

Alkalisch aktivierte Baustoffe – eine neue Generation zementfreier Bindemittel für Beton

- Marijana Serdar and Antonino Runci, University of Zagreb, Kroatien
Guang Ye, Delft University of Technology, Niederlande
John Provis, University of Sheffield, Großbritannien
Frank Dehn, Karlsruhe Institute of Technology (KIT), Deutschland
Thanasis Triantafillou, University of Patras, Griechenland
Guillaume Habert, ETH Zürich, Schweiz
Stijn Matthys, Ghent University, Gent, Belgien

Es besteht eine klare Forderung nach einer neuen, nachhaltigen Generation von Baustoffen, da Beton auf Basis von Portlandzement nicht alle Herausforderungen der modernen Gesellschaft in Bezug auf Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit bewältigen kann. Das DuRSAAM-Projekt (Durable, Reliable, Sustainable, Alkali-Activated Materials) geht dies durch die Einrichtung eines Schulungs- und Forschungsnetzwerks an, das zu einer nachhaltigen Bauindustrie beiträgt und das sich auf Verwendung alkalisch aktivierter Baustoffe als neue Generation von zementfreien Bindemitteln für Beton konzentriert.

Der erste Teil dieser Publikation, der in BWI 2/2021 veröffentlicht wurde, befasste sich mit den Hintergründen alkalisch-aktivierter Materialien (AAMs) und einem kurzen Industrieüberblick. Im vorliegenden Teil 2 werden Betonmischungszusammensetzungen, Frisch- und Festbetoneigenschaften, sowie Aspekte der Lebenszyklusanalyse diskutiert.

Mischzusammensetzung und Rheologie

Die Mischungsentwürfe stellen eines der größten Probleme des Standardisierungsprozesses von AAMs dar. Der Grund dafür ist die Tatsache, dass es unter dem Namen AAM zahlreiche mögliche Materialkombinationen und Mischzusammensetzungen gibt, die folglich unterschiedliche Leistungsmerkmale aufweisen. Es gibt viele Faktoren, die die Systeme beeinflussen, und die Wahl der richtigen Zusammensetzung basiert oft auf empirischen Studien. Aufgrund der Vielzahl möglicher chemischer und physikalischer Eigenschaften der Ausgangsstoffe wird die Entwicklung eines allgemeinen Konzepts zum Mischungsentwurf von AAMs erschwert. Li et al. [1] sammelten viele Beispiele für Verfahren, mittels derer sich die Mischzusammensetzung auf Grundlage spezifischer Parameter, Leistungsanforderungen oder statistischen Modellen ermitteln lässt. Duxon und Provis [2] entwickelten eine Reihe von Mischungen für Aluminosilikat-Bindemittel auf

