

# Leicht bauen mit Beton – ausgewählte Forschungsarbeiten des ILEK

## Teil 1: Materialleichtbau

Seit mehr als 20 Jahren beschäftigt sich das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK) der Universität Stuttgart in interdisziplinären Forschungsarbeiten mit dem scheinbaren Paradoxon „Leicht bauen mit Beton“. In einem zweiteiligen Beitrag werden nun Auszüge aus der aktuellen Forschung des ILEK zu diesem Thema vorgestellt. Der erste Teil betrachtet die Entwicklungen auf der Materialebene (Materialleichtbau). Hier geht es um das Ziel der Reduktion der Verwendung von primären Ressourcen, der materialbedingten Emissionen und des Abfalls in den verschiedenen Nutzungsphasen eines Bauwerks. Zu den hier vorgestellten Entwicklungen gehören: die Substitution der natürlichen Gesteinskörnung mit Rezyklaten, biomineralisiertes Calciumcarbonat als innovativer Ersatz für Portlandzement, Basaltfaserverbundbewehrungen als Alternative zum konventionellen Beton- und Spannstahl sowie rezyklierbare Sandschalungen zur abfallfreien Herstellung leichter Betonstrukturen.

**Stichworte** Leichtbau mit Beton; Materialleichtbau; Gradientenbeton; Biobeton; Recyclingbeton; Basaltbewehrung; rezyklierbare Sandschalung

### 1 Einleitung

Übergeordnetes Ziel der Forschungsarbeiten am ILEK (Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren) der Universität Stuttgart ist es, einen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit in der gebauten Umwelt zu leisten. Globale Herausforderungen wie Ressourcenschwund und Klimawandel werden hierfür im Kontext des Bauwesens adressiert. Das Bauwesen ist nach aktueller Analyse für mehr als 60% des weltweiten Ressourcenverbrauchs, mehr als 50% der Treibhausgasemissionen und mehr als 50% des Müllaufkommens verantwortlich [1]. Diese Zahlen machen deutlich, welche Verantwortung für unseren Planeten ebenso wie für kommende Generationen alle Bau-schaffenden haben – und welche Hebelwirkung im Bauwesen erzielt werden kann. Vor diesem Hintergrund streben die Mitarbeitenden des ILEK bei allen ihren Forschungsarbeiten und Entwicklungen eine deutliche Reduktion der Verwendung von primären Ressourcen, der Erzeugung von klimaschädlichen Emissionen und der Entstehung von Abfall an. Diese Prämisse vereint alle Forschenden am ILEK unter einem gemeinsamen übergeordneten Ziel. Je nach Thema werden hierbei Partner aus anderen Instituten zu einer interdisziplinären Bearbeitung von speziellen Fragestellungen hinzugezogen.

Die Minimierung der für eine Struktur verwendeten Ressourcen ist zentrales Anliegen des Leichtbaus. Diese

### Extended lightweight construction – Part 1: Lightweight materials

For more than 20 years, the Institute for Lightweight Structures and Conceptual Design (ILEK) has been engaged in interdisciplinary research on the supposed paradox of “lightweight construction with concrete”. Excerpts from the current research are now presented in a two-part article. This first part considers developments at the material level (lightweight materials) with the aim of minimizing use of primary resources, material-related emissions, and waste in different phases of building life cycle. These include: the substitution of natural aggregates with recycled ones, biomineralized calcium carbonate as an innovative substitute for cement, basalt fiber composite reinforcement as an alternative to conventional reinforcing and prestressing steel, and recyclable sand formworks for zero-waste production of lightweight concrete structures.

**Keywords** lightweight concrete construction; lightweight materials; recycled aggregate concrete; basalt reinforcement; bio-concrete; recyclable sand formwork

Suche nach dem Optimum der Reduktion hat am ILEK eine sehr lange Tradition. Aktuelle Arbeiten des Instituts bauen auf den bahnbrechenden Leistungen berühmter Persönlichkeiten wie Fritz Leonhardt, Frei Otto, Jörg Schlaich und Werner Sobek auf [2]. Die genannten Personen haben auf unterschiedlichste Weise demonstriert, wie stark wir den Ressourcenverbrauch unserer Bauwerke reduzieren können, wenn wir mit Mut, Neugier und Kreativität neue Wege einschlagen.

In der werkstoff- und disziplinenübergreifenden Leichtbauforschung des ILEK spielt der Werkstoff Beton eine besonders wichtige Rolle. Dies hat zum einen historische Gründe [2]; zum anderen resultiert es fast schon zwangsläufig aus der Bedeutung dieses Jahrhundertwerkstoffs für Ressourcenverbrauch, Emissionen und Abfallerzeugung des globalen Bauwesens. Die Schnittstelle zwischen Beton und Leichtbau steht deshalb im Fokus dieses Aufsatzes.

Der vorliegende Beitrag zeigt anhand aktueller Forschungsvorhaben des ILEK (Bild 1), wie wir künftig anders und nachhaltiger mit Beton bauen können. Angesichts der Fülle der zu betrachtenden Inhalte ist dieser Beitrag in zwei Teile untergliedert: Der erste Teil widmet sich dem *Materialleichtbau* mit Beton, während sich der zweite Teil auf den *Strukturleichtbau* fokussiert. Diese beiden Hauptüberschriften beziehen sich auf die Unter-



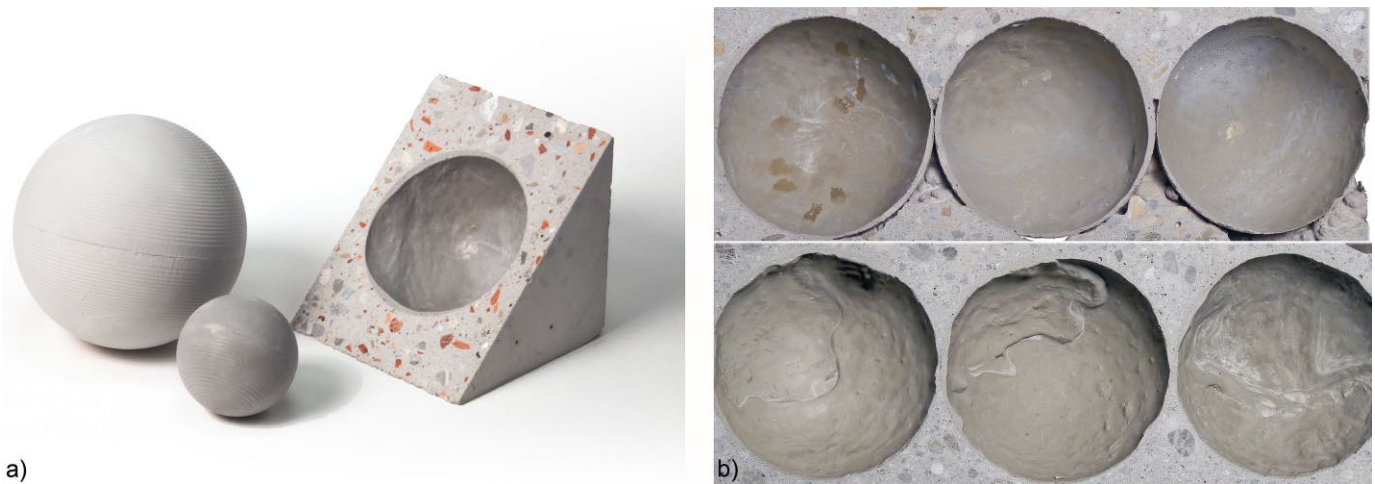
**Bild 1** Materialbeispiele und ihre Hauptbestandteile, v.l.n.r.: Betonwürfel mit rezyklierter Gesteinskörnung, Würfel aus Biobeton, Betonwürfel mit Basaltbewehrung, in wasserlösliche Sandschalung gegossener Betonwürfel  
 Material examples and their main constituents, from left to right: concrete cubes with recycled aggregates, cube made of bio-concrete, concrete cube with basalt reinforcement, cube with concrete cast into water-soluble sand formwork

