ResearchGate

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: https://www.researchgate.net/publication/374162808

Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen | Additive manufacturing of free formed concrete elements by selective…

Chapter · June 2022

DOI: 10.25368/2022.162

CITATIONS
2

READS
91

6 authors, including:

Daniel Weger
Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH
41 PUBLICATIONS **1,051** CITATIONS
SEE PROFILE

Daniel Talke
Technische Universität München
20 PUBLICATIONS **256** CITATIONS
SEE PROFILE

Dirk Lowke
Technical University of Munich
155 PUBLICATIONS **2,499** CITATIONS
SEE PROFILE

Klaudius Henke
Technische Universität München
24 PUBLICATIONS **382** CITATIONS
SEE PROFILE

All content following this page was uploaded by Klaudius Henke on 25 September 2023.

The user has requested enhancement of the downloaded file.

Additive Fertigung frei geformter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen | Additive manufacturing of free formed concrete elements by selective binding with calcium silicate based cements

- **Daniel Weger[1], Daniel Talke[2], Dirk Lowke[1], Klaudius Henke[2], Christoph Gehlen[1], Stefan Winter[2]**
- [1] Centrum für Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Technische Universität München
- [2] Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (hb), Technische Universität München

1 Motivation

Die additive Fertigung erlaubt ein bisher nicht gekanntes Maß an geometrischer Freiheit bei der Gestaltung von Bauteilen. In der Medizin- und Dentaltechnik wird die additive Fertigung beispielsweise eingesetzt, um an die individuelle Anatomie des Patienten angepasste Prothesen und Implantate herzustellen. Im Maschinenwesen ermöglicht sie den Bau von multifunktionalen und formoptimierten Bauteilen und damit eine Senkung des Materialeinsatzes bei gleichzeitiger Steigerung der Leistungsfähigkeit. In der Luft- und Raumfahrttechnik wird sie genutzt, um mittels Topologieoptimierung oder durch das Zusammenfassen von ganzen Baugruppen zu einem einzelnen Bauteil Gewicht zu sparen [1].

Diese und viele andere Beispiele zeigen, dass es mit additiver Fertigung möglich ist, hoch komplexe Unikate oder Kleinserienbauteile zu erstellen und dadurch Funktionalität und Materialökonomie gleichermaßen zu fördern. Auch für das Bauwesen, in dem Unikate die Regel sind und Komplexität oft notwendig ist, birgt die additive Fertigung ein großes Potential. Mit dieser Technik ließen sich formoptimierte Tragwerkselemente, multifunktionale

1 Motivation

Additive manufacturing allows a previously unknown degree of geometric freedom in the design of components. In medical and dental technology for example, additive manufacturing is used to produce prostheses and implants adapted to the individual anatomy of the patient. In mechanical engineering, it enables the construction of multifunctional and shape-optimized components thus reducing the amount of material used while simultaneously increasing performance. In aerospace engineering, it is used to save weight by means of topology optimization or by combining entire assemblies into a single component [1].

These and many other examples show that additive manufacturing makes it possible to create unique, highly complex components or small series, thereby promoting both functionality and material economy. Additive manufacturing also holds great potential for the construction industry, where unique components are the rule and complexity is often necessary. With this technique, shape-optimized structural elements, multifunctional elements of the building envelope or individual formwork elements of high geometric complexity can

Elemente der Gebäudehülle oder individuelle Schalungselemente von hoher geometrischer Komplexität herstellen. Während jedoch die additive Fertigung in vielen Branchen bereits zum Stand der Technik gezählt werden kann, befindet sie sich im Bereich des Bauwesens noch in einem frühen Entwicklungsstadium. Es stehen weder ausreichend große Geräte für Anwendungen im Bauwesen zur Verfügung, noch können in den verfügbaren Geräten solche Materialien eingesetzt werden, die den Anforderungen an Baustoffe genügen. Es lag deshalb nahe, in einem Teilprojekt des Schwerpunktprogramms SPP 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ die additive Fertigung mit Beton zu erforschen.

2 Ziele

Die additive Fertigung mit Beton kann mittels zweier grundsätzlich verschiedener Verfahren realisiert werden: Bei der Extrusion wird Frischbeton durch eine Düse in Strängen aufgetragen. Beim selektiven Binden wird fließfähiges Material gezielt in dünnen Schichten einer trockenen Schüttung eingebracht, wodurch diese in den Bereichen lokal verfestigt werden, wo das spätere Bauteil entstehen soll.

Da sich im Vergleich zur Extrusion das selektive Binden durch eine signifikant größere geometrische Freiheit auszeichnet, sollte in dem Projekt dieses letztere Verfahren untersucht werden. Allerdings wiesen mit selektivem Binden hergestellte Bauteile bisher erhebliche Mängel in Hinblick auf die Materialeigenschaften auf. Wesentliches Ziel des Vorhabens war es deshalb, konstruktiv relevante Werte für die Dauerhaftigkeit und die Festigkeit zu erhalten, welche denen von herkömmlich gefertigtem Normalbeton entsprechen. Dabei sollte für den Beton auf das bewährte Bindemittel Portlandzement (calciumsilikatbasierter Zement) zurückgegriffen werden und als Gesteinskörnung sollte Sand zum Einsatz kommen. Des Weiteren sollte im Projekt das selektive Binden in zwei Verfahrensvarianten parallel und vergleichend untersucht werden (Bild 1): Bei der Variante

be produced. However, while additive manufacturing is already state-of-the-art in many industries, it is still in an early stage of development in the field of civil engineering. There are neither sufficiently large devices available for applications in the building industry, nor can the available equipment be used to produce materials that meet the requirements for building materials. It was therefore sensible to research additive manufacturing with concrete in a sub-project of the Priority Programme SPP 1542 „Concrete Light“.

2 Goals

Additive manufacturing using concrete can be realized by two fundamentally different processes: In extrusion, fresh concrete is applied in strands through a nozzle. In selective binding, a liquid is applied to thin layers of a dry bulk material, thereby consolidating the areas where the concrete component is to be produced.

Compared to extrusion, selective binding offers a significantly greater geometric freedom, which is why it was chosen as the focus of this project‘s investigation. However, components produced with selective binding have so far shown considerable deficiencies regarding their material properties. Therefore, the main goal of the project was to obtain values for durability and strength suitable for construction purposes, comparable to conventionally produced concrete. For the concrete, regular Portland cement (calcium silicate-based cement) as a binder and sand aggregate was to be used. Furthermore, two process variants of selective binding (Fig. 1) were to be investigated in parallel and compared: In the *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI) variant, cement paste is applied in layers of aggregate, while in the *Selective Cement Activation* (SCA) variant, water is applied in layers of a dry mixture of aggregate and cement. On this basis, the aim was to optimize processes and materials.

Selective Cement Paste Intrusion (SPI) wird Zementleim in Schichten aus Gesteinskörnung, bei der Variante *Selective Cement Activation* (SCA) wird Wasser in Schichten eines Trockengemisches aus Gesteinskörnung und Zement eingebracht. Auf dieser Grundlage galt es, Prozesse und Materialen zu optimieren.

3 Durchführung des Forschungsvorhabens (cbm/hb)

3.1 Entwicklung und Bau von Versuchsgeräten (hb)

3.1.1 Einführung

Beide der in diesem Vorhaben untersuchten Verfahren arbeiten nach demselben Schichtbauprinzip. In einem digitalen Vorprozess wird ein digitales 3D-Modell des herzustellenden Objekts virtuell in Schichten zerlegt, deren Höhen den späteren Schichtdicken im Bauteil entsprechen. Diese Informationen werden vom 3D-Drucker genutzt, um das Objekt schichtweise aufzubauen. Im physischen 3D-Druckprozess wird eine Schicht ungebundenes Trockenmaterial (SPI: lose Gesteinskörnung; SCA: Mischung aus Sand und Zement) in der gewünschten Dicke gleichmäßig auf einer Bauplattform verteilt und geglättet. Anschließend wird eine flüssige Komponente (SPI: Zementleim; SCA: Wasser) nur dort auf die trockene Schicht aufgebracht, wo das Material gebunden werden soll. Es folgen weitere Schichten Trockenmaterial und Flüssigkeitsauftrag im Wechsel, bis das gewünschte Objekt fertiggestellt ist. Abschließend muss das Bauteil vom umgebenden, nicht gebundenen Trockenmaterial befreit werden.

Für die technische Umsetzung war es erforderlich, neue Geräte zu entwickeln, die sich für die Herstellung selektiv gebundener Betonbauteile eignen. Für beide Verfahrensvarianten werden ähnliche Grundanforderungen an das Versuchsgerät gestellt. Diese sind:

- ein Bauraum mit einer schrittweise einstellbaren Höhe für die Herstellung von Schichten aus

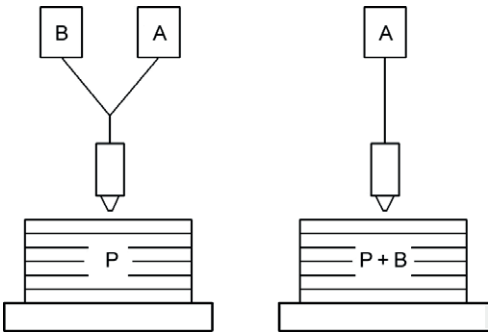

Bild 1: Verfahrensvarianten des selektives Bindens; links: *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI) und rechts: *Selective Cement Activation* (SCA); mit P: Partikel (Gesteinskörnung), B: Bindemittel (Zement) und A: Aktivator (Wasser) | **Fig. 1:** Process variants for selective binding; left: *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI) and right: *Selective Cement Activation* (SCA); with P: particles (aggregates), B: binder (cement) and A: activator (water)

3 Implementation of the research project (cbm/hb)

3.1 Development and construction of experimental equipment (hb)

3.1.1 Introduction

Both of the processes investigated in this project work according to the same layered manufacturing principle. In a digital pre-process, a digital 3D model of the object to be produced is virtually broken down into layers whose heights correspond to the later layer thicknesses in the component. This information is used by the 3D printer to build the object layer by layer. In the physical 3D printing process, a layer of unbound dry material (SPI: loose aggregate; SCA: mixture of sand and cement) of the desired thickness is evenly distributed and smoothed on a build platform. A liquid component (SPI: cement paste; SCA: water) is then applied to the dry layer only where the material is to be bound. Further layers of dry material and liquid application follow alternately until the desired object is completed. Finally, the component must be freed from the surrounding, unbound dry material.