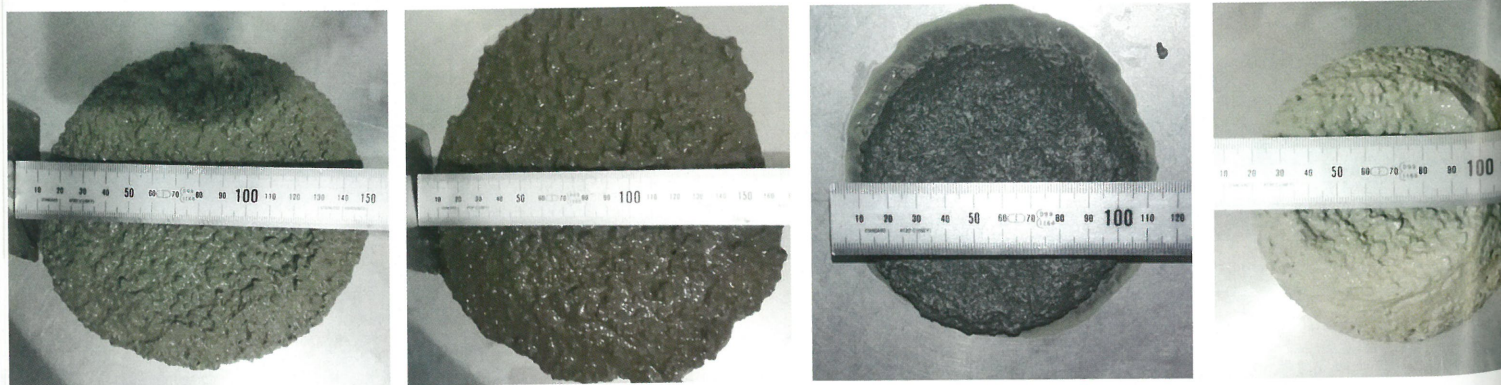


Abb. 1: Referenzmischungen auf Basis von: Portlandzement, alkalisch aktivierter Flugasche, alkalisch-aktiviertem Hüttensand, und alkalisch aktiviertem Silikafeinstaub [4]



■ Marijana Serdar, PhD, ist Assistant Professor am Institut für Baustoffkunde, Fakultät für Bauingenieurwesen, an der Universität Zagreb in Kroatien. marijana.serdar@grad.unizg.hr



■ Antonino Runci, MSc, promoviert im Rahmen des DuRSAAM Projekts an der Fakultät für Bauingenieurwesen an der Universität Zagreb in Kroatien. antonino.runci@grad.unizg.hr



■ Guang Ye, PhD, ist Associate Professor am Institut für Baustoffkunde und Umwelttechnik an der TU Delft in den Niederlanden und Vorsitzender der dortigen Forschungsgruppe Betonmodellierung und Materialverhalten. g.ye@tudelft.nl



■ John Provis, PhD ist Professor für Zement- und Baustoffkunde und stellvertretender Leiter der Abteilung Materialkunde und Ingenieurwissenschaften an der University of Sheffield, Großbritannien. j.provis@sheffield.ac.uk



■ Frank Dehn, Dr.-Ing., ist Professor für Baustofftechnologie und Leiter des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustoffe und Betonbau (IMB), sowie Direktor der Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe (MPA Karlsruhe) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT). frank.dehn@kit.edu



■ Thanasis Triantafillou, PhD, ist Professor und Leiter der Abteilung Bauingenieurwesen an der University of Patras und Direktor des Structural Materials Laboratory, sowie Visiting Global Distinguished Professor an der New York University in Abu Dhabi. ttriant@upatras.gr



■ Guillaume Habert, PhD, hat den Lehrstuhl für Nachhaltiges Bauen inne und ist Associate Professor an der ETH Zürich. habert@ibi.baug.ethz.ch



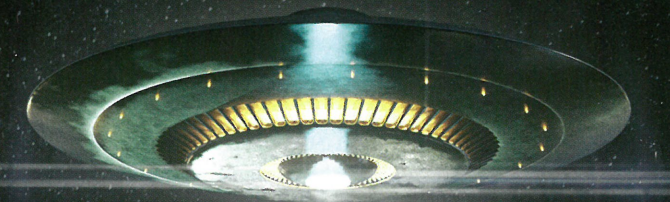
■ Stijn Matthys, PhD, ist Professor für Bauwerkssanierung an der Universität Gent, Magnel-Vandepitte Laboratory for Structural Engineering and Building Materials, Belgien. stijn.matthys@ugent.be

Basis netzwerkmodifizierender Kationen (insbesondere Calcium, Magnesium, Natrium und Kalium), die eine ausreichend hohe Löslichkeit bieten, um das notwendige Aluminium für das wachsende Geopolymer-Gel bereitzustellen.