teilung des Leichtbaus durch Werner Sobek in drei unterschiedliche Kategorien [3, 4]. Diese drei Kategorien hat er wie folgt definiert: „Unter *Materialleichtbau* versteht man die Verwendung von Baustoffen mit einem günstigen Verhältnis von spezifischem Gewicht zur ausnutzbaren Festigkeit, zur ausnutzbaren Dehnung, zur ausnutzbaren Steifigkeit, etc. (...) Der *Strukturleichtbau* [stellt] die Aufgabe, ein gegebenes Beanspruchungskollektiv mit einem Minimum an Eigengewicht der Konstruktion unter Einhaltung einer Reihe vorgegebener Restriktionen zu gegebenen Auflagerpunkten zu leiten“ [4]. Bei der dritten grundlegenden Kategorie des Leichtbaus, dem *Systemleichtbau*, geht es laut Werner Sobek darum, „in einem Bauteil neben der lastabtragenden auch noch andere, wie zum Beispiel raumabschließende, speichernde, dämmende oder vergleichbare Funktionen zu vereinigen“ [4]. Der Systemleichtbau mit Beton soll aufgrund der Vielzahl der hier zu berücksichtigenden Aspekte in einem späteren Aufsatz vorgestellt werden. Der vorliegende Beitrag konzentriert sich aufgrund der Fülle der zu betrachtenden Forschungen auf die Kategorien *Materialleichtbau* und *Strukturleichtbau*.

Bevor die aktuellen Arbeiten des ILEK im Einzelnen vorgestellt werden, soll hier noch einführend eine Definition des erweiterten Leichtbaubegriffs vorgenommen werden, wie ihn Lucio Blandini seit 2020 als neuer Leiter des ILEK vertritt. Der Leichtbau strebt „per definitionem“ einen sparsamen Umgang mit Ressourcen an. Er kann dadurch einen wichtigen Beitrag zu mehr Nachhaltigkeit im Bauwesen leisten. Angesichts des Umfangs der globalen Herausforderungen Klimawandel und Ressourcenschwund müssen wir die Anforderungen an den Leichtbau aber erweitern. Künftig muss der Leichtbau auch den ökologischen Fußabdruck von Materialien und Konstruk-

tionen berücksichtigen, der über deren gesamten Nutzungszklus anfällt. Nur so wird es möglich, eine ganzheitliche Bewertung neuer Forschungsansätze abzugeben und bestimmte Schwerpunkte gezielt zu priorisieren, um die erforderliche radikale Transformation des Bauwesens in der Kürze der uns verbleibenden Zeit zu ermöglichen. Vor diesem Hintergrund wird klar, dass sich der Leichtbau nicht mehr nur mit einer Reduktion der verwendeten Materialien bzw. der Verwendung von Materialien mit möglichst günstigem spezifischem Gewicht begnügen kann. Ein erweiterter Leichtbau-Begriff, der den Anforderungen unserer Zeit gerecht werden möchte, muss auch hinterfragen, welche Umweltschädigungen und Emissionen jeweils mit den verwendeten Materialien und Lösungen verbunden sind [5] und ob bzw. wie die verbauten Komponenten und Materialien wiederverwendet bzw. in technische oder biologische Kreisläufe zurückgeführt werden können. Im Folgenden werden deshalb exemplarisch ausgewählte Forschungsarbeiten des ILEK im Bereich des Betons vorgestellt, bei denen der erweiterte Leichtbau-Begriff konzeptionell zugrunde gelegt wurde.

Zu den Projekten, die im Bereich „*Materialleichtbau*“ vorgestellt werden, gehört die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen ebenso wie die Suche nach alternativen, CO<sub>2</sub>-absorbierenden Bindemitteln, die anstelle von Zement eingesetzt werden können. Mineralische Bewehrungen aus Basaltfasern zeigen, wie das „global warming potential“ des bewehrten Betons weiter reduziert werden kann. Innovative Ansätze für die Schalung von filigranen bzw. porösen Betonsystemen demonstrieren zudem, wie massive Bauteile durch deutlich optimierte Systeme ersetzt werden können und wie die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft Anwendung finden können. Die hier vorgestellten Ansätze sind ein möglicher Beitrag zur



**Bild 2** a) Ausschnitt eines gradierten Bauteils unter Verwendung einer Betonrezeptur mit rezyklierter Gesteinskörnung, b) Gegenüberstellung der Auswirkung einer Betonmischung mit 16 mm Größtkorn in gradierten Bauteilen; oben: ohne optimierte Betonrezeptur; unten: mit optimierter Betonrezeptur bei gleichbleibenden Ausgangsstoffen  
a) Cutout of a functionally graded concrete component using a concrete mixture with recycled aggregates, b) comparison of the effect of a concrete mixture with 16 mm maximum grain size in functionally graded concrete components; top: without optimized concrete mixture; bottom: optimized concrete mixture with unchanged base materials

dringend benötigten Minderung des Ressourcenverbrauchs, der Emissionen und des Abfalls, die durch den Betonbau verursacht werden. Sie gliedern sich in eine ganze Reihe von Ansätzen, die in den letzten Jahren von anderen Forschungsgruppen und Hochschulen entwickelt wurden (z. B. CO<sub>2</sub>-reduzierte Betonmischungen, Carbon Capture and Storage Technologien etc.). Die Kombination unterschiedlichster Methoden und Technologien wird es uns hoffentlich ermöglichen, den erforderlichen Wandel schnell genug zu realisieren. Die auf den folgenden Seiten zu findenden Ansätze sind eine erste Bilanz der Arbeiten, die am ILEK durchgeführt wurden, seit Lucio Blandini die Leitung des Instituts im April 2020 übernommen hat. Selbstverständlich bauen sie in vielem auf dem auf, was am ILEK in den vorangegangenen Jahrzehnten unter der Leitung von Werner Sobek entstanden ist. Für dieses Wegbereiten sei auch an dieser Stelle ganz ausdrücklich gedankt.