For the technical implementation, it was necessary to develop new equipment suitable for the production of selectively bonded concrete

Trockenmaterial mit einer definierter Schichtdicke,
- Düsen mit einer geeigneten Förder- und Steuertechnik für den Eintrag der flüssigen Komponente in das Trockenmaterial,
- eine maschinelle Führung der Düsen mittels CNC-Technik.

3.1.2 *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI)

Für die Verfahrensvariante *Selective Cement Paste Intrusion* wurde ein eigens entwickelter Bauraum (L × B × H = 375 mm × 305 mm × 250 mm, Bild 2) mit einer höhenverstellbaren Bauplattform mit einem kommerziellen CNC-Portal kombiniert. Der Druckkopf besteht aus einer Einzeldüse, die an der Werkzeugaufnahme des Portals befestigt ist. Die flüssige Komponente, in diesem Fall der Zementleim, wird durch eine Schlauchpumpe gefördert. Sowohl das CNC-Portal als auch die Motoren für die Bauplattform und die Schlauchpumpe werden zusammen über eine Open-Source 3D-Drucker-Firmware gesteuert. Das Trockenmaterial (Quarzsand mit Korngrößen zwischen 0,7 und 3,2 mm) wurde bei den Versuchen mit dieser Verfahrensvariante von Hand ausgebracht und geglättet.

3.1.3 *Selective Cement Activation* (SCA)

Bei der Verfahrensvariante *Selective Cement Activation* kamen zwei verschiedene Versuchsgeräte zum Einsatz.

Das erste Gerät wurde speziell für die Herstellung von Prüfprismen für Materialversuche konzipiert. Es besteht aus einem Bauraum mit einer höhenverstellbaren Bauplattform, der mit einem kommerziellen CNC-Portal kombiniert ist. Als Düse kommt hier eine Flachstrahldüse mit Magnetventil zum Einsatz, mit der sich das Wasser lokal begrenzt auf die trockene Sand-Zement-Mischung auftragen lässt. Die Genauigkeit des Wasserauftrags lässt sich durch die Verwendung von Schablonen noch weiter steigern. Anders als bei der Variante SPI gestaltete sich jedoch das Ausbringen des Trockenmaterials hier als schwieriger, da die Mischung aus Sand und Zement zum Agglomerieren neigt und we-

components. For both process variants, similar basic requirements are placed on the experimental equipment. These are:

- a build chamber with a stepwise adjustable height for the production of layers of dry material with a defined layer thickness,
- nozzles with suitable fluid transport and control technology for the introduction of the liquid component into the dry material,
- an automatic control of the nozzles by means of CNC technology.

3.1.2 Selective Cement Paste Intrusion (SPI)

For the *Selective Cement Paste Intrusion* process variant, a specially developed build chamber (L × W × H = 375 mm × 305 mm × 250 mm, Fig. 2) with a height-adjustable building platform was combined with a commercial CNC portal. The print head consists of a single nozzle, which is attached to the tool holder of the portal. The liquid component, in this case the cement paste, is conveyed by a peristaltic pump. The CNC portal and the motors for the building platform and the peristaltic pump are controlled together via open source 3D printer firmware. The dry material (quartz sand with grain sizes between 0.7 and 3.2 mm) was spread and smoothed by hand during the tests with this process variant.

3.1.3 Selective Cement Activation (SCA)

For the SCA process variant, two different experimental devices were used.

Bild 2: Bauraum des SPI-Druckers während des Drucks mit Einzeldüse und bedruckter Quarzsandschicht | **Fig. 2:** Build chamber of the SPI printer during printing with nozzle and printed layer

nig rieselfähig ist. Die Herstellung der Schichten per Hand führte daher zu keinem zufriedenstellenden Ergebnis. Aus diesem Grund wurde ein spezieller Dispenser entwickelt, mit dem die Sand-Zement-Mischung über eine Flügelwelle durch ein Sieb ausgebracht werden kann. Mittels einer Walze wird anschließend die zunächst noch lockere Materialschicht glatt abgezogen und verdichtet (Bild 3). Bei diesem Gerät wurde ebenfalls auf Open-Source-Software zurückgegriffen, mit der sich alle Komponenten des Druckers steuern lassen.

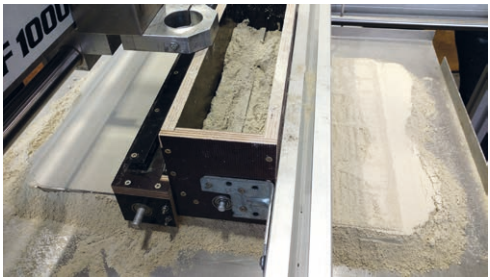

Bild 3: Dispenser für die Herstellung der Materialschicht; rechts: frisch aufgetragenes Material, links: geglättete und verdichtete Schicht | **Fig. 3:** Dispenser for creating dry material layers; right: freshly dispensed material, left: smoothed and compacted layer

Basierend auf den mit dem ersten Versuchsgerät erzielten Erkenntnissen wurde eine zweite Version entwickelt (Bild 4). In dem größeren Bauraum mit den Abmessungen L × B × H = 600 mm × 450 mm × 500 mm lassen sich mehrere Prüfkörper gleichzeitig und auch große Bauteile anfertigen. Aufgrund des damit verbundenen höheren Gewichtes der Trockenmischung wurde zum Einstellen der Schichtdicke die höhenverstellbare Bauplattform durch eine motorisierte Gleitschalung ersetzt. Anstelle der Flachstrahldüse wurde ein spezieller Druckkopf mit zunächst 8 durch Magnetventile gesteuerte Einzeldüsen in das System integriert, mit dem das Wasser mit einer Auflösung von einem Millimeter (25,4 DPI) aufgetragen werden kann. Gesteuert wird das Gerät von einer Kombination aus kommerzieller CNC-Software und einer speicherprogrammierbaren Steuerung. Mit diesem Setup lassen sich auch freigeformte 3D-Objekte herstellen. Als Übergang zum DFG-Erkenntnistransferprojekt „Industrieller 3D-Betondruck durch selektive

The first device was specially designed for the production of material test prisms. It consists of a build chamber with a height-adjustable construction platform combined with a commercial CNC portal. The nozzle used here is a flat jet nozzle with a solenoid valve, with which the water can be applied locally to the dry sand-cement mixture. The accuracy of the water application can be further increased by using stencils. In contrast to the SPI process variant, the application of the dry material proved to be more difficult, as the mixture of sand and cement tends to agglomerate and is not free flowing. Therefore, producing the layers by hand did not lead to a satisfactory result. For this reason, a special dispenser was developed with which the sand-cement mixture can be spread through a sieve via a vane roller. A rotating shaft then smooths and compacts the initially still loose material layer (Fig. 3). This device, as well as the other components of the printer, is controlled by open source software.

A second version was developed based on the findings obtained with the first experimental device (Fig. 4). With a larger build chamber (L × W × H = 600 mm × 450 mm × 500 mm), several test specimens can be produced simultaneously and large components can be manufactured. Due to the resulting increased weight of the dry mix, the height-adjustable construction platform was replaced by a motorized sliding mould to adjust the layer thickness. Instead of the flat jet nozzle, a special print head with initially 8 individual nozzles controlled by magnetic valves was integrated into the system, with which the water can be applied with a resolution of one millimetre (25.4 dpi). The device is controlled by a combination of commercial CNC software and a programmable logic controller. With this setup, it is also possible to produce freeform 3D objects. As a transition to the DFG knowledge transfer project “Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications”, the device was upgraded to 32 nozzles.

During a stay abroad at the University of California in Berkeley (USA), Dirk Lowke also carried

Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen“ wurde das Gerät auf 32 Düsen aufgerüstet.

Zusätzlich führte Dirk Lowke im Rahmen eines Auslandsaufenthaltes an der University of California in Berkeley (USA) Versuche zum Einfluss der Granulometrie auf die Festigkeit und Formtreue sowie zur Übertragbarkeit der Ergebnisse auf andere Druckersysteme durch. Bei dem dort verwendeten Drucker handelte es sich um ein kommerziell erhältliches Gerät (Z Corp, ZPrinter 310) mit einem Bauraum von L × B × H = 200 mm × 250 mm × 200 mm und einer Auflösung von 300 × 450 dpi. Als Düsentechnologie kam hier ein Piezzodüsenarray zum Einsatz, das nur wesentlich geringere Schichtdicken von 0,1 mm im Gegensatz zu den im Rahmen des SPP-Projekts entwickelten Druckersystemen zulässt.