Im Rahmen des DuRSAAM-Projekts werden modernste Mischungsentwürfe für Betone mit alkalisch aktivierten Bindemitteln als Ausgangslage dafür verwendet, die Entwicklung und Optimierung neuer Mischungen und die detailliertere Untersuchung der rheologischen Eigenschaften durchzuführen. DuRSAAM-Referenzmischungen wurden aus dem RILEM TC 247-DTA „Durability Testing of Alkali-Activated Materials“ [3] übernommen. Innerhalb dieses technischen RILEM Komitees wurden verschiedene alkalisch-aktivierte Betonmischungen mit dem Ziel entwickelt, die Herstellung von Betonen mit unterschiedlichen Leistungseigenschaften zu ermöglichen.



TECHNOLOGIE SO EFFIZIENT,
dass sie jeder haben will!



DER PPM PLANETENMISCHER

Unabhängig voneinander stufenlos regelbare Drehzahlen von Rotor und Wirbler, sind die Garantien für ein nahezu perfektes Mischergebnis und wegweisend für die Mischtechnologie der Zukunft. Auch als Kompakt-Version erhältlich.

Basierend auf diesen Referenzmischungen werden DuRSAAM-Mischungen mit lokal verfügbaren Rohstoffen für spezifische konstruktive und nicht-konstruktive Anwendungen optimiert.

Dauerhaftigkeit

AAMs haben im Vergleich zu Portlandzement (OPC) unterschiedliche physikalische (Porenstruktur, Tortuosität der Poren) und chemische Eigenschaften (pH-Wert und chemische Zusammensetzung der Porenlösung, Zusammensetzung von Hydratationsprodukten). Die Dauerhaftigkeit stellt bisher eines der großen Probleme bei der Anwendung von AAMs dar, da sich die Mechanismen, die zu einem Verlust der Dauerhaftigkeit von AAMs führen von den für Portlandzementbeton bekannten Mechanismen unterscheiden und noch weiter erforscht werden müssen. Darüber hinaus sind Prüfverfahren für die meisten Dauerhaftigkeitseigenschaften nicht standardisiert oder für AAMs validiert, und einige der Anforderungen, die in den geltenden Normen für Beton vorgeschrieben sind, entsprechen nicht den grundlegenden Kenntnissen zu den eigentlichen Schadensbildungen im Beton. Um die Eignung von AAMs als nachhaltige Baustoffe zu bestätigen, müssen ihre Dauerhaftigkeitseigenschaften und Degradierungsmechanismen verstanden werden. Dieses Thema wird daher im DuRSAAM-Projekt behandelt.

Insbesondere zielen DuRSAAM-Projekte darauf ab, sowohl analytische (experimentelle), als auch konzeptionelle (Modellierungs-)Ansätze zur AAM-Dauerhaftigkeit über den aktuellen Stand der Technik hinaus voranzutreiben und neue Kenntnisse und Entwurfsmethoden in theoretisch fundierter Weise zu generieren. Folgende Aspekte der AAM-Dauerhaftigkeit werden im DuRSAAM-Projekt im Detail behandelt:

- Karbonatisierung - Karbonatisierung der Porenlösung, Entkalkung der calciumreichen Phasen und Karbonatisierung von sekundären Reaktionsprodukten.

- Korrosion von Stahl - die Fähigkeit von optimierten AAMs, eine stabile chemische Umgebung für die Bildung des passiven Films auf der Stahloberfläche zu schaffen, und die physikalische Fähigkeit von AAMs, eine Barriere zu bilden, die dem Eindringen von Chloriden, Wasser und Sauerstoff zur Oberfläche des Stahls entgegenwirkt.
- Frost-Tau-Widerstand - Frost-Tau-Schäden, mit und ohne Tausalzeinwirkung, kombiniert mit konstruktiver Belastung.
- Volumenstabilität - frühes Schwinden, Trocknungs- und Karbonatisierungsschwinden sowie Kriechverformungen.