## 2 Rezyklierte Gesteinskörnung

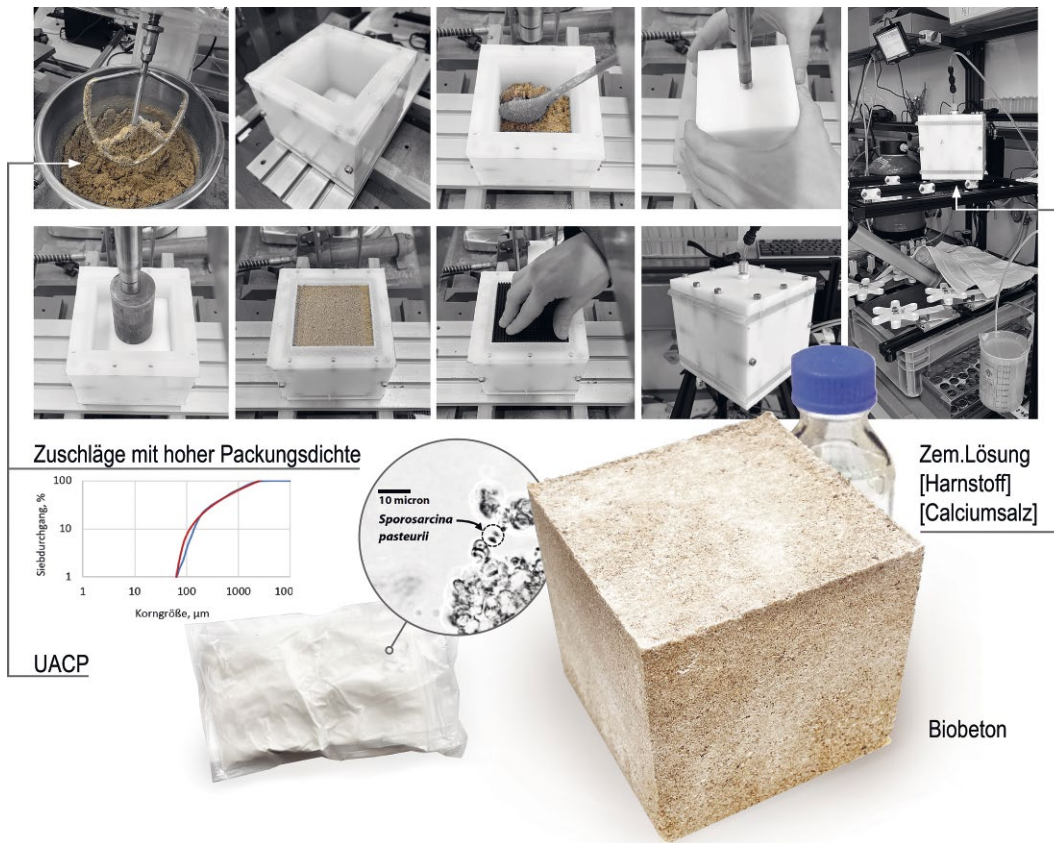
Um den Bedarf an Primärrohstoffen für die Betonherstellung zu reduzieren, gibt es Bestrebungen, einen zunehmenden Teil der natürlichen Gesteinskörnung der Betonrezeptur mit rezyklierter Gesteinskörnung zu ersetzen. Dies gilt natürlich auch für Bauteile aus Gradientenbeton [6], bei denen durch die Kombination von Gradierung und rezyklierten Baustoffen eine weitere Reduzierung des mit dem Bauteil verbundenen Verbrauchs von Primärrohstoffen erreicht werden kann. Herausfordernd hierbei ist, dass sich der für Gradientenbauteile eingesetzte Beton rein unter der Einwirkung der Schwerkraft nivellieren und dabei vollständig durch die geringen Zwischenräume zwischen den platzierten Hohlkugeln verteilen können muss. Außerdem muss die eigenständige Entlüftung durch eine optimierte Rezeptur sichergestellt sein, da ein Verdichten über externe Mechanismen die Hohlkugeln be-

schädigen kann [7]. Bei einer unzureichenden Nivellierung und Entlüftung entstehen Fehlstellen zwischen den sich berührenden Hohlkugeln, Bild 2b) oben.

Bei der Entwicklung und Optimierung der Betonrezeptur für gradierte Bauteile müssen deshalb verschiedene, teilweise widersprüchliche Aspekte beachtet werden. So sollte das Größtkorn zur vollständigen Verteilung durch die engen Zwischenräume hindurch möglichst gering sein. Andererseits wird der Beton im Rahmen des aktuellen Forschungsprojekts im Exzellenzcluster *Integratives computerbasiertes Planen und Bauen für die Architektur* (IntCDC) über einen Extruder ausgebracht [8]. Hierfür spielen die Stabilität und die Pumpbarkeit des Betons eine essenzielle Rolle. Diese werden positiv durch ein möglichst großes Größtkorn beeinflusst [9]. Eine größere Körnung bietet zudem den Vorteil eines geringeren Leimanpruchs und wirkt sich damit direkt auf die gewünschte Reduktion des Zementbedarfs aus.

In dem Widerspruch eines einerseits möglichst kleinen und andererseits möglichst großen Größtkorns liegt eine der Herausforderungen der Mischungsentwicklung für Gradientenbeton. In Bild 2b) unten ist ein Schnitt durch einen gradierten Balken dargestellt, der mit einer optimierten Mischungsrezeptur und einem Größtkorn von 16 mm allen bisher genannten Anforderungen gerecht wird. Im Verlauf der Forschungsarbeiten ging es darum, herauszufinden, welche Änderung der Betoneigenschaften der Einsatz von rezyklierten Zuschlägen hervorruft und wie mit diesen umgegangen werden kann. Als Referenz dient dabei die speziell vom Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB) der Universität Stuttgart entwickelte Betonrezeptur, die auch bei der Herstellung des gradierten Balkens in Bild 2b) unten eingesetzt wurde.

Im Rahmen der ersten Versuchsreihen wurden verschiedene Anteile der natürlichen Gesteinskörnung durch rezyk-



**Bild 3** Biobetonherstellung mit hoher Druckfestigkeit und Zementierungstiefe  
Production of bio-concrete with high compressive strength and cementation depth

lierte Gesteinskörnung ersetzt und deren Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften im Vergleich zur Referenzrezeptur untersucht. Die rezyklierten Gesteinskörnungen wurden gemäß DIN 4226-101 in Betonbruch ( $R_c$ ) sowie Mauerwerksbruch ( $R_b$ ) unterteilt und separat voneinander eingesetzt. Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse wurde eine deutlich verringerte Fließfähigkeit des Betons offensichtlich. Zurückgeführt wird dies auf einen stark erhöhten Wasseranspruch von rezyklierten Gesteinskörnungen im Vergleich zu natürlichem Kies und Sand.

Erste Untersuchungen hierzu zeigen einen Anstieg der Wasseraufnahmefähigkeit von 1,4 M.-% für natürliche Gesteinskörnungen auf 5,0 M.-% für Betonbruch sowie 7,3 M.-% für Mauerwerksbruch. Folglich sinkt das Setzfließmaß schon bei einer Substitution von 20% der Gesteinskörnung mit rezyklierten Zuschlägen von 73 cm beim Referenzbeton auf nunmehr 51 cm bzw. 62 cm. Infolge der durchgeführten Untersuchungen wurde deutlich, dass beim Einsatz von rezyklierten Zuschlägen der Verringerung der Fließfähigkeit entgegenwirken muss. Versuche mit dem VdZ-Trichter zeigten darüber hinaus einen Anstieg der Trichterauslaufzeit sowie der Fließzeit (früher  $t_{500}$ -Zeit) und unterstrichen damit die Beobachtungen beim Setzfließmaß. Gerade im Hinblick auf die zu Beginn genannten Anforderungen an die Rezeptur des Gradientenbetons, sich nur unter Einwirkung der Schwerkraft vollständig zu verteilen und zu entlüften, spielen diese Kennwerte mitunter eine maßgebende Rolle. Die bisherigen Ergebnis-

se zeigen die Herausforderungen beim Einsatz von rezyklierten Zuschlägen nur ansatzweise auf, weshalb weitere Untersuchungen stattfinden müssen. Für die folgenden Versuchsreihen wird daher die Wasseraufnahmefähigkeit für jeden Bestandteil einzeln in mehreren Durchläufen gemäß DIN EN 12620 bestimmt. Mit dem daraus entstehenden neuen Saugwasseranteil und einem darauf angepassten Mischregime werden weitere Versuchsreihen konzipiert. Hierbei sollen neben der steigenden Wasseraufnahmefähigkeit auch andere Effekte aufgedeckt werden, die beim Einsatz von rezyklierten Zuschlägen entstehen können.