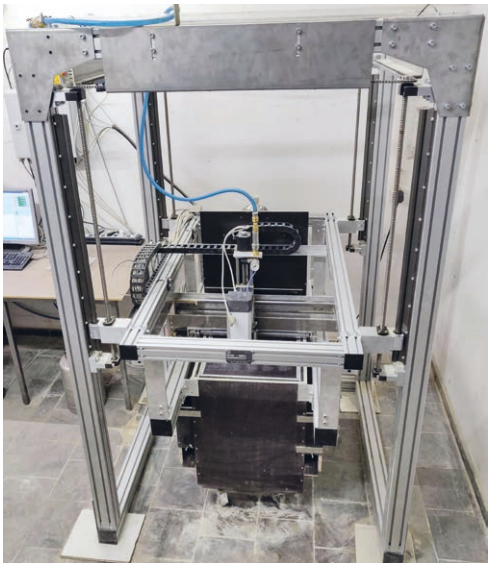

Bild 4: Prototyp des Druckers für die selektive Zementaktivierung | **Fig. 4:** Prototype 3D printer for selective cement activation

3.2 *Selective Cement Paste Intrusion* (cbm)

3.2.1 Zielsetzung und durchgeführte Untersuchungen

Bei der Anwendung der SPI wird Gesteinskörnung in einem Größenbereich von 0,7 mm bis 3,2 mm für das Partikelbett verwendet. Je kleiner die Gesteinskörnung, desto größer wird der Fließwiderstand des Partikelbetts. Damit der Zementleim in das Partikelbett eindringen kann, muss dieser in Abhängigkeit der Gesteinskörnung fließfähig genug sein. Die Eindringfähigkeit wird hauptsächlich über die Rheologie (Fließgrenze und Viskosität) gesteuert. Zu beachten ist hierbei, dass der Zementleim bei zu großer Fließfähigkeit in Abhängigkeit der Dispergierung der Zementpartikel zum Entmischen neigt. Um diesen Effekt auszuschließen und grundsätzlich geeignete Zementleimkombinationen zu erhalten, wurde zunächst die Stabilität der sehr fließfähigen Zementleime untersucht (s. Abschnitt 3.2.2). Danach wurde der Einfluss der Fließgrenze auf das Eindringverhalten der Zementleime in Abhängigkeit des Fließwiderstandes der Gesteinskörnung untersucht (s. Abschnitt 3.2.3). In Abschnitt 3.2.4 wird gezeigt, dass das Eindringverhalten auch eine entscheidende Rolle für die Formtreue spielt.

out experiments on the influence of granulometry on strength and dimensional stability and on the transferability of the results to other printing systems. The printer used there was a commercially available device (Z Corp, ZPrinter 310) with a build chamber of L × W × H = 200 mm × 250 mm × 200 mm and a resolution of 300 × 450 dpi. The nozzle technology used is a piezo nozzle array, which only allows much thinner layers of 0.1 mm in contrast to the printer systems developed within the SPP project.

3.2 Selective Cement Paste Intrusion (cbm)

3.2.1 Objectives and investigations carried out

Aggregates in a size range from 0.7 to 3.2 mm are used for the particle bed of the SPI process. The smaller the aggregate, the greater the flow resistance of the particle bed. For the cement paste to penetrate the particle bed, it must be sufficiently fluid, depending on the aggregate. Penetrability is mainly controlled by rheology (yield point and viscosity). It should be noted here that if the fluidity is too high, the cement paste tends to segregate depending on the dis-

Danach wird in Abschnitt 3.2.5 erläutert, ob sich das Material für eine Anwendung unter realen Bau- und Umgebungsbedingungen eignet (Dauerhaftigkeit) und von welchen Faktoren eine gute Festigkeit mittels SPI hergestellter Bauteile abhängig ist. Abschließend werden in Abschnitt 3.2.6 Demonstratoren gezeigt, die einen Ausblick geben, welche Auflösung und Komplexität mit den in Abschnitt 3.2.5 präsentierten Materialeigenschaften realisiert werden kann.

3.2.2 Nachweis der Stabilität fließfähiger Zementleime

Ein wichtiger Bestandteil für den Erfolg der SPI ist, die Stabilität der Zementleime über die gesamte Verarbeitungsdauer bei sehr hoher Fließfähigkeit zu gewährleisten. Hierzu wurden Blutversuche an verschiedenen Zementleimen mit w/z-Werten von 0,3, 0,4 und 0,5 sowie Ausbreitfließmaßen zwischen 300 mm und 400 mm über 180 min durchgeführt Dazu wurden 300 ml Zementleim in 400 mm hohe Glaszylinder mit einem Durchmesser von 35 mm gefüllt und das Blutwasser zu festgelegten Zeitpunkten mithilfe eines Messschiebers bestimmt. Die Zusammensetzung der verschiedenen Zementleime können [2] und die Ergebnisse der Untersuchungen Bild 5 und [2] entnommen werden.

Zur Interpretation der Ergebnisse wurden Grenzbedingungen aus der Literatur für Beton herangezogen. Um trotzdem Schlussfolgerungen zu Ergebnisse der Zementleime ziehen zu können, wurden die Grenzwerte auf den Leimgehalt der Betonrezeptur umgerechnet. In Wagner et al. [3] ist ein Grenzwert von 3,2 kg/m³ bezogen auf den Zementleim für Sichtbeton und von 9,4 kg/m³ bezogen für Konstruktionsbeton angegeben. Daher wurde in Bild 5 der Bereich zwischen 3,2 und 9,4 kg/m³ als akzeptables Bluten bezeichnet. Alle untersuchten Zementleime mit Fließmittel zeigten ein akzeptables Maß an Blutwasser. Lediglich der Zementleim ohne Fließmittel mit einem w/z-Wert von 0,5 und einem Ausbreitfließmaß von 350 mm (0.5/350-no SP) erreichte kein akzeptables Maß oberhalb der Grenzwerte. Dies liegt vermutlich in dem fehlenden dispergierenden Effekt der

persion of the cement particles. In order to exclude this effect and to obtain generally suitable cement paste combinations, the stability of the free-flowing cement pastes was first examined (see Section 3.2.2). Afterwards, the influence of the yield point on the penetration behaviour of the cement paste was investigated as a function of the flow resistance of the aggregate (see section 3.2.3). Section 3.2.4 shows that the penetration behaviour also plays a decisive role for the shape accuracy. Afterwards, section 3.2.5 explains whether the material is suitable for an application under real construction and environmental conditions (durability) and which factors determine a good strength of components produced by SPI. Finally, in section 3.2.6, demonstrators are shown which give an outlook on the resolution and complexity that can be realized with the material properties presented in section 3.2.5.

3.2.2 Proof of stability of flowable cement glues

An important component for the success of the SPI is to ensure the stability of the cement pastes over the entire processing time with very high flowability. Bleeding tests were carried out on various cement pastes with w/c values of 0.3, 0.4 and 0.5 and slump flow diameters between 300 mm and 400 mm over 180 minutes. For this, 300 ml of cement paste was filled into a 400 mm high glass cylinders with a diameter of 35 mm and the bleed water was determined at specified times using a caliper gauge. The composition of the various cement pastes can be seen in [2] and the results of the tests in Figs. 5 and [2].

Boundary conditions from literature for concrete were used to interpret the results. In order to draw conclusions from the results of the cement glues, the boundary values were adjusted according to the glue content of the concrete formulation. In Wagner et al. [3] a boundary value of 3.2 kg/m³ related to the cement paste for exposed concrete and 9.4 kg/m³ for structural concrete is given. Therefore, in Fig. 5, the range between 3.2 and 9.4 kg/m³ was described as acceptable bleeding. All examined cement pastes

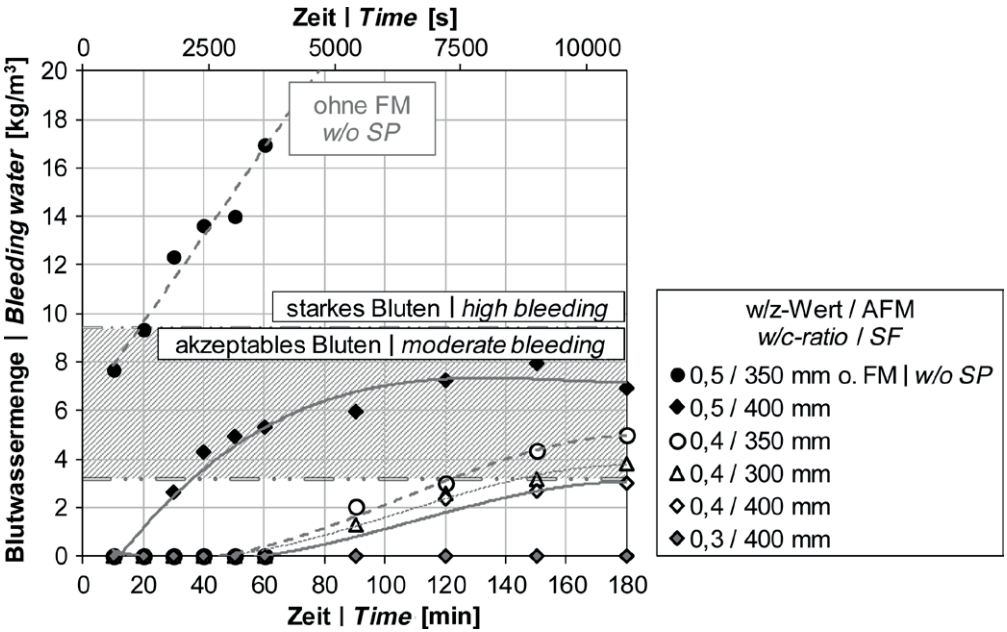

Bild 5: Untersuchung der Stabilität (Bluten) der Leime (SP = Mischungen mit Fließmittel, AFM = Ausbreitfließmaß) | **Fig. 5:** Stability (bleeding) of the cement pastes (SP = mixtures with superplasticizers, SF = mini slump flow)

Fließmittel begründet [4]. Von den untersuchten Leimen lagen zwei unter dem kritischen Grenzwert für Sichtbetonbauwerke von 3,2 kg/m³ (0.4/400-SP und 0.3/400-SP, untere gestrichelte Linie), wobei der Leim mit einem w/z-Wert von 0,3 und einem Ausbreitfließmaß von 400 mm (0.3/400-SP) über den ganzen Untersuchungszeitraum kein Bluten zeigte und somit für die folgenden Versuche als Referenzleim festgelegt wurde.