Vorhersage des Langzeitverhaltens

Ergänzend zu einer umfangreichen experimentellen Untersuchung kann das Langzeitverhalten von AAMs und AAM-basierten Bauwerken mittels numerischer Simulationen und Modellierungen ermittelt werden. Dies ist jedoch keine leichte Aufgabe, da zuverlässige Dauerhaftigkeitsvorhersagen Kenntnisse der mikrostrukturellen Veränderungen im Beton erfordern - ein Forschungsbereich, der in letzter Zeit Aufmerksamkeit auch für OPC-basierten Beton erhalten hat [7]. Bei der Multi-Scale-Modellierung von AAMs besteht die größte Herausforderung darin, eine realistische AAM-Struktur in verschiedenen Maßstäben zu erstellen und die Baustoffeigenschaften und Leistungsfähigkeit von einem niedrigeren Maßstab hin zu bautechnischen Anwendungen zu skalieren.

Im Rahmen des DuRSAAM-Projekts liegt der Schwerpunkt auf der Erstellung der Grundlage für die Modellierung des Geopolymerisationsreaktionsprozesses und der mikrostrukturellen Bildung der alkaliaktivierten Bindemittelmatrix. Das Ergebnis der Modellierung besteht in der Beschreibung der chemischen Eigenschaften der Porenlösung, des Volumensanteils der Reaktionsprodukte und der Kapillarporenstruktur

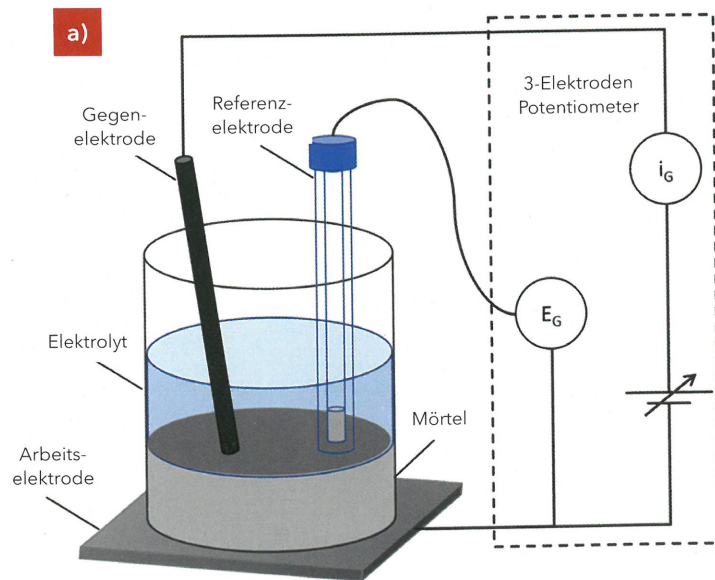
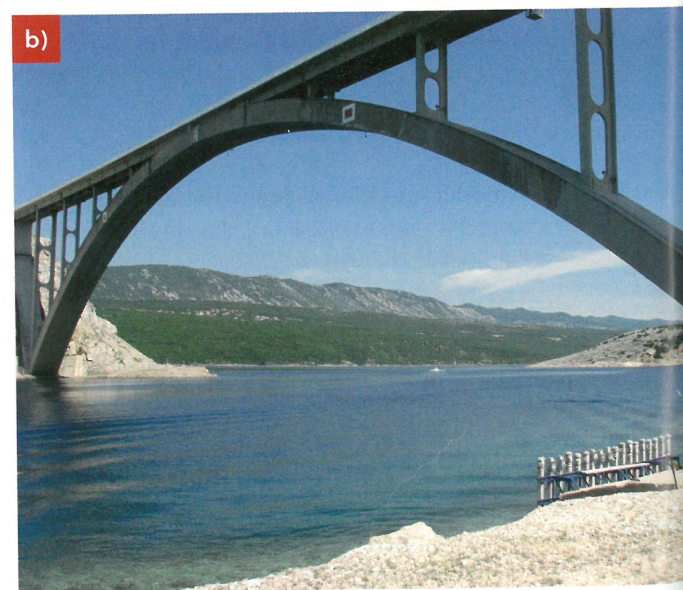