### 3 Biobeton

Auf der Bindemittellebene der Betonwerkstoffe wird beim Forschungsprojekt „Biobeton“ untersucht, ob die Hydratation von Portlandzement durch Biomineralisierungsprozesse ersetzt werden kann. Bei der Herstellung von Portlandzement fallen durch die Umwandlung von Calciumcarbonat ( $\text{CaCO}_3$ ) zu Calciumoxid ( $\text{CaO}$ ) stets prozessbedingte  $\text{CO}_2$ -Emissionen an [1]. Die Biomineralisierung ermöglicht hingegen die Fixierung von  $\text{CO}_2$  in Form von  $\text{CaCO}_3$ -Kristallen, die Gesteinskörnung binden können [10]. Das resultierende mineralische Material ähnelt in seiner chemischen Zusammensetzung karbonatisch zementiertem Sandstein und in der Formgebung zementgebundenem Beton, weswegen es als Biobeton bezeichnet wird.

Der Herstellung von Biobeton liegt der Prozess der mikrobiologisch induzierten Calcitausfällung zugrunde (eng. kurz MICP), in dem der Gesteinskörnung frei in der Natur vorkommende Bakterien (z. B. *Sporosarcina pasteurii*) sowie eine sog. Zementierungslösung aus Harnstoff und Calciumsalz hinzugegeben werden. Durch das Enzym Urease sind die Bakterien in der Lage, Harnstoff abzubauen. Dabei wird eine chemische Reaktion in Gang gesetzt, die bei Präsenz von Calciumionen zur Bildung von  $\text{CaCO}_3$  führt. Die Festigkeit des Biobetons ist von der Menge des gebildeten  $\text{CaCO}_3$  abhängig [11]. Deshalb muss die Zementierungslösung dem Biobeton über drei bis fünf Tage wiederholt in niedriger Konzentration hinzugegeben werden, um Ionen für den Aufbau von  $\text{CaCO}_3$ -Kristallen bereitzustellen.

Ein häufiges Problem bei MICP ist das Auswaschen der Bakterien durch die Strömungskräfte, die während der Zementierung auftreten. Zur besseren Fixierung der Bakterien wurde daher von Cheng und Shahin [12] eine Methode zur Ummantelung der Zellen mit einer Schicht aus  $\text{CaCO}_3$  entwickelt. Diese Methode wurde am ILEK durch die Gefriertrocknung der ummantelten Zellen zu ureaseaktivem Calciumcarbonatpulver (UACP) weiterentwickelt, wodurch neben der besseren Fixierung auch eine langfristige Aufbewahrung der Bakterien nach der Anzucht möglich wird. Analog zu zementgebundenem Beton kann auch bei Biobeton die Festigkeit durch eine Optimierung der Packungsdichte der Zuschläge verbessert werden. Nach aktuellem Stand der Forschung muss das gesamte Probenvolumen von der Zementierungslösung durchströmt werden. Aus diesem Grund finden sehr feine Fraktionen nur eingeschränkt Verwendung, da sonst eine vorzeitige Blockage der Fließpfade droht. Der gerichtete Fluss der Zementierungslösung hat außerdem zur Folge, dass die erreichbare Zementierungstiefe von der Fließgeschwindigkeit und der Metabolisierungsrate der Bakterien abhängig ist. Harnstoff und Calcium werden in Flussrichtung der Zementierungslösung zunehmend aufgebraucht.

Im Rahmen eines interdisziplinären Versuchsprojekts hat das ILEK gemeinsam mit dem Institut für Mikrobiologie (IMB) und dem Institut für Steuerungstechnik der Werkzeugmaschinen und Fertigungseinrichtungen (ISW) der Universität Stuttgart zylindrische Probekörper aus Biobeton mit einer Druckfestigkeit von bis zu 46 MPa bei einer Zementierungstiefe von 135 mm hergestellt. Diese, gemessen an Werten aus der bisherigen Forschung, hohe Druckfestigkeit in Kombination mit einer tiefen Zementierung ist das Ergebnis der entwickelten Methodenkombination aus Verwendung von UACP, Optimierung der Packungsdichte und Zementierung in einem automatisierten Verfahren durch Durchströmen unter Druck. Der gesamte Herstellungsprozess ist auf Bild 3 dargestellt.

Die bisherigen Ergebnisse der Arbeit am ILEK machen das Potenzial von Biobeton als zukunftsfähigen Baustoff deutlich. Jedoch besteht weiterhin erheblicher Forschungsbedarf: Neben einer weiteren Erhöhung der Ze-

mentierungstiefe und der Druckfestigkeit müssen vor allem Rohstoffkreisläufe für die Bereitstellung von Harnstoff und Calcium definiert werden. Die in Laborversuchen verwendeten Rohstoffe wie synthetischer Harnstoff und Calciumchlorid machen bei der Biobetonherstellung bis zu 80% der  $\text{CO}_2$ -Emissionen aus [11]. Mögliche Alternativen zu synthetischem Calciumchlorid sind Abfallstoffe anderer Industrien (Calciumchlorid aus Solvayverfahren [13] oder mineralische Abfälle aus Steinbrüchen [14]). Der Harnstoff kann aus Abwässern [15] gewonnen werden. Außerdem besteht die Möglichkeit, das Ammonium, das bei der MICP-Reaktion anfällt, mit  $\text{CO}_2$  erneut zu Harnstoff aufzubereiten. Die zukünftige Gestaltung dieser Kreisläufe wird das Verhältnis zwischen dem im Biobeton gebundenen  $\text{CO}_2$  und dem durch die Rohstoffversorgung freigesetzten  $\text{CO}_2$  maßgeblich beeinflussen.

#### 4 Mineralische Bewehrung aus Basalt

Einen zentralen Aspekt in der aktuellen Forschung zu gewichtsminimalen Betonstrukturen [2] bilden Untersuchungen auf der Materialebene der Bauteilbewehrung. Als Alternative zu konventionellem Beton- und Spannstahl rücken am ILEK Faserverbundkunststoffe aus Basalt in den Fokus der Betrachtung. Basalt ist ein Gestein, das weltweit in großen Mengen vorhanden ist [16]. Darüber hinaus ist Basalt vulkanischen Ursprungs und kann durch endogene Prozesse auf natürliche Weise nachgebildet werden. Auf lange Sicht betrachtet ist seine Verwendung als Bewehrungsalternative im Betonbau somit gewährleistet. Gleichzeitig wird hierdurch die Möglichkeit eröffnet, ein nahezu vollständig mineralisches Bauteil zu schaffen.