3.2.3 Einfluss der Betontechnologie (Rheologie) auf die Eindringtiefe des Zementleims

Wird ein stabiler Zementleim verwendet, ist der Schichtenverbund (und damit die Festigkeit sowie die Dauerhaftigkeit) maßgeblich von der Eindringtiefe des Zementleims abhängig. Bei einem vollständigen Schichtenverbund sind alle Hohlräume zwischen den einzelnen Gesteinskörnern gefüllt. Wenn der Zementleim nicht vollständig in das Partikelbett eindringen kann, bilden sich Fehlstellen, s. Bilder 6 und 7, die die Festigkeit und Dauerhaftigkeit negativ beeinflussen [5].

with superplasticizer showed an acceptable level of bleeding. Only the cement paste without superplasticizer with a w/c value of 0.5 and a flow spread of 350 mm (0.5/350-no SP) did not reach an acceptable level above the limits. This is probably due to the lack of a dispersing effect of the superplasticizer [4]. Of the glues investigated, two were below the critical limit value for exposed concrete structures of 3.2 kg/m³ (0.4/400-SP and 0.3/400-SP, lower dotted line). The glue with a w/c value of 0.3 and a flow spread of 400 mm (0.3/400-SP) showed no bleeding over the entire period of investigation and was thus defined as the reference glue for the following tests.

3.2.3 Influence of concrete technology (rheology) on the penetration depth of the cement paste

If a stable cement paste is used, the layer bond (and thus the strength and durability) depends largely on the penetration depth of the cement paste. In the case of a complete layer bond, all cavities between the individual aggregates are

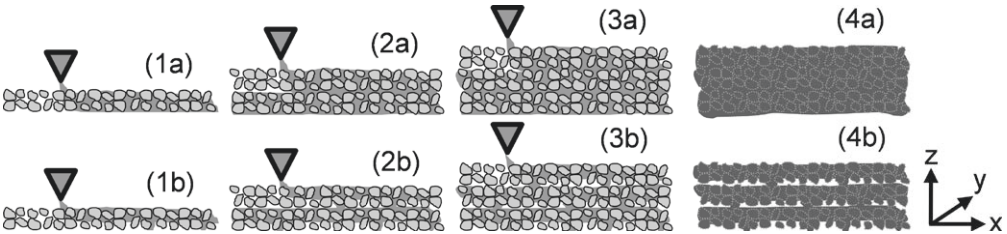

Bild 6: Produktionsprozess mit (1a)–(4a) vollständigem Schichtenverbund (Ausfüllung der Hohlräume) und mit (1b)–(4b) unvollständigem Schichtenverbund (nur teilweise Ausfüllung der Hohlräume) | **Fig. 6:** Production process with (1a)–(4a): complete bonded layers (filled voids) and (1b)–(4b): with incomplete bonded layers (only partially filled voids)

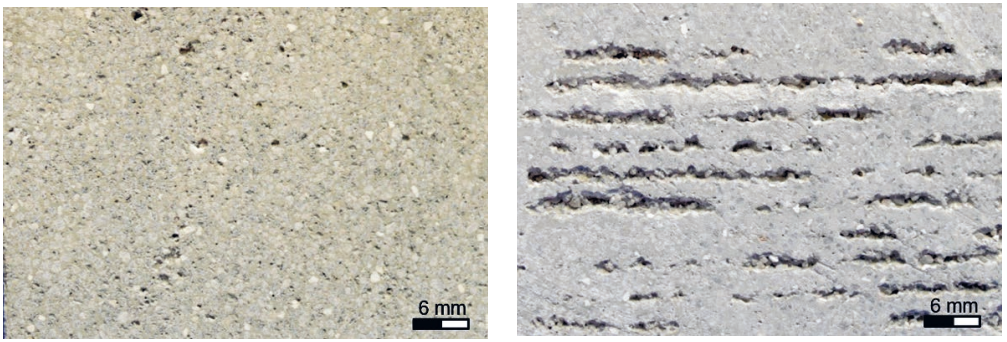

Bild 7: Querschnitt eines mit SPI gefertigten Objekts; links: mit vollständigem Schichtenverbund (Ausfüllung der Hohlräume) und rechts: mit unvollständigem Schichtenverbund (nur teilweise Ausfüllung der Hohlräume) | **Fig. 7:** Cross sections of objects produced via SPI; left: with complete bonded layers (filled voids), right: incompletely bonded layers (only partially filled voids)

Bild 8 und Untersuchungen in [2], [5]–[9] zeigten, dass die Eindringtiefe (bzw. *penetration ratio* Φ_{pen} = Eindringtiefe / Schichtdicke) maßgeblich von der Fließgrenze des Zementleims und dem mittleren Durchmesser der eingesetzten Gesteinskörnung abhängig sind. Dieser Zusammenhang konnte auch analytisch in [8] nachgewiesen werden. Dabei wurde die dynamische Fließgrenze τ_0 [Pa] 10 min nach Wasserzugabe rotatorisch in einer Vane-Zelle bestimmt und mit dem Bingham-Ansatz ausgewertet [10], [11]. Dies geschah mittels der Reiner-Riwlin-Gleichung und der Annahme eines nur teilweise gescherten Spalts (*plug flow*). Des Weiteren zeigten die oben genannten Untersuchungen, dass eine ausreichende Eindringtiefe durch eine möglichst niedrige Fließgrenze erreicht wird. Zusätzlich spielt die Feuchtigkeit der Gesteinskörnung eine große Rolle [2], [6]–[8].

filled. If the cement paste cannot penetrate completely into the particle bed, defects are formed, see Figs. 6 and 7, which have a negative effect on strength and durability [5].

Fig. 8 and investigations in [2], [5]–[9] showed that the penetration depth (or penetration ratio Φ_{pen} = penetration depth / layer thickness) is largely dependent on the yield point of the cement paste and the average diameter of the aggregates used. This correlation could also be analytically proven in [8]. The dynamic yield point τ_0 [Pa] was determined 10 min after water addition by rotation in a Vane cell and evaluated using the Bingham approach [10], [11]. This was done using the Reiner-Riwlin equation and the assumption of a partially sheared gap (*plug flow*). Furthermore, the investigations showed that a sufficient penetration depth is achieved by a lower yield point. In addition, the moisture content of the aggregate plays an important role [2], [6]–[8].

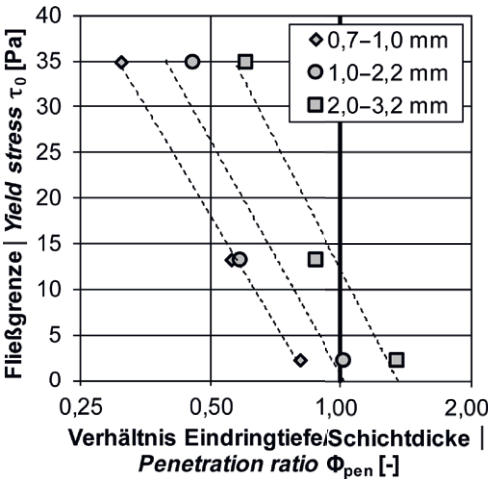

Bild 8: Verhältnis Eindringtiefe zu Schichtdicke in Abhängigkeit der Fließgrenze des Zementleims (w/z-Wert 0,35) | **Fig. 8:** Penetration ratio depending on the yield stress of the cement paste (w/c ratio 0.35)

3.2.4 Einfluss der Eindringtiefe auf die Formtreue

Für eine gute Formtreue muss die Fließfähigkeit (Fließgrenze) genau auf den Fließwiderstand der Gesteinskörnung eingestellt werden. Ist der Zementleim zu wenig fließfähig, dringt er nicht vollständig in den Probekörper ein (s. Bild 8). Dieser kann dann durch die darauffolgende Gesteinskörnungsschicht in Richtung der Aufbringung mit verzogen werden, s. Bild 9. Im Falle eines Zylinderquerschnitts wirkt sich dieser Effekt in einer elliptischen Verformung

3.2.4 Influence of the penetration depth on the shape accuracy

For good shape retention, the flowability (yield point) must be adjusted exactly to the flow resistance of the aggregate. If the cement paste does not have sufficient flowability, it will not penetrate completely into the test specimen (see Fig. 8). The paste can then be distorted by the subsequent aggregate layer in the direction of application, see Fig. 9. In the case of a cylindrical cross-section, this effect results in an elliptical deformation of the cross-sectional area. In [7] it could be shown that this distortion of the cement paste increases with an increasing yield point. On the other hand, the results in [7] show that with an increasing yield point the spread of the cement paste over the nominal dimensions of the component can be counteracted (see also Fig. 10, right). This is in contradiction with a good penetration depth or a good layer bond. This situation can be counteracted by reducing the size of the body by the expected horizontal spread during the planning process.

A corresponding correlation for the rheological properties viscosity and thixotropy could not be determined. It is assumed that the differences in viscosity and thixotropy of the cement pastes used in the project were too small to be able to recognize corresponding effects in the production process, which is subject to scattering. However, the results obtained indicate that thixotro-

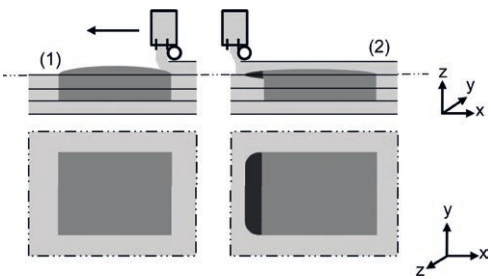

Bild 9: Einfluss der Rheologie auf die Formtreue: (1) Leim (mittelgrau) dringt nicht vollständig in das Partikelbett ein und (2) Verzug der gebundenen Schicht (dunkelgrauer Bereich) durch nicht eingedrungenen Leim | **Fig. 9:** Effect of rheology on the shape accuracy: (1) cement paste penetrates not completely in the particle-bed and (2) delay of the bonded layer (dark grey area) due to not penetrated cement paste

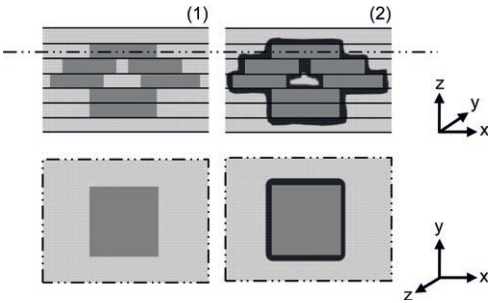

Bild 10: Einfluss der Rheologie auf die Formtreue: (1) Soll-Abmessungen des Objekts (mittelgraue Bereiche) und (2) unkontrolliertes Ausbreiten des Leims im Partikelbett (dunkelgraue Bereiche) | **Fig. 10:** Effect of rheology on the shape accuracy: (1) designated dimensions of the object (medium grey areas) and (2) uncontrolled penetration of the paste in the particle-bed (dark grey areas)

der Querschnittsfläche aus. U. a. in [7] konnte gezeigt werden, dass dieser Verzug des Zementleims mit steigender Fließgrenze zunimmt. Andererseits zeigen die Ergebnisse in [7], dass mit einer steigenden Fließgrenze der Ausbreitung des Zementleims über die Soll-Abmessungen des Bauteils (vgl. auch Bild 10, rechts) entgegengewirkt werden kann. Dies steht im Widerspruch mit einer guten Eindringtiefe bzw. einem guten Schichtenverbund. Diesem Sachverhalt lässt sich begegnen, indem im Planungsprozess der Körper um die erwartete horizontale Ausbreitung verkleinert wird.