Abb 2: a) Aufbau zur experimentellen Untersuchung der Bewehrungskorrosion in AAM-Beton [5], b) Auslagerung von auf AAM-basierenden Betonelementen in Echtgröße in maritimer Umgebung unter der Krk Brücke in Kroatien [6]



Lebensdauerberechnung und Dauerhaftigkeitsvorhersage von Beton

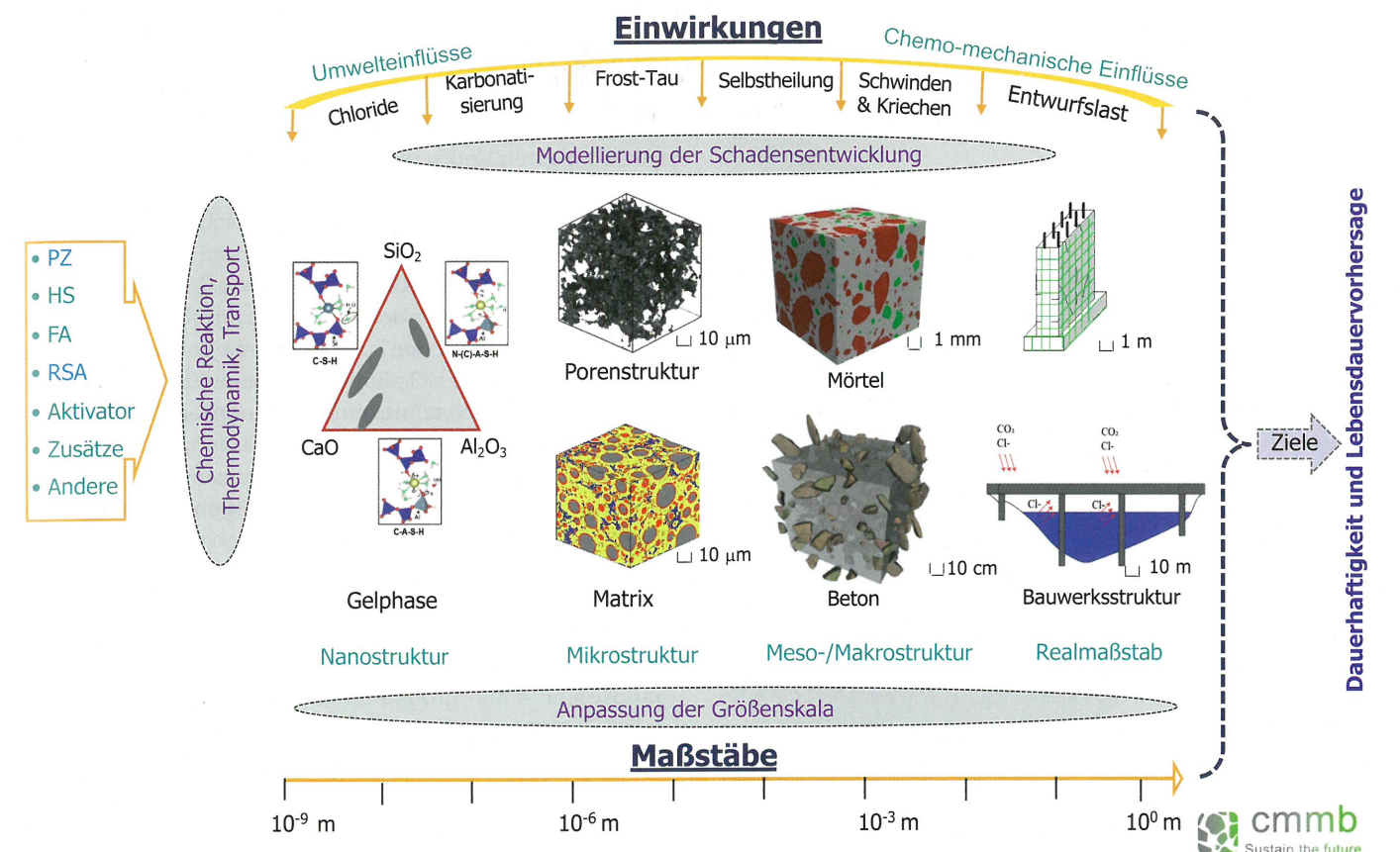


Abb. 3: Grundlage für die Multi-Scale-Modellierung von AAM-Beton (PZ = Portland-Zement, HS = Hüttensand, FA = Flugasche, RSA = Reisschalenasche)

Optimieren Sie Ihre Betonwarenherstellung

Leistungsstarke Produktsysteme und jahrzehntelange Erfahrung in Verbindung mit individueller Beratung und umfassendem technischen Support vor Ort. Überzeugen Sie sich von unserem Gesamtpaket aus weltweit bewährten bauchemischen Lösungen und kompetentem Service. Wir bringen Ihre Betonwaren in Bestform.

EXPERTISE
ADMIXTURES & ADDITIVES

MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG · Am Kruppwald 1-8 · 46238 Bottrop · Tel. +49 2041 101-50 · CI@mc-bauchemie.de · mc-bauchemie.de



In Bestform.

der alkaliaktivierten Bindemittelmatrix. Die Ergebnisse der Modellierung werden zusammen mit den Informationen über Schadensmechanismen durch Umwelteinwirkungen, auch in Kombination mit konstruktiver Belastung, die Grundlage für die Lebensdauervorhersage von AAM-basiertem Beton bilden. Im Gegenzug lassen sich daraus Leitlinien für die Wahl der Ausgangsstoffe und Materialzusammensetzung ableiten, mit der sich die geforderte Lebensdauer von Betonkonstruktionen unter den vorherrschenden Betriebsbedingungen erreichen lässt.

Konstruktive Anwendungen