Bewehrungselemente aus Basaltfaserverbundkunststoffen bestehen aus parallel zueinander gerichteten Filamenten, die in einem Matrixmaterial gebettet werden. Die notwendigen Basaltfilamente werden dabei aus dem ursprünglichen Basaltgestein in einem Schmelzspinnverfahren hergestellt und zu Rovings gebündelt [17]. Als Matrixmaterial finden diverse Werkstoffe Anwendung, eine geeignete Auswahl an Kunstharzen bilden Epoxid-, Polyester- und Vinylesterharze. Die Basaltfaserverbundbewehrungen der Firma C-Con aus Baden-Württemberg haben beispielweise einen Basaltfaseranteil von ca. 80% und einen Matrixanteil von ca. 20%. Auf das Gesamtvolumen eines Betonbauteils bezogen ist dieser Kunstharzanteil vernachlässigbar klein. Neben Kunstharzen wird zudem an biologisch abbaubaren Harzsystemen geforscht. Einen guten Überblick hierzu gibt [18]. Im Vergleich zu konventionellen Stahlbewehrungen im Betonbau bestehen die Vorteile von Faserverbundkunststoffen aus Basalt in einer höheren spezifischen Zugfestigkeit und einem hohen Korrosionswiderstand [19]. Vor diesem Hintergrund werden die bei der Planung und Ausführung stets zu berücksichtigenden Betondeckungen, infolge der zugrunde liegenden Bauteilexposition, reduziert. Dies ermöglicht zum einen die Realisierung von filigranen und gleichzeitig bewehrten Betonbauteilen. Zum anderen



**Bild 4** Vorbereitete Basaltfaserverbundstäbe mit 3 mm und 5 mm Durchmesser  
Prepared basalt fiber composite rebars with 3 mm and 5 mm diameter

wird das Eigengewicht der Bauteile minimiert, da nun lediglich der Verbund zwischen Bewehrung und Beton zu gewährleisten ist. Im Gegensatz zum konventionellen Betonstahl begünstigt die Korrosionsunempfindlichkeit der Basaltfaserverbundbewehrung ebenfalls den Einsatz im Biobeton.

Die Umwelteinwirkungen von einer Basaltfaserverbundbewehrung werden von Kromoser in [19] mit diversen metallischen und anderen nichtmetallischen Bewehrungselementen ins Verhältnis gesetzt. Ein normierter Vergleich des globalen Erwärmungspotenzials (GWP) zeigt den ökologischen Vorteil von Basalt gegenüber Carbon- und Glasfaserverbundbewehrungen sowie einem Spannstahl aus Norwegen. Für besagten Vergleich wurden dabei die charakteristischen Zugfestigkeiten als auch vereinfacht angenommene Rohdichten der jeweiligen Materialien mit einbezogen.

Ein weiterer relevanter Aspekt ist die allgemeine Recyclingfähigkeit von Faserverbundkunststoffen. Zu diesem Thema gibt Kortmann eine gute Übersicht in [20] am Beispiel von beschichteten Carbonfasern. Es werden zwei Verfahren zur stofflichen Verwertung vorgestellt. Während die Pyrolyse auf einem Verbrennungsprozess des Matrixmaterials beruht, fungiert in der Solvolyse Wasser mit einer Temperatur von  $>374^{\circ}\text{C}$  bei einem Druck von  $>221$  bar als Lösungsmittel. Die beiden Verwertungsprozesse können sowohl für Carbon- als auch Basaltfaserverbundkunststoffe angewandt werden.

Einleitende Untersuchungen am ILEK legten den Fokus auf die experimentelle Ermittlung der uniaxialen Zugfestigkeit von Basaltfaserverbundbewehrungen der Firma C-Con. Hierzu wurden jeweils drei Basaltfaserverbundstäbe mit Stabdurchmessern von 3 mm und 5 mm getestet und ausgewertet, Bild 4. Im Rahmen der Versuchsvorbereitung wurden Verankerungshülsen mit unterschiedlichen Abmessungen gefertigt. Für die Stabvariante mit 3 mm Durchmesser betrug die Hülsenlänge  $L_{\text{Hülse}} = 70$  mm. Bei der Variante mit 5 mm Durchmesser wurde diese verlängert auf  $L_{\text{Hülse}} = 100$  mm. In beiden Fällen wurde ein Außengewinde M16 zur Befestigung in der Prüfeinrichtung berücksichtigt. Die Fixierung der Basaltfaserverbundstäbe innerhalb der Hülse erfolgte mit einem Injektionsmörtel der Firma Hilti. Durch eine speziell konstruierte Montagehilfe konnte eine gleichbleibende freie Länge von 200 mm für alle Stabvarianten sichergestellt werden.

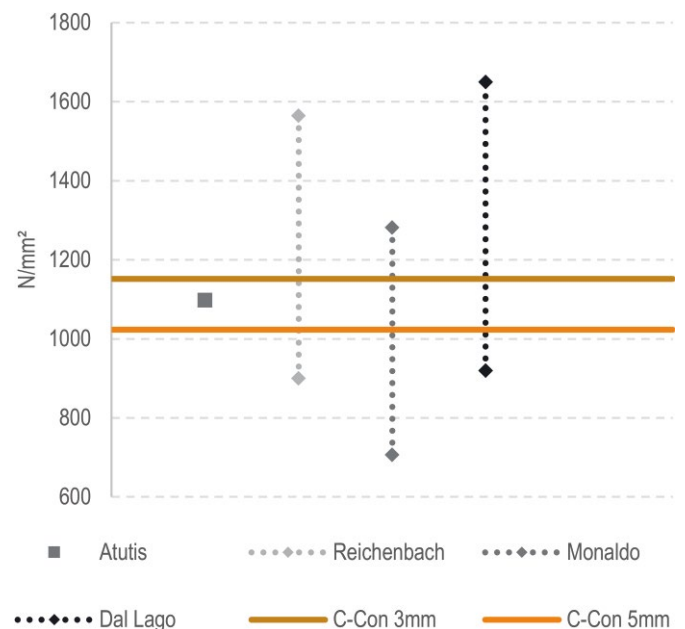
Die Ergebnisse der uniaxialen Zugversuche sind in Tab. 1 zusammengefasst, dabei wurde die Bruchspan-

**Tab. 1** Versuchsreihe 1 der getesteten 3 mm und 5 mm Basaltfaserverbundstäbe der Firma C-Con  
Test series 1 for 3 mm and 5 mm basalt fiber composite rebars of the company C-Con

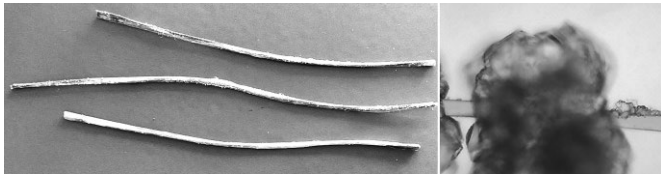
Typ	Bruchkraft [N]	Bruchspannung [ $\text{N}/\text{mm}^2$ ]	Bruchdehnung [%]
V1_3.1	8370	1184	3,51
V1_3.2	8100	1145	3,15
V1_3.3	7970	1127	3,11
V1_5.1	20.000	1018	3,91
V1_5.2	20.000	1018	3,91
V1_5.3	20.300	1033	4,09

nung auf den Kompositquerschnitt der untersuchten Probekörper bezogen. Sowohl für die Variante mit 3 mm als auch mit 5 mm lässt sich eine geringe Streuung der Versuchsergebnisse beobachten. Die Mittelwerte für die Bruchspannungen berechnen sich jeweils zu  $1152 \text{ N}/\text{mm}^2$  und  $1023 \text{ N}/\text{mm}^2$ . In diesem Zusammenhang wird darauf hingewiesen, dass alle Probekörper aus einer Charge stammen. Weitere Versuche sind bereits in Planung und ergänzen den Untersuchungsrahmen entsprechend. Eine aktuelle Gegenüberstellung der Ergebnisse mit Werten aus der Literatur zeigt eine Platzierung im branchenweiten Mittelfeld (Bild 5).