Ein entsprechender Zusammenhang für die rheologischen Eigenschaften Viskosität und Thixotropie konnte bisher nicht gefunden werden. Es wird jedoch vermutet, dass die im Projekt eingesetzten Zementleime zu geringe Unterschiede in Viskosität und Thixotropie aufwiesen, um entsprechende Effekte in dem von Streuungen behafteten Produktionsprozess erkennen zu können. Jedoch geben die bisherigen Ergebnisse Hinweise darauf, dass die Thixotropie einen positiven Effekt auf die Formtreue (Ausbreitung des Zementleims über die Soll-Abmessungen) hat. Um dies nachweisen zu können, müssen weitere Untersuchungen unter dem Einsatz von Thixotropiermitteln und viskositätserhöhenden Additiven durchgeführt und die Probenanzahl zusätzlich erhöht werden, um die auftretenden Streuungen besser einschätzen zu können.

3.2.5 Einfluss des Eindringgrades und der Belastungsrichtung auf die Festigkeit und Dauerhaftigkeit

Aufgrund der guten Ergebnisse in den Untersuchungen zur Formtreue und der Blutneigung wurde für die weiteren Untersuchungen der Zementleim mit w/z-Wert 0,3 und Ausbreitfließmaß 300–400 mm verwendet. Des Weiteren wurde eine mittlere Gesteinskörnungsgröße (1,0–2,2 mm) ausgewählt, da diese sowohl eine gute Schichtendurchdringung als auch eine gute Oberflächenauflösung bietet. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse kann [5], [9] entnommen werden. Alle Untersuchungen wurden an geschalten Probekörpern (Referenz)

py has a positive effect on shape fidelity (spread of the cement paste over the target dimensions). In order to prove this, further investigations using thixotropic agents and viscosity-increasing additives must be carried out and the number of samples must be increased in order to better estimate the scattering that occurs.

3.2.5 Influence of the degree of penetration and the load direction on strength and durability

Due to the good results in the tests on shape fidelity and bleeding, the cement paste with a w/c value of 0.3 and a spreading flow diameter of 300 to 400 mm was used for further tests. Furthermore, a medium aggregate size (1.0 to 2.2 mm) was selected, as this offers both good layer penetration and surface resolution. A detailed presentation of the results can be found in [5], [9]. All investigations were performed on cast samples (reference) and parallel (0°) as well as perpendicular to the layers (90°).

a) Compressive strength

Fig. 11 shows the compressive strength (tested in accordance with DIN EN 12390-3:2009-07 [12]) after 7 d in relation to the bulk density, which is related to the degree of filled cavities between the aggregate. The diagram shows that with increasing bulk density or filled proportion of cavities the strength for both loading directions increases as expected. Interestingly, no influence of load direction could be observed. Therefore, an almost isotropic component behaviour can be assumed. As in classical concrete construction, the strength depends on the void content. This is confirmed by the classification of the switched reference specimens (light blue circles), which are conventionally produced in the casting process and which have the same dependency. Overall, compressive strengths of up to 78 MPa after 7 d are achieved.

b) Frost resistance

The resistance against a pure freeze-thaw attack (CIF) and the intensified freeze-thaw attack

und parallel (0°) sowie senkrecht zur Schichtung (90°) durchgeführt.

a) Druckfestigkeit

Bild 11 zeigt die Druckfestigkeit (geprüft in Anlehnung an die DIN EN 12390-3:2009-07 [12]) nach 7 d bezogen auf die Rohdichte, die mit dem Grad an gefüllten Hohlräumen zwischen der Gesteinskörnung in Zusammenhang steht. Das Diagramm zeigt, dass mit steigender Rohdichte bzw. gefülltem Anteil an Hohlräumen die Festigkeit für beide Belastungsrichtungen erwartungsgemäß steigt. Interessant zu beobachten war, dass die Belastungsrichtung hierbei keinen Einfluss zeigt. Daher kann von einem nahezu isotropen Bauteilverhalten ausgegangen werden. Somit gilt wie im klassischen Betonbau, dass die Festigkeit vom Hohlraumgehalt abhängig ist. Dies wird durch die Einordnung der geschalten, konventionell im Gießverfahren hergestellten Referenzprobekörper (hellblaue Kreise) bestätigt, die sich in derselben Abhängigkeit befinden. Insgesamt werden Druckfestigkeiten von bis zu 78 MPa nach 7d erreicht.

b) Frostwiderstand

Der Widerstand gegenüber einem reinen Frostangriff (CIF) und dem verschärften Frost-Tausalz-Angriff (CDF) wurden in Anlehnung an die DIN CEN/TS 12390-9 [13] durchgeführt. Beim CIF-Test blieben alle Ergebnisse deutlich unter dem geforderten Abnahmekriterium von maximal 1.000 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW), links in Bild 12. Die für den CIF-Test maßgebende Messung des relativen dynamischen E-Moduls ließ bei keiner der Serien auf eine innere Schädigung (relativer dynamischer E-Modul ≥ 75 %) schließen, weder nach 28 FTW, noch nach 56 FTW [14]. Auch hier zeigen die Probekörper kein auffälliges anisotropes Verhalten.

Auch beim CDF-Test (Bild 12, rechts) blieben die Abwitterungen der einzelnen Serien auch noch nach 56 d unterhalb des lt. [14] geforderten 28-d-Grenzwerts von 1.500 g/m². Auch der dynamische E-Modul aller Probekörper bewegte sich über dem geforderten Abnahmekriterium nach

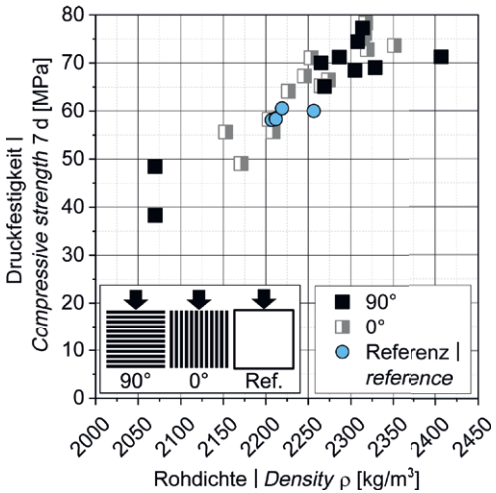

Bild 11: Druckfestigkeit nach 7 d bezogen auf die Dichte bzw. den Füllgrad der Luftporen zwischen der Gesteinskörnung |
Fig. 11: Compressive strength after 7 d depending on the density and the filling of the voids between the aggregates, respectively

(CDF) was carried out in accordance with DIN CEN/TS 12390-9 [13]. In the CIF test, all results remained well below the required acceptance criterion of a maximum of 1,000 g/m² after 28 freeze-thaw cycles (FTW), left in Fig. 12. The measurement of the relative dynamic modulus of elasticity decisive for the CIF test did not indicate internal damage (relative dynamic modulus of elasticity ≥ 75 %) in any of the series, neither after 28 FTW nor after 56 FTW [14]. Again, the test specimens do not show any noticeable anisotropic behaviour.

Even in the CDF test (Fig. 12, right), the weathering of the individual series remained below the 28-d limit of 1,500 g/m² required by [14] even after 56 d. The dynamic modulus of elasticity of all test specimens was above the required acceptance criterion of 75% according to [14]. The test specimens are therefore considered to be resistant to freeze-thaw with de-icing salt. One reason for this is probably the low w/c value of 0.3 and the relatively high void contents.

c) Carbonation resistance

In order to be able to reinforce components later on, the carbonation resistance was deter-

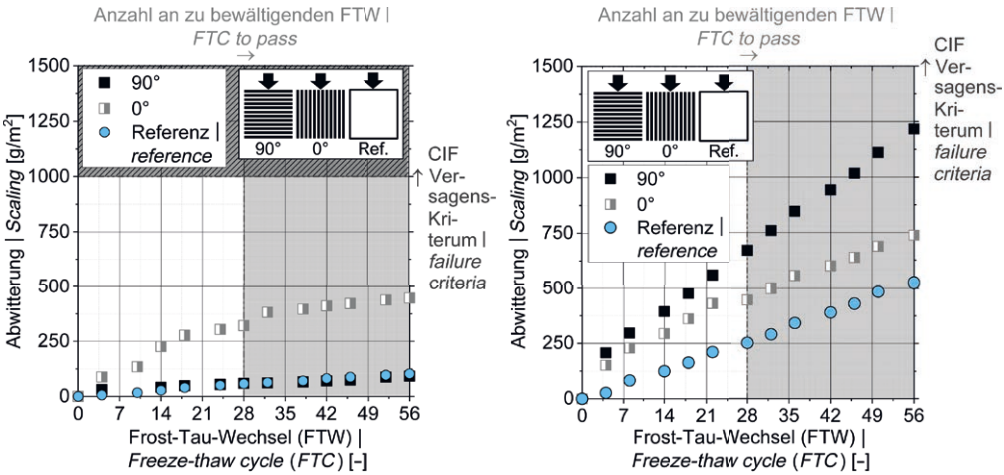

Bild 12: Frostwiderstandsprüfungen; gemittelte Abwitterungen CIF (links) und CDF (rechts), jeweils aufgetragen über die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW) | **Fig. 12:** Frost resistance tests; left: average scaling CIF, and right: average scaling CDF, depending on the number of the freeze-thaw cycles (FTC)

[14] von 75 %. Somit gelten die Probekörper als Frost-Tausalz-beständig. Ein Grund hierfür liegt vermutlich in dem geringen w/z-Wert von 0,3 und den relativ hohen Hohlraumgehalten.

c) Karbonatisierungswiderstand

Um Bauteile später auch bewehren zu können, wurde der Karbonatisierungswiderstand in Anlehnung an die DIN CEN/TS 12390 [15] unter atmosphärischen Bedingungen und einem erhöhten CO_2-Gehalt von 2 % bestimmt. Die Probekörper wurden 1 d nach Herstellung aus dem Druckbett entfernt bzw. ausgeschalt und lagerten anschließend bis zum 7. Tag unter Wasser. Danach wurden die Probekörper bis zum Beginn der Prüfung bei 20°C und 65 % relativer Feuchte gelagert. Für die Prüfung unter atmosphärischen Bedingungen verblieben die Probekörper in dem entsprechenden Klima. Für die Prüfung unter erhöhter CO_2-Beaufschlagung wurden die Probekörper anschließend für 28 d bei 2 % CO_2-Konzentration gelagert.