Neben geringeren CO₂-Emissionen stellen alkaliaktivierte Materialien aufgrund ihrer hohen Leistung, bzw. ihren auf spezifische Anwendungen zuschneidbaren Leistungseigenschaften, ein mögliches alternatives Bindemittel zu gewöhnlichem Portlandzement dar. Die frühesten bekannten Anwendungen von alkaliaktivierten Betonen stammen aus den 1950er Jahren, und diese Bauwerke bestätigen die hohe Leistungsfähigkeit von AAMs sowie ihre Dauerhaftigkeit und ihren Widerstand gegen chemische Einflüsse [7]. In China kam vor kurzem alkaliaktivierter Beton mit Hüttensand zum Einsatz. Im November 2013 begann der Bau des CRICS (Chongqing Research Institute of Construction Science) Bürogebäudes im Yuzhong District, Chongqing. Dieses Projekt stellt die erste konstruktive Anwendung von alkaliaktiviertem, hüttensandhaltigem Beton als Ortbeton in China dar [8]. Hierbei wurden 550 m³ AAM-Beton für die Konstruktion des Tragwerks des dreistöckigen Gebäudes verwendet.

Im Rahmen des DuRSAAM-Projekts liegt der Schwerpunkt auf der Entwicklung mehrerer spezifischer Produkte für die konstruktive Anwendung von AAM. Dies betrifft unter anderem AAM-Transportbeton, Fertigteile aus AAM-Beton, AAM-basierte Sanierungsmörtel für konstruktive Reparaturarbeiten,



Abb. 4: Entwicklung von auf AAM basierendem Textilbeton für die konstruktive Sanierung von Beton (Foto bereitgestellt von A. Arce) [9]

sowie vorgefertigte Mischungen von FRHPC (faserbewehrter Hochleistungsbeton). Der Schwerpunkt des Projekts liegt auf der Entwicklung und Optimierung dieser Baustoffe, die dann von der Industrie übernommen und angewendet werden können.