Parallel wird derzeit am ILEK untersucht, ob MICP (vgl. Abschn. 1.3) für die Biomineralisierung und Bindung der Filamente genutzt werden kann, um Kunstharze als Ma-



**Bild 5** Vergleich der experimentell ermittelten Bruchspannungen für Basaltfaserverbundstäbe der Firma C-Con mit 3 mm und 5 mm Durchmesser mit denen aus der Literatur von Atutis [21], Reichenbach [22], Monaldo [23] und Dal Lago [24]  
Comparison of experimentally determined breaking stresses for basalt fiber composite rebars with 3 mm and 5 mm diameters of the company C-Con with those from the literature of Atutis [21], Reichenbach [22], Monaldo [23] and Dal Lago [24]



**Bild 6** Links: biomineralisierte Basaltfaserstäbe; rechts: Filament mit Calciumcarbonatkristallen  
 Left: bio-mineralized basalt fiber composite rebars; right: filament with calcium-carbonate crystals

trixmaterial zu ersetzen. Bild 6 zeigt biomineralisierte Basaltfaserstäbe, für deren Herstellung lose Fasern mit einer Suspension aus Bakterien und Alginat beschichtet und für drei Tage in ein Bad mit Zementierungslösung eingelegt wurden. Die hergestellten Basaltfaserstäbe wiesen zwar eine deutliche Formstabilität auf, wurden allerdings nicht bis zum Kern durchzementiert.

In einem Zugversuch wurden biomineralisierte Basaltfaserstäbe solchen mit einer Epoxidharzmatrix sowie einem ungetränkten Faserstrang gegenübergestellt. Der Faserstrang ohne Matrix versagte bei 328 N, die biozementierten Stäbe bei 569 N und die Stäbe mit Kunstharzmatrix bei 961 N. Diese einleitende Versuchsreihe zeigt, dass die Biozementierung den Verbund der Einzelfasern positiv beeinflusst, aber noch nicht die Werte einer Kunstharzmatrix erreicht. Dies liegt vermutlich an der mangelhaften Querschnittaktivierung, da nur die äußeren Filamente der Basaltfaserstäbe biomineralisiert waren. Hierzu werden in einem laufenden Forschungsprojekt weitere Untersuchungen durchgeführt.

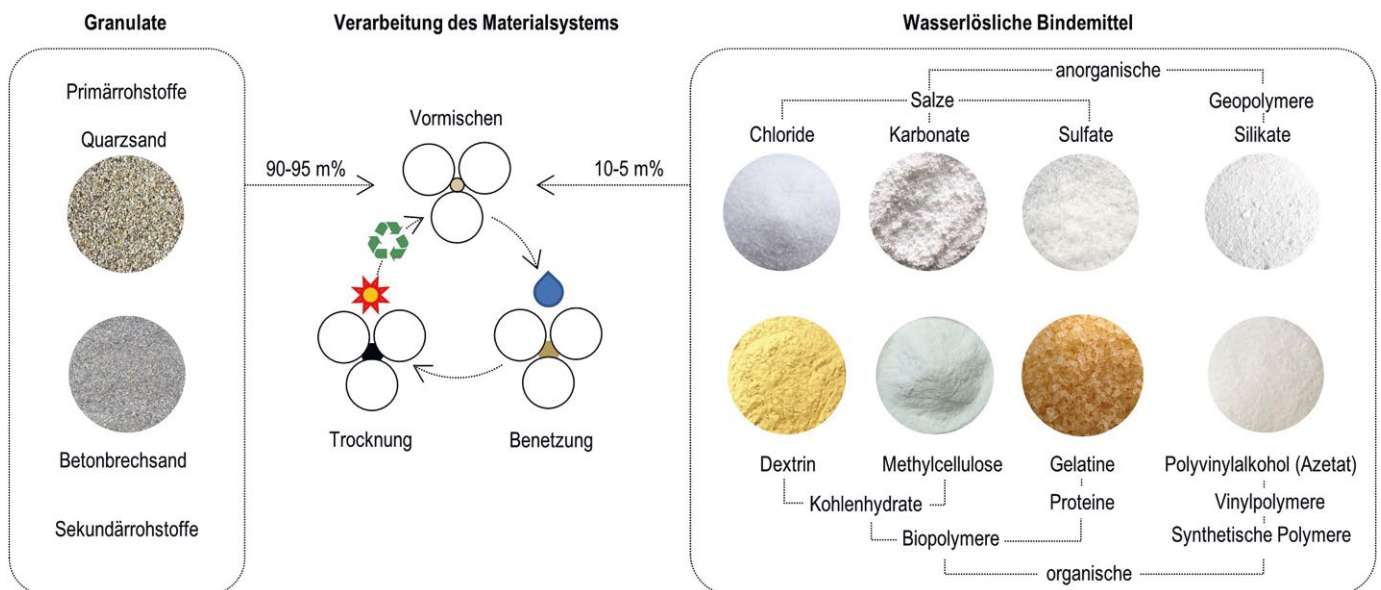
Zusammenfassend betrachtet bieten Basaltfaserverbundbewehrungen sowohl eine hohe Materialverfügbarkeit und Zugfestigkeit als auch die Möglichkeit, durch reduzierte Betondeckungen Material einzusparen. Zusätzlich kann durch die Entwicklung einer mineralischen Matrix

die Rezyklierbarkeit gesteigert werden. Damit leisten Basaltfaserverbundbewehrungen einen Beitrag zur Herstellung nachhaltigerer Betonstrukturen.

## 5 Rezyklierbare Sandschalungen

Ein nicht unerheblicher Teil der Emissionen von Betonbauwerken ist auf Entwurfsentscheidungen zurückzuführen, die ihrerseits wiederum von den aktuellen technologischen Möglichkeiten und Beschränkungen beeinflusst wurden. Eine große Rolle spielen dabei die Arbeits- und Materialkosten bei der Schalungsherstellung sowie die damit verbundenen Emissionen und Abfälle, die in der Regel in direkter Abhängigkeit von der geometrischen Komplexität der zu fertigenden Betonstrukturen stehen [25]. Dies wiederum behindert die Verbreitung statisch optimierter, filigraner Betonkonstruktionen, da die damit einhergehenden Materialeinsparungen angesichts der niedrigen Materialkosten von Beton den zusätzlichen Schalungsaufwand nicht aufwiegen. Letztlich führt dies zu einem übermäßigen Verbrauch von Beton im Bauwesen und erhöhten Emissionen von klimaschädlichen Gasen. Die Entwicklung nachhaltiger und kostengünstiger Schalungstechnologien, welche die abfallfreie Herstellung von Betonstrukturen filigraner Geometrie ermöglichen, kann die Umsetzung ressourcenschonender Konstruktionen fördern und somit zu einer weiteren Dekarbonisierung der Betonbauindustrie beitragen.