Nach den Prüfzeiträumen wies keiner der Probekörper eine erkennbare Karbonatisierung auf. Damit eignen sich die betrachteten Betone grundsätzlich für bewehrte Bauteile. Dies kann – wie schon der hohe Frost-/Frost-Tausalz-Widermined according to DIN CEN/TS 12390 [15] under atmospheric conditions and an increased CO_2 content of 2%. The test specimens were removed or stripped from the pressure bed 1 d after production and then stored under water until the 7th day. Afterwards, the specimens were stored at 20 °C and 65% relative humidity until testing. For testing under atmospheric conditions, the specimens remained in the appropriate climate. For the test under increased CO_2 exposure, the specimens were then stored for 28 d at 2% CO_2 concentration.

After the test periods, none of the test specimens showed any detectable carbonation. Thus, the concrete mixes under consideration are generally suitable for reinforced components. This can be explained by the low w/c value of 0.3, as was the case with the high freeze-thaw resistance.

3.2.6 Demonstrators (cbm/hb)

Within the scope of the research project, several small-format demonstrators were produced to demonstrate the possible achievable complexity of components when using the SPI process. Two examples are shown in the Figs. 13 and 14.

stand – mit dem geringen w/z-Wert von 0,3 begründet werden.

3.2.6 Demonstratoren (cbm/hb)

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden mehrere kleinformatige Demonstratoren hergestellt, um die mögliche erreichbare Komplexität von Bauteilen bei Anwendung des SPI-Verfahrens zu demonstrieren. Zwei Beispiele sind in Bild 13 und Bild 14 zu sehen.

3.2.7 Fazit SPI

Das Ziel, die grundlegenden Mechanismen der SPI zur Beeinflussung der Formtreue und der Festigkeit zu verstehen, wurde erreicht. Dabei wurden Kenntnisse über die notwenige rheologische Beschaffenheit der Zementleime gewonnen. Es konnte gezeigt werden, dass Objekte, die mit einem w/z-Wert von 0,3 hergestellt werden, Festigkeiten von bis zu 78 MPa nach 7 d erreichen können. Ein anisotropes Verhalten der Probekörper konnte nicht festgestellt werden. Lediglich besteht der auch aus dem geschalten Betonbau bekannte Zusammenhang zwischen der Rohdichte und der Festigkeit des Materials. Da die Rohdichte direkt mit dem Hohlraumgehalt der Objekte korreliert, sollte der Druckpro-

3.2.7 Summary SPI

The goal of understanding the basic mechanisms of SPI to influence shape fidelity and material strength was achieved. In the process, knowledge was gained about the necessary rheological properties of the cement pastes. It could be shown that objects produced with a w/c-ratio of 0.3 can reach strengths of up to 78 MPa after 7 d. An anisotropic behaviour of the specimens could not be determined. A correlation between the bulk density and the strength of the material was observed, which is also known from conventional formwork concrete construction. Since the bulk density correlates directly with the void content of the objects, the printing process should be designed in such a way that the voids between the rock particles are filled with cement paste as thoroughly as possible. This can be achieved by selecting suitable process parameters and ensuring that the glue has sufficient flowability (rheology). For this purpose, further experiments with specifically varied rheology and process parameters, such as filling patterns or nozzle shapes, will have to be carried out in the future.

At the same time, a sufficient durability against freeze-thaw attacks and carbonation was deter-

Bild 13: Helix, hergestellt durch *Selective Cement Paste Intrusion* | **Fig. 13:** Helix, manufactured by *Selective Cement Paste Intrusion*

Bild 14: Innen verstrebtes Rohr, hergestellt durch *Selective Cement Paste Intrusion* | **Fig. 14:** Pipe with internal structures manufactured by *Selective Cement Paste Intrusion*

zess so gestaltet werden, dass die Hohlräume zwischen den Gesteinskornpartikeln möglichst vollständig mit Zementleim gefüllt werden. Dies kann durch die Wahl von geeigneten Prozessparametern und eine ausreichende Fließfähigkeit (Rheologie) des Leims erreicht werden. Hierzu müssen zukünftig weitere Versuche mit gezielt variierten Rheologie- und Prozessparametern, wie Füllmustern oder Düsenformen, durchgeführt werden.

Gleichzeitig wurde eine ausreichende Dauerhaftigkeit gegenüber Frost-/Frost-Tausalz-Angriffen und Karbonatisierung festgestellt. Auch hier konnte kein anisotropes Verhalten festgestellt werden. Jedoch kann im Falle der CIF/CDF-Prüfungen aufgrund der kleinen Anzahl an geprüften Probekörper noch keine belastbare Aussage getroffen werden. Hierzu müssen noch weitere Versuche mit variierendem Hohlraumgehalt durchgeführt werden.

3.3 *Selective Cement Activation* (cbm/hb)

3.3.1 Zielsetzung und durchgeführte Untersuchungen

Zielsetzung der Untersuchungen zur SCA war es, die prozess- und materialtechnologischen Grundlagen für eine Herstellung von Bauteilen aufzuzeigen. Aufgrund der Herstellungstechnologie müssen zunächst andere Aspekte als bei der SPI grundlegend untersucht werden. Für eine gute Festigkeit und Formtreue kommt es vor allem auf eine gleichmäßige Durchdringung der Schichten des Partikelbetts durch den Aktivator – das Wasser – an. Zusätzlich spielt bei einer drucklosen Beaufschlagung des Partikelbetts mit Wasser über Flachstrahldüsen (eigens gebauter Versuchsdrucker, s. Abschnitte 3.3.2 und 3.3.4) oder Piezodüsen (Versuchsdrucker verwendet in den USA, Abschnitt 3.3.3) die Beschaffenheit des Partikelbetts eine wichtige Rolle. Die Einflussfaktoren des Bindergehalts (Zement) sowie die Verteilung des Wassers im Partikelbett werden in Abschnitt 3.3.2 betrachtet. Ebenfalls bedeutend für die Festigkeit, aber auch die Formtreue ist die Granulometrie des Partikelbetts, wie in Abschnitt 3.3.3 gezeigt.

mined. Again, no anisotropic behaviour could be observed. However, in the case of CIF/CDF tests, no reliable statement can be made due to the small number of test specimens. Further tests with varying void content must be carried out.

3.3 Selective Cement Activation (cbm/hb)

3.3.1 Objectives and investigations

The aim of the SCA investigations was to show the process and material technological fundamentals for the production of components. Due to the manufacturing technology, other aspects than those of SPI must first be fundamentally investigated. For good strength and shape retention, a uniform penetration of the particle bed layers by the activator, water, is particularly important. In addition, when the particle bed is exposed to water without pressure via flat jet nozzles (specially built test printer, see sections 3.3.2 and 3.3.4) or piezo nozzles (test printer used in the USA, section 3.3.3), the properties of the particle bed plays an important role. The influencing factors of the binder content (cement) as well as the distribution of water in the particle bed are considered in section 3.3.2. The granulometry of the particle bed, as shown in Section 3.3.3, is also important for the material strength, but also for the shape accuracy. In addition, the effects of a post-treatment on the material strength of the specimens are discussed in section 3.3.4. Furthermore, in section 3.3.5 process technological influences on the shape fidelity are shown. Finally, the potential of complex construction using SCA is demonstrated using sample objects (see section 3.3.6).

3.3.2 Influence of cement and water content on strength (cbm)

In order to test the influence of binder and water content on the material strength, prisms with a layer thickness of 1 mm and w/c values between 0.12 and 0.85 were produced using a flat jet nozzle and a printer specially built for this project. The cement content in the particle bed was varied between 20 and 40 % by volume. A calcium

Zusätzlich werden in Abschnitt 3.3.4 die Auswirkungen einer Nachbehandlung auf die Festigkeit der Probekörper behandelt. Des Weiteren werden in Abschnitt 3.3.5 prozesstechnologische Einflüsse auf die Formtreue aufgezeigt. Abschließend wird wiederum das Potential des komplexen Bauens mittels der SCA anhand von Beispielobjekten demonstriert (siehe Abschnitt 3.3.6).

3.3.2 Einfluss des Zement- und Wassergehaltes auf die Festigkeit (cbm)

Um den Einfluss von Binder- und Wassergehalt auf die Festigkeit zu überprüfen, wurden mittels einer Flachstrahldüse und eines eigens für dieses Vorhaben gebauten Druckers Prismen mit einer Schichtdicke von 1 mm und w/z-Werten zwischen 0,12 und 0,85 hergestellt. Dabei wurde der Zementgehalt im Partikelbett zwischen 20 und 40 Vol.-% variiert. Es wurde ein Calciumaluminatzement verwendet. Als Sand wurde ein Quarzsand mit einem Größtkorn von 0,5 mm mit 80 bzw. 60 Vol.-% zugegeben.

