-179-4



11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer

ISBN 978-3-7315-0343-9



12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist

ISBN 978-3-7315-0474-0

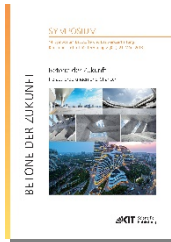


13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

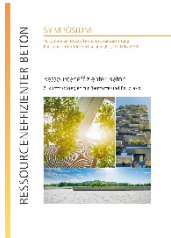
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link

ISBN 978-3-7315-0629-4



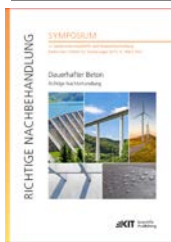
14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link
ISBN 978-3-7315-0767-3



15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0993-6



16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Klima, Risse und Co. – Betonbau im herausfordernden Umfeld
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0994-3



17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton - Richtige Nachbehandlung
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-1073-4



18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
**Gutes Klima für die Zukunft.
Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton**
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-1163-2



19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
**Bauen mit Beton im Kreislauf
Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung**
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-1270-7

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich.

Bereits in den beiden vorherigen Symposien wurde die Verantwortlichkeit der Beton- und Zementindustrie bei der Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen aus verschiedenen Blickwinkeln beleuchtet. Da die Möglichkeiten des Recyclens einen wichtigen Baustein zu einer ressourcenschonenden Betonbauweise darstellen, möchten wir im diesjährigen Symposium daran anschließen. Die Themen konzentrieren sich auf die konkreten Umsetzungsmöglichkeiten beim Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen. Ein Schwerpunkt ist die Etablierung des Bauens mit Recyclingmaterial in den Regelwerken. Wie dieser Weg umgesetzt werden kann oder bereits Anwendung findet, wird im Vordergrund stehen. Zum Auftakt erhalten Sie einen Überblick über die momentan geltenden Regelwerke hinsichtlich rezyklierter Materialien. Nach dieser Einführung präsentiert ein Vertreter aus der Praxis die Entwicklung der Aufbereitungstechnik. Darauf aufbauend lenken wir unseren Fokus auf die Verfügbarkeit von Recyclingmaterial im Markt und das Konzept der CO₂-Beaufschlagung. Der zweite Teil startet mit einem Grußwort des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Im Anschluss erhalten Sie Informationen zu den Eigenschaften der rezyklierten Materialien. Als konkretes Praxisbeispiel wird der Brenner Basistunnel vorgestellt. Den Schlusspunkt der Veranstaltung bildet ein Ausblick auf die IBA 2027.

Schirmherrschaft:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

www.betoninstitut.de
www.beton.org
www.betoningenieure.de

ISBN 978-3-7315-1338-4