Um dieser Herausforderung entgegenzutreten, befasst sich das ILEK mit der Erforschung abfallfreier Schalungsmethoden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf wasserlöslichen Sand-Bindemittel-Gemischen, die leicht wiederverwertbar sind und für deren Fertigung nur relativ wenig Energie benötigt wird [26]. Das Schalungsmaterialsystem besteht aus zwei Komponenten – einem Granulat und



**Bild 7** Zusammensetzung und Verarbeitung von wasserlöslichen Sand-Schalungsmaterialmischungen  
 Composition and processing of water-soluble sand formwork material mixtures



**Bild 8** V.l.n.r.: Würfel aus Sand und Bindemittel, additiv gefertigte wasserlösliche Sandschalung, filigraner Probekörper, gegossen mit zwei Betonen in die additiv gefertigte Sandschalung  
From left to right: cube made of sand and binder, additively manufactured water-soluble sand formwork, filigree test specimen cast with two concretes in the additively manufactured water-soluble sand formwork

einem wasserlöslichen Bindemittel in Pulverform. Als Granulate können sowohl primäre (Quarzsand) als auch sekundäre (Betonbrechsand) feine Schüttgüter verwendet werden. Bindemittel können sowohl anorganisch als auch organisch sein, Bild 7. Zu den anorganischen Vertretern zählen vor allem Natrium-, Kalium- oder Magnesiumsalze (Chloride, Carbonate oder Sulfate) und Geopolymere wie Natrium- oder Kaliumsilikate. Organische Bindemittel, natürliche und synthetische Polymere bieten ebenfalls großes Potenzial für diese Anwendung, da sie nur teilweise wasserlöslich sind und zu einem höheren Prozentsatz wiederverwertet werden können. Hierzu gehören Kohlenhydrate (Polysaccharide – Dextrin, Zellulose), Proteine (Gelatine) sowie Vinylpolymere (Polyvinylacetat und Polyvinylalkohol).

Das Hauptmerkmal aller wasserlöslichen Schalungsmische ist ihre Fähigkeit zur reversiblen Verfestigung, die ausschließlich durch physikalische Prozesse (Befeuchtung und Temperaturbehandlung) erreicht wird, wobei jegliche chemische Reaktion zwischen den Bestandteilen vermieden wird (vgl. mit Wasserglas oder Furanharz gebundene Sandformen). Zur Herstellung einer wasserlöslichen Sandschalung werden zunächst Sand, Bindemittel und Wasser in einem Verhältnis von 85/8/7 M.-% vorgemischt, um das Bindemittel zu aktivieren. Die Mischung wird anschließend erhitzt, bis das Wasser verdampft ist und die Form somit aushärtet, Bild 8 links. Die Festigkeit des ausgehärteten Materials ist direkt proportional zum Prozentsatz des Bindemittels und erreicht bei der oben genannten Zusammensetzung 1 MPa auf Zug und bis zu 10 MPa auf Druck, was ausreichend ist, um dem hydrostatischen Druck des Betons standzuhalten und gleichzeitig die wasserlöslichen Eigenschaften zu erhalten. Trotz der Wasserlöslichkeit der Schalung ist das in der Betonmischung enthaltene Wasser nicht ausreichend, um diese zu zerstören oder zu verformen.

Nach der Aushärtung des Betons kann die Schalung in ein Wasserbad getaucht oder mit fließend Wasser ausgewaschen werden. Das gesamte Schalungsmaterial wird anschließend vom Restwasser getrennt, getrocknet, ge-

mahlen und kann unmittelbar in weiteren Produktionszyklen wiederverwertet werden. Der Teil des Bindemittels, welcher sich im Wasser gelöst hat, kann durch neues ersetzt werden. Diese Technologie kann leicht an die digitale Produktion und die Herstellung komplexerer Schalungsformen durch 3D-Druck angepasst werden (Bild 8 mittig, rechts), was in Teil 2 dieses Beitrags näher erläutert wird [27].

## 6 Zusammenfassung

Beton gehört nicht zu den klassischen Leichtbaumaterialien, da das Verhältnis von spezifischem Gewicht zur ausnutzbaren Festigkeit, Dehnung und Steifigkeit nicht besonders günstig ist. Andere Vorteile sprechen aber für diesen Werkstoff, u. a. seine gute Formbarkeit ebenso wie seine Dauerhaftigkeit, gute Rezyklierbarkeit und Wirtschaftlichkeit. Diese Faktoren haben den Einsatz von Beton im Bauwesen in den letzten 100 Jahren beflügelt. Durch die Anwendung von Leichtbau-Prinzipien ebenso wie durch die Erweiterung des klassischen Leichtbau-Begriffs um ökologische Komponenten können Wege aufgezeigt werden, wie wir auch in Zukunft klima-, ressourcen- und umweltgerecht mit diesem Jahrhundert-Werkstoff planen und bauen können.

Die Forschungsprojekte, die in den letzten Jahren am ILEK durchgeführt wurden, zeigen verschiedene Ansätze, wie die Verwendung von primären Ressourcen bzw. die Entstehung von klimaschädlichen Emissionen und Abfällen maßgeblich reduziert werden können. Die gute Formbarkeit von Beton macht es grundsätzlich möglich, auch mit diesem scheinbar so schweren Werkstoff filigrane und leichte Konstruktionen zu realisieren. Um dieses zu ermöglichen, entwickeln die Forschenden am ILEK innovative und kreislaufgerechte Schalungstechnologien und Betonrezepturen, welche die Verwendung von Rezyklaten für die Herstellung von Gradientenbeton ermöglichen. Alternative Bewehrungsansätze, aufbauend auf den Forschungsarbeiten von anderen Universitäten im Bereich der faserverstärkten Betone [28], sind aufgrund der oft komplexen Topologien essenziell. Letztlich geht es



darum, eine Reihe von ineinandergreifenden alternativen Technologien zu entwickeln, die es uns ermöglichen, die Emission von CO<sub>2</sub> während der Herstellung von Betonkonstruktionen so gering wie irgend möglich zu halten.

Obwohl die hier behandelten Forschungsthemen verschiedene Aspekte bei der Reduktion des ökologischen Fußabdrucks von Beton behandeln, sind alle durch ein gemeinsames Ziel miteinander verbunden, nämlich den Wunsch, in Zukunft leichter und nachhaltiger mit Beton bauen zu können. Dieses Ziel kann nur durch eine interdisziplinäre Vorgehensweise erreicht werden, die den Austausch zwischen Fachleuten aus dem Bauingenieurwesen, der Architektur und anderen Bereichen wie der Werkstoffkunde, der Fertigung und der Mikrobiologie fordert und fördert. Aus diesem Grund ist für das ILEK die Zusammenarbeit mit anderen Instituten unabdingbar. Die methodische Erweiterung der Ansätze des Leichtbaus um den ökologischen Fußabdruck bildet dabei den notwendigen Rahmen, um die behandelten

Forschungsfragen zu definieren und deren Zielsetzung zu schärfen.

## Dank

Die Forschungsarbeiten zum Thema Gradientenbeton werden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) im Rahmen der Exzellenzstrategie – EXC 2120/1-390831618 gefördert. Die Forschung zu nachhaltigen Schalungstechnologien wird von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) unter der Projekt-ID 423987937- SPP 2187 gefördert. Die Forschung zu Biobeton wird durch das Innovationsprogramm „Zukunft Bau“ des Bundesinstituts für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) (Projekt-ID SWD-10.08.18.7-20.41) sowie durch das Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg (UM) gefördert. Die Autoren danken der DFG, dem BBSR und dem UM für die geleistete Unterstützung.