In Bild 15 ist beispielhaft die Druckfestigkeit von Prismenhälften mit einer Druckfläche von 40 mm² und einer Höhe von 40 mm als Mittelwert aus 6 Proben im Alter von 7 d in Abhängigkeit des w/z-Wertes dargestellt. Den gleichen Zusammenhang zeigten auch auf Biegezug getestete Probeköper. Im Diagramm werden sowohl Ergebnisse mit einem Zement/Gesteinskörnungs-Verhältnis von 20/80 Vol.-% (Dreiecke: S.A.20-80) als auch 40/60 Vol.-% (Quadrate: S.A.40-60) dargestellt. Die unterschiedlichen w/z-Werte wurden durch eine Variation der Fahrgeschwindigkeit der Düse erreicht. Je höher der w/z-Wert, desto langsamer bewegte sich das Portal.

Die 7-d-Druckfestigkeit der Probekörper bewegt sich zwischen 5,3 und 16,4 N/mm² bei vergleichbarer Dichte. Auffällig ist, dass der übliche Zusammenhang einer steigenden Festigkeit mit fallendem w/z-Wert nicht gegeben ist. Die Festigkeit der durch selektive Zementaktivierung hergestellten Proben steigt im untersuchten Bereich mit zunehmendem w/z-Wert. Vermutaluminate cement was used and a quartz sand with a maximum grain size of 0.5 mm was added with 80 and 60 % by volume, respectively.

Fig. 15 shows an example of the compressive strength of prism halves with a compression area of 40 mm² and a height of 40 mm as an average value of 6 samples at the age of 7 d as a function of the w/c value. Specimens tested for bending tensile strength showed the same correlation. The diagram shows results with a cement/rock ratio of 20/80 vol% (triangles: S.A.20-80) as well as 40/60 vol% (squares: S.A.40-60). The different w/c values were achieved by varying the speed of the nozzle. The higher the w/c value, the slower the portal moved.

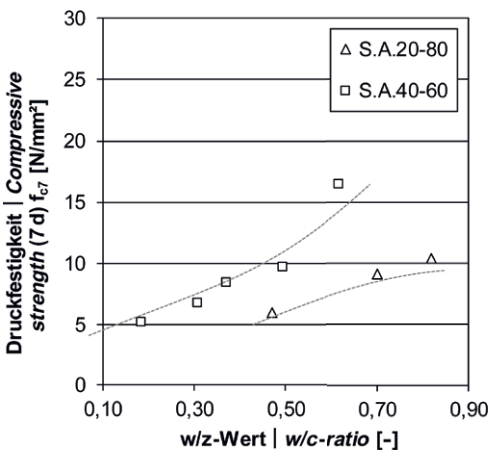

Bild 15: 7-d-Druckfestigkeit in Abhängigkeit des w/z-Werts bei variierenden Zement/Gesteinskörnungs-Verhältnissen bei vergleichbarer Rohdichte (Schichtdicke 1 mm) | **Fig. 15:** Compressive strength after 7 d depending on the w/c-ratio with varying cement/aggregate ratio but similar density (layer thickness 1 mm)

The 7-d compressive strength of the test specimens ranges between 5.3 and 16.4 N/mm² at comparable density. It is noticeable that the usual correlation between increasing strength and decreasing w/c value is not given. The strength of the specimens produced by selective cement activation increases with increasing w/c ratio. Presumably, a better penetration of water into the layers with increasing water content results in an improvement of the layer bond. Due to the fine spraying of the nozzle, the water hits the surface of the dry material as a fog-like film.

lich kommt es dabei mit zunehmendem Wassergehalt zu einer besseren Durchdringung der Schichten mit Wasser, was eine Erhöhung des Schichtenverbundes zu Folge hat. Durch die feine Zerstäubung der Düse trifft das Wasser als nebelartiger Film auf die Oberfläche des Trockenmaterials auf. Rechnerisch kann gezeigt werden, dass es sich bei den geringen Wassermengen nicht um ein Fließen des Wassers in einem porösen Medium gemäß dem Darcy-Gesetz handelt. Vielmehr wird die Wasserverteilung durch Adsorption an den Partikeloberflächen und kapillares Saugen gesteuert. Ist die auftreffende Wassermenge zu gering, wird diese vom Trockenmaterial zwar aufgesogen, kann die Schicht aber nicht über die gesamte Höhe homogen durchdringen. In der Folge bleiben nicht ausreichend hydratisierte Bereiche in tieferen Bereichen der Schicht zurück, was eine Schwächung des Schichtenverbunds zur Folge hat. Insbesondere bei geringen w/z-Werten waren im gespaltenen Querschnitt die weniger hydratisierten Bereiche durch noch ungebundenes Material deutlich zu erkennen. Erst bei höheren w/z-Werten kann durch die größere Wassermenge die Schicht vollständig durchdrungen werden, wodurch auch im unteren Bereich der Schicht ausreichend Wasser für die Hydratationsreaktion zur Verfügung steht und folglich ein höherer Schichtenverbund erreicht werden kann.

Um diese Hypothese zu belegen, wurde die Wasserverteilung stichprobenartig in den additiv hergestellten Proben mittels ^{1}H-NMR quantifiziert, vgl. Bild 16. Die Ergebnisse bestätigen den zuvor beschriebenen Mechanismus und zeigen eine deutliche Streuung des Wassergehalts – einen hohen Wassergehalt im Bereich der Schichtengrenzen und einen deutlich geringeren Wassergehalt zwischen ihnen. Eine detaillierte Darstellung der Ergebnisse kann [6], [16] entnommen werden.

3.3.3 Einfluss der Granulometrie auf die Festigkeit und Formtreue (cbm)

Im Hinblick auf die Wasserverteilung innerhalb der Schichten und damit auf den Schichten-

Mathematically it can be shown that the small amounts of water are not a flow of water in a porous medium according to Darcy's law. Rather, the water distribution is controlled by adsorption on the particle surfaces and capillary suction. If the amount of water is too small, it is absorbed by the dry material, but cannot penetrate the layer homogeneously over the entire height. As a result, insufficiently hydrated areas remain in deeper areas of the layer, which results in a weakening of the layer bond. Especially at low w/c values, the less hydrated areas were clearly visible in the split cross section due to still unbound material. Only at higher w/c values can the water penetrate the layer completely, thus guaranteeing sufficient water for the hydration reaction even in the lower areas of the layer and consequently a better layer bond.

To prove this hypothesis, the water distribution was randomly quantified in the additive prepared samples using ^{1}H-NMR, see Fig. 16. The results confirm the mechanism described above and show a clear scattering of the water content – a high water content in the area of the layer boundaries and a significantly lower water content between them. A detailed presentation of the results can be found in [6], [16].

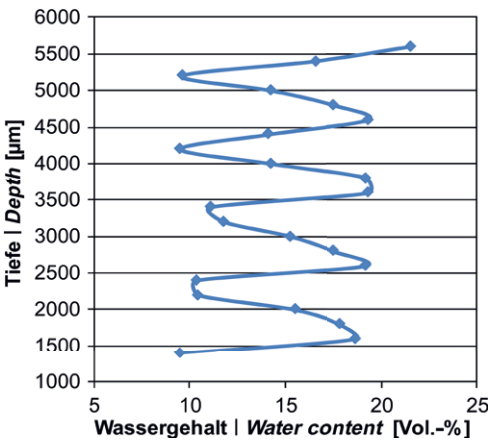

Bild 16: Mittels ^{1}H-NMR-Spektroskopie bestimmte Wasserverteilung in einem Probekörper mit 1 mm Schichtdicke (die Tiefe auf der y-Achse entspricht dabei der Messtiefe und nicht genau den Schichtgrenzen der Probe) | **Fig. 16:** Water distribution within a printed specimen with a layer thickness of 1 mm determined by using ^{1}H-NMR spectroscopy (the depth on the y-axis describes the measuring depth and not exactly the layer boundaries)

verbund spielt die Granulometrie der Partikelpackung eine wesentliche Rolle. Daher (und um eine Übertragung der Theorie auf andere Druckersysteme zu ermöglichen) wurde in weiterführenden Untersuchungen der Einfluss der Granulometrie auf die Festigkeit von additiv mit einem kommerziell erhältlichen Drucker hergestellten Proben untersucht [17]. Diese Versuche wurden im Rahmen eines Gastaufenthalts von Dirk Lowke im Wintersemester 2016/17 an der University of California in Berkeley (USA) durchgeführt. Die Beschreibung des Gerätes ist in Abschnitt 3.1.3 zu finden. In Bild 17 sind die Druckfestigkeiten nach 35 Tagen bei einem Verhältnis von Calciumsulfoaluminatzement zu Gesteinskörnung von 40 zu 60 Vol.-% in Abhängigkeit des w/z-Werts bei Variation der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung (Quarzsand mit d_{max} = 200, 350 bzw. 500 µm) dargestellt. Die Schichtdicke betrug bei diesen Versuchen jeweils 0,1 mm. Es zeigt sich, dass mit zunehmendem Durchmesser der Gesteinskörnung eine Erhöhung der Festigkeit einhergeht. Ursächlich hierfür sind die mit zunehmender Partikelgröße a) abnehmende spezifische Partikeloberfläche und b) die zunehmenden Porengrößen. Dies hat eine Verringerung der Adsorption des applizierten Wassers zur Folge, wodurch das Wasser in der Lage ist, tief in die Schicht einzudringen. Als Resultat werden der Schichtenverbund und damit die Festigkeit erhöht.