Lebenszyklusanalyse

Das „grüne Profil“ von Bauwerken aus AAM-Beton ist eines der wichtigsten Verkaufsargumente dieses neuartigen Baustoffes. Aus diesem Grund ist eine gründliche Bewertung der Nachhaltigkeitseigenschaften dieser Bauwerke im Vergleich zu Bauwerken aus herkömmlichem OPC-basiertem Beton von größter Bedeutung. Die mit der Verwendung von AAM-Beton assoziierten Umweltvorteile ergeben sich aus der Verringerung der mit der Produktion von Zementklinker zusammenhängenden CO₂-Emissionen (um 60-80 % [10]) und der verringerten Nutzung nicht erneuerbarer Ressourcen unter gleichzeitiger Verwendung von Nebenprodukten oder Abfallstoffen, die ansonsten für die Lagerung auf Deponien bestimmt wären. Die Umweltauswirkungen von Ausgangsstoffen für AAM-Betone sind hauptsächlich mit der Lagerung und dem Transport dieser Materialien und auch mit den Vorbehandlungsprozessen verbunden. Die Aktivatoren gelten als Hauptverursacher der gesamten Umweltauswirkungen von AAM-Beton. Bei Aktivatoren hat die Variabilität der Ausgangsdaten einen großen Einfluss auf die endgültigen Ergebnisse der Lebenszyklusanalyse (LCA, Life Cycle Analysis).

Das DuRSAAM-Projekt konzentriert sich auf die Entwicklung eines Lebenszyklusanalyse-Frameworks für AAM-basierte Bauwerke, einschließlich der zugehörigen Entwurfsansätze und LCA-Modelle, sowie Bestandsdaten für AAM-basierte Bauwerke. Ziel der LCA ist es, Nachhaltigkeits-Entwurfsrichtlinien zu erarbeiten, die die Einführung von AAM-Beton in die Bauindustrie erleichtern würden. Unter Verwendung von LCA und der Analyse des Materialflusses (MFA) wird eine Kosten-Nutzen-Bewertung durchgeführt, mit der die vielversprechendsten Kreislaufwirtschaftsmodelle identifiziert werden.

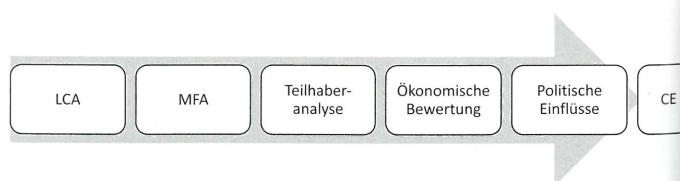


Abb. 5: Entwicklung des vielversprechendsten Modells zur Kreislaufwirtschaft für Bauwerke aus AAM-Beton [11]

Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen des DuRSAAM-Projekts werden Lösungen für die Entwicklung und Anwendung von alkali-aktiviertem Beton erarbeitet. Das Projekt wird von einer Gruppe aus 13 Nachwuchswissenschaftlern bearbeitet, die sich jeweils im Detail auf einen spezifischen Aspekt von AAM konzentrieren, im Ganzen aber eng zusammenarbeiten, um sicherzustellen,

dass das erarbeitete Fachwissen ein Industrie-relevantes und kohärentes Gesamtbild ergibt. Wesentliche Leistungsmerkmale des Projekts liegen in der starken Basis, die auf dem Grundwissen der akademischen Mentoren aufbaut, der Erfahrung von industriellen Mentoren und der Motivation der Nachwuchswissenschaftler.