## Literatur

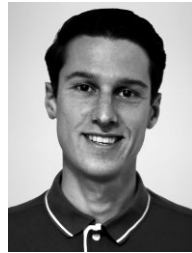
- [1] Sobek, W. (2022) *non nobis – über das Bauen in der Zukunft: Band 1: Ausgehen muss man von dem, was ist*. Stuttgart: avedition.
- [2] Blandini, L.; Sobek, W. (2020) *Das Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren ILEK: Über 100 Jahre Forschung im Stahlbetonbau*. Beton- und Stahlbetonbau 115, H. 8, S. 626–631. <https://doi.org/10.1002/best.202000035>
- [3] Sobek, W. (1995) *Zum Entwerfen im Leichtbau*. Bauingenieur 70, S. 323–329.
- [4] Sobek, W. (2007) *Entwerfen in Leichtbau*. Themenheft Forschung – Thema: Leichtbau, H. 3, S. 70–82.
- [5] Weidner, S. et al. (2021) *Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien*. Beton- und Stahlbetonbau 116, H. 12, S. 969–977. <https://doi.org/10.1002/best.202100065>
- [6] Schmeer, D.; Sobek, W. (2018) *Gradientenbeton* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J.-D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2019*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 455–476.
- [7] Schließer, A. (2019) *Warmbeton: Mischungsentwicklung mit verbesserter Übertragbarkeit in den Realmaßstab – Mischungsentwicklung mit verbesserter Übertragbarkeit in den Realmaßstab* [Dissertation]. Universität Stuttgart.
- [8] Blagojevic, B.; Nitsche, A.; Sawodny, O. (2021) *Modeling of transient incompressible concrete mass flow through a hose*. 2021 IEEE Conference on Control Technology and Applications. Online. IEEE.
- [9] Haibo, X. et al. (2013) *Workability and proportion design of pumping concrete based on rheological parameters*. Construction and Building Materials 44, pp. 267–275. <https://doi.org/10.1016/j>
- [10] Castro-Alonso, M. J. et al. (2019) *Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) and Its Potential in Bioconcrete: Microbiological and Molecular Concepts*. Frontiers in materials 6. <https://doi.org/10.3389/fmats.2019.00126>
- [11] Deng, X. et al. (2021) *Examining Energy Consumption and Carbon Emissions of Microbial Induced Carbonate Precipitation Using the Life Cycle Assessment Method*. Sustainability 13, No. 9, pp. 4856. <https://doi.org/10.3390/su13094856>
- [12] Cheng, L.; Shahin, M. A. (2017) *Urease active bioslurry: a novel soil improvement approach based on microbially induced carbonate precipitation*. Canadian Geotechnical Journal 01, No. 5, pp. 1376–1385. <https://doi.org/10.1139/cgj-2015-0635@cgj-ec.2015.01.issue-5>
- [13] Roynce, A. et al. (2019) *Towards a low CO<sub>2</sub> emission building material employing bacterial metabolism (1/2): The bacterial system and prototype production*. PLoS ONE 14, Nr. 4, e0212990. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0212990>
- [14] Casas, C. C. et al. (2019) *Dissolution experiments on dolerite quarry fines at low liquid-to-solid ratio: a source of calcium for MICP*. Environmental Geotechnics, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1680/jenge.19.00067>
- [15] Lambert, S. E.; Randall, D. G. (2019) *Manufacturing bio-bricks using microbial induced calcium carbonate precipitation and human urine*. Water research 160, pp. 158–166. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.05.069>
- [16] Okrusch, M.; Matthes, S. (2014) *Mineralogie – Eine Einführung in die spezielle Mineralogie, Petrologie und Lagerstättenkunde*. 9. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [17] Cherif, C. (2011) *Textile Werkstoffe für den Leichtbau – Techniken – Verfahren – Materialien – Eigenschaften*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- [18] Fiore, V. et al. (2015) *A review on basalt fibre and its composites*. Composites Part B: Engineering 74, pp. 74–94. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.12.034>
- [19] Kromoser, B. (2021) *Ressourceneffizientes Bauen mit Betonfertigteilen Material – Struktur – Herstellung* in: Bergmeister, K.; Fingerloos, F.; Wörner, J. D. [Hrsg.] *Beton-Kalender 2021*. Berlin: Ernst & Sohn, S. 305–356.
- [20] Kortmann, J. (2020) *Verfahrenstechnische Untersuchungen zur Recyclingfähigkeit von Carbonbeton*. Technische Universität Dresden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-30125-5>
- [21] Atutis, E.; Valivonis, J.; Atutis, M. (2018) *Experimental study of concrete beams prestressed with basalt fiber reinforced polymers under cyclic load*. Composite Structures

- 183, pp. 389–396. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.03.106>
- [22] Reichenbach, S. et al. (2021) *A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe*. Construction and Building Materials 307, S. 124946. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124946>
- [23] Monaldo, E.; Nerilli, F.; Vairo, G. (2019) *Basalt-based fiber-reinforced materials and structural applications in civil engineering*. Composite Structures 214, pp. 246–263. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.02.002>
- [24] Dal Lago, B.; Bisi, D.; Ferrara, L. (2019) *On the Application of Basalt-Fiber Reinforced Polymer (BFRP) Bars to Prestressed Slab Elements Typical of the Precast Concrete Industry* in: Kim, Y. J.; Myers, J. J.; Nanni, A. [Hrsg.] *Advances in concrete bridges*. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute.
- [25] García de Soto, B. et al. (2018) *Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall*. Automation in Construction 92, pp. 297–311. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>
- [26] Kovaleva, D. et al. (2022) *Rezyklierbare Sandschalungen – Auf dem Weg zur Kreislaufproduktion leichter Betonbauteile*. Beton- und Stahlbetonbau 117, H. 5, S. 333–342. <https://doi.org/10.1002/best.202200009>
- [27] Blandini, L. et al. (2023) *Leicht bauen mit Beton – ausgewählte Forschungsarbeiten des ILEK. Teil 2: Strukturleichtbau*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 5 S. 320–331. <https://doi.org/10.1002/best.202300026>
- [28] Beckmann, B. et al. (2021) *Standortübergreifende Forschung zu Carbonbetonstrukturen im SFB/TRR 280*. Bautechnik 98, H. 3, S. 232–242. <https://doi.org/10.1002/bate.202000116>

## Autor:innen



Prof. Dr.-Ing. M.Arch. Lucio Blandini  
lucio.blandini@ilek.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Pfaffenwaldring 14  
70569 Stuttgart



Benedikt Strahm M.Sc.  
benedikt.strahm@ilek.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Pfaffenwaldring 14  
70569 Stuttgart



Dipl.-Arch. Daria Kovaleva (Korrespondenzautorin)  
daria.kovaleva@ilek.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Pfaffenwaldring 14  
70569 Stuttgart



Erik Eppinger M.Sc.  
erik.eppinger@imb.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Mikrobiologie  
Allmandring 31  
70569 Stuttgart



Christoph Nething M.Sc.  
christoph.nething@ilek.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Pfaffenwaldring 14  
70569 Stuttgart



Alexander Teichmann M.Sc.  
Universität Stuttgart  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen  
Pfaffenwaldring 4  
70569 Stuttgart



David Nigl M.Sc.  
david.nigl@ilek.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Pfaffenwaldring 14  
70569 Stuttgart



Maiia Smirnova M.Sc.  
maiia.smirnova@ilek.uni-stuttgart.de  
Universität Stuttgart  
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren  
Pfaffenwaldring 14  
70569 Stuttgart

## Zitieren Sie diesen Beitrag

Blandini, L.; Kovaleva, D.; Nething, C.; Nigl, D.; Smirnova, M.; Strahm, B.; Eppinger, E.; Teichmann, A. (2023) *Leicht bauen mit Beton – ausgewählte Forschungsarbeiten des ILEK – Teil 1: Materialleichtbau*. Beton- und Stahlbetonbau 118, H. 5, S. 310–319. <https://doi.org/10.1002/best.202300025>

Dieser Aufsatz wurde in einem Peer-Review-Verfahren begutachtet. Eingereicht: 27. Februar 2023; angenommen: 7. März 2023.