Neben den mechanischen Eigenschaften bestimmt die Granulometrie gleichzeitig die Formtreue der additiv hergestellten Proben. In Bild 18 ist der Einfluss der Korngrößenverteilung auf den Kennwert der Formtreue (links) und die visuelle Erscheinung der Proben (Fotos rechts) dargestellt. Die Formtreue ist hier definiert durch den Quotienten der Breite an der Würfeloberseite zur Soll-Breite von 40 mm. Demnach nimmt die Formtreue erwartungsgemäß mit zunehmendem w/z-Wert ab. Es ist aber auch deutlich zu sehen, dass die Formtreue bei grobkörnigeren Partikelpackungen schlechter ist, vgl. rechts unten. Besonders groß ist die Formabweichung im unteren Bereich der Probekörper mit der typischen Ausbildung eines Fußes. Dieser könnte aus einer vertikalen Set-

3.3.3 Influence of granulometry on strength and shape accuracy (cbm)

The granulometry of the particle packing plays an important role with regard to the water distribution within the layers and thus the layer bonding. For this reason (and to enable a transfer of the theory to other printer systems), the influence of granulometry on the strength of samples produced with a commercially available printer was investigated in further investigations [17]. These experiments were carried out during a guest stay of Dirk Lowke in the winter semester 2016/17 at the University of California in Berkeley (USA). The description of the device can be found in Section 3.1.3. Fig. 17 shows the compressive strengths of calcium sulfoaluminate cement and quartz sand (ratio: 40 to 60% by volume) after 35 days as a function of the w/c value with variation of the aggregate particle size distribution (quartz sand with d_{max} = 200, 350 or 500 µm). The layer thickness in these tests was 0.1 mm in each case. It can be seen that an increase in strength is associated with an increase in the diameter of the aggregate. This is due to the fact that with increasing particle size a) the specific particle surface decreases and b) the pore sizes increase. This results in a reduction in the adsorption of the applied water, which enables the water to penetrate deep into the layer. As a result, the layer bonding and thus the strength are increased.

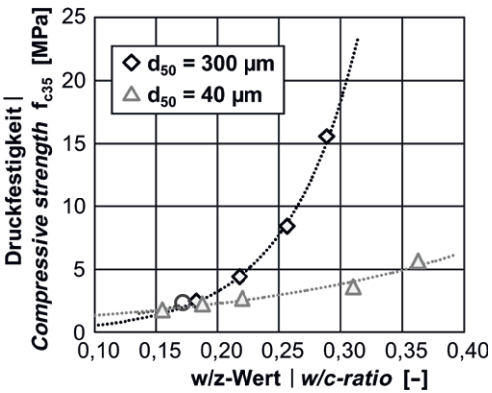

Bild 17: 35-d-Druckfestigkeit und Formtreue in Abhängigkeit des w/z-Werts bei variierendem mittlerem Korndurchmesser der Gesteinskörnung d_{50}, Schichtdicke 0,1 mm | **Fig. 17:** Compressive strength after 35 d depending on the w/c-ratio by varying average grain diameter d_{50} of the aggregates and a layer thickness of 0.1 mm

zung und horizontalen Ausbreitung des unteren Bereichs infolge der Auflast der nachfolgendhergestellten Schichten resultieren. Mit zunehmendem w/z-Wert und zunehmender Partikelgröße nimmt die Dicke der Wasserschicht um die Partikel zu, was eine leichtere gegenseitige Partikelverschiebung zur Folge hat. Hier besteht Forschungsbedarf, um eine möglichst hohe Formtreue bei gleichzeitig hohen Festigkeiten realisieren zu können. Dies erfordert jedoch noch weitere Versuche.

3.3.4 Einfluss der Nachbehandlung (cbm)

Weiterhin wurde der Einfluss der Nachbehandlung auf die mechanischen Eigenschaften untersucht. Dabei stellte sich eine eintägige Feuchtlagerung bei 20 °C und 100 % relativer Feuchte als effektive Nachbehandlung heraus. Eine Wasserlagerung hingegen führte überraschenderweise zu keiner weiteren Festigkeitssteigerung. In Abhängigkeit des Zements wurde sogar eine signifikante Verringerung der Festigkeiten festgestellt. Dies konnte auf eine Rissbildung zwischen den Schichten infolge des Austrocknens nach der Wasserlagerung zurückgeführt werden. Sichtbar wurde dies durch ein deutliches Versagen des Schichtenverbunds bei der Biegezugprüfung. Höchstwahrscheinlich liegt ein direkter Zusammenhang zwischen der Nachbehandlungsempfindlichkeit (d. h. Rissentwicklung infolge Trocknungsschwindens) mit der Hydratationsgeschwindigkeit der Zemente

In addition to the mechanical properties, granulometry also determines the shape accuracy of the additively produced samples. Fig. 18 shows the influence of the particle size distribution on the characteristic shape fidelity and the visual appearance of the samples. The shape fidelity is defined here by the quotient of the width on the upper side of the cube to the nominal width of 40 mm. Accordingly, the shape accuracy decreases as expected with increasing w/c ratio. However, it can also be clearly seen that the shape fidelity is worse with coarser particle packings, see bottom right. The shape deviation is particularly large in the lower area of the test specimens with the typical formation of a wider base. This could result from vertical settlement and horizontal spreading of the lower area due to the load of the layers produced in the following layers. With increasing w/c ratio and increasing particle size, the thickness of the water layer around the particles increases, resulting in an easier mutual particle displacement. There is a need for research in this area in order to be able to achieve the highest possible dimensional accuracy while maintaining high strength.

3.3.4 Influence of the post-treatment (cbm)

Furthermore, the influence of post-treatment on the mechanical properties was investigated. 24 h storage at 20 °C and 100% relative humidity turned out to be an effective after treatment.

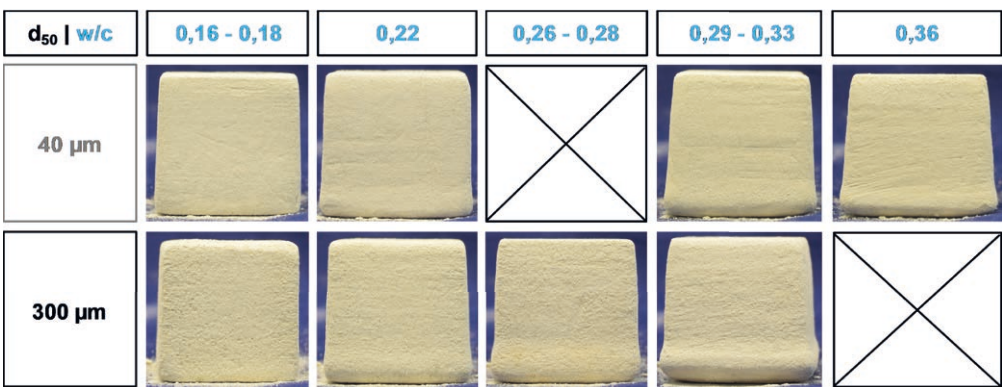

Bild 18: Formtreue in Abh. des w/z-Werts bei variierendem mittlerem Korndurchmesser der Gesteinskörnung d_{50}, Schichtdicke 0,1 mm |
Fig. 18: Shape accuracy depending on the w/c-ratio by varying average grain diameter of the aggregates d_{50}, layer thickness of 0.1 mm

vor. Auch hier besteht dringender Forschungsbedarf, um ungeeignete Kombinationen von Material und Nachbehandlung zielsicher ausschließen zu können. Bei optimaler Material-Nachbehandlungs-Kombination konnten bislang Festigkeiten von bis zu 26 N/mm² nach 7 d bzw. 34 N/mm² nach 365 d erreicht werden.

3.3.5 Prozesstechnologische Einflüsse auf die Formtreue (hb)

Um die Grenzen des Herstellungsverfahrens – insbesondere kleinstmöglich herstellbare Elementgrößen – zu untersuchen, wurden verschiedene Testgeometrien entworfen. Bild 19 zeigt eine Darstellung des Bauraums mit einer Auswahl an modellierten Testkörpern mit unterschiedlichen Stift- und Lochdurchmessern, Steg- und Spaltbreiten sowie einfachen Keilen. Nach der Herstellung wurden die gedruckten Objekte mit einem 3D-Scanner vermessen und mit der ursprünglichen CAD-Geometrie verglichen. Bild 20 zeigt beispielhaft den Falschfarbenvergleich zweier Keile mit der zugehörigen Soll-Geometrie. Der Pfeil im jeweiligen Bild zeigt die Bewegungsrichtung des Druckkopfs während der Herstellung. Erste Versuche mit 40 Vol.-% Calciumaluminatzement zeigten Abweichungen zwischen dem CAD-Modell und dem gedruckten Objekt im Bereich von ±3 mm.

Die Versuche zeigten auch, dass die Formtreue des Objekts stark vom Entpackungsprozess abhängt. Nach dem Druck müssen die Objekte von anhaftendem losem Material, zum Beispiel durch Bürsten, befreit werden. Wird bei der Reinigung zu viel Druck ausgeübt, kann die finale Form des Objekts verfälscht werden. Standardisierte oder auch automatisierte Entpackungsprozesse müssen zunächst definiert und erprobt werden, um die erreichbare Formtreue der verschiedenen Kombinationen aus Material und Prozessparameter beurteilen zu können. Auch für eine Skalierung des Verfahrens zur Herstellung von Elementen in baupraktischer Größe besteht noch Forschungsbedarf für eine praktikable Entpackung und Nachbehandlung.

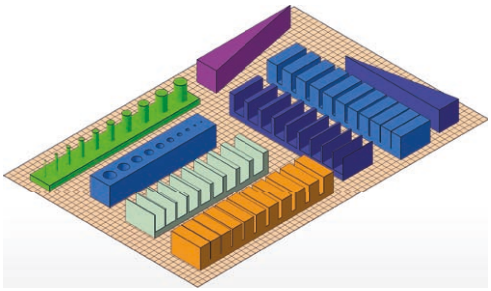

Bild 19: Darstellung des Druckerbauraums mit verschiedenen Testgeometrien | **Fig. 19:** Depiction of the printer build chamber with different test objects

Surprisingly, water storage did not lead to any further increase in strength. Rather, a significant, cement dependent reduction in strength was observed. This could be attributed to crack formation between the layers due to drying out after water storage. This became visible by a clear failure of the layer bond during the bending tensile test. It is highly probable that there is a direct correlation between the curing sensitivity (i.e. crack development due to drying shrinkage) and the hydration rate of the cements. Further research in this field is required in order to exclude unsuitable combinations of material and curing