Danksagungen

Das DuRSAAM-Projekt wurde aus dem Forschungs- und Innovationsprogramm Horizont 2020 der Europäischen Union im Rahmen der Finanzhilfvereinbarung Nr. 813596 gefördert. Den DuRSAAM Doktoranden wird für ihre Forschungstätigkeiten, die den Kern der DuRSAAM-Aktion bilden, gedankt. Den DuRSAAM-Partnerorganisationen - ArcelorMittal, Argos, Aurubis, Bekaert, die Stadt Gent, die Stadt Rotterdam, CRH, CWare, FDN, Gradmont, LafargeHolcim, die Behörde für öffentliche Bauvorhaben in Flandern, Owens Corning, ResourceFull, Sanacon und Tepikat wird für ihr ehrgeiziges Engagement für nachhaltige Ansätze in der Bauindustrie saluiert und für ihre Unterstützung bei DuRSAM gedankt. ■

Literatur

- [1] Li, N.; Shi, C.; Zhang, Z.; Wang, H.; Liu, Y., "A review on mixture design methods for geopolymers concrete," Construction and Building Materials, vol. 84, no. September 2015, pp. 387-398.
- [2] Duxson, P.; Provis, J.; Lukey, G.; Mallicoat, S.; Kriven, W.; van Deventer, J., "Understanding the relationship between geopolymer composition, microstructure and mechanical properties," Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, vol. 269, 2005, no. 1-3, pp. 47-58.
- [3] Provis, J.; Arbi, K.; Bernal, S.A.; Bondar, D.; Buchwald, A.; Castel, A.; Chithiraputhiran, S.; Cyr, M.; Dehghan, A.; Dombrowski-Daube, K.; Dubey, A.; Ducman, V.; Gluth, G.; Nanukuttan, S.; Peterson, K.; Puer-tas, F. van Riessen, A., Torres-Carrasco, M.; Ye, G.; Zuo, Y., "RILEM TC 247-DTA round robin test: mix design and reproducibility of compressive strength of alkali-activated concretes", Materials and Structures (2019) 52:99
- [4] Runci, A., Chloride ingress and corrosion of steel, DuRSAAM project, Karlsruhe meeting, Germany, 2020.
- [5] Runci, A.; Provis, J.; Serdar, M. Comparison of chloride-induced corrosion of steel in cement mortar and mortar based on alkali-activated fly ash, 3rd RILEM Spring Convention 2020 Ambitioning a sustainable future for built environment: Comprehensive strategies for unprecedented challenges, Guimarães, Portugal, 2020.
- [6] Serdar, M.; Bjegović, D., "Performance of concrete reinforced with corrosion resistant steels exposed to real marine environment", Proceeding MTECH 2017, Zagreb, 2017.
- [7] Palomo, A., Krivenko, P., Garcia-Lodeiro, I., Kavalero, A., Maltseva, O., Fernández-Jiménez, A., A review on alkaline activation: new analytical perspectives, Materiales de Construcción, Vol 64, No 315 (2014)
- [8] Yang, K.; Yang, C.; Zhang, J.; Pan, Q.; Yu, L.; Bai, Y. (2018): First structural use of site-cast, alkali-activated slag concrete in China. In: Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings 171 (10), S. 800-809. DOI: 10.1680/jstbu.16.00193.
- [9] Arce, A. Fire behaviour of AAMs, DuRSAAM project, Karlsruhe meeting, Germany, 2020.
- [10] Mclellan, B., Williams, R., Lay, J., Riessen, A., Corder, G. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary portland cement, Journal of Cleaner Production, 2011, 19, 1080-1090.
- [11] Komkova, A. Sustainability Assessment of AAM Structures in the Context of a Circular Economy, DuRSAAM project, Karlsruhe meeting, Germany, 2020.



Innovative Lösungen für Vorreiter und Vordenker

WIR SIND WETCAST-EXPERTEN.

Unsere Produktionssysteme liefern qualitativ hochwertige Steinfurnier- und Betonplatten, Stufen, Randsteine, alternative Mauersteine und vieles mehr.



ÜBERZEUGEN SIE SICH SELBST, WIE WIR HOCHMODERNEN PRODUKTIONSSYSTEME SPEZIELL AUF DIE BEDÜRFNISSE JEDES KUNDEN ZUSCHNEIDEN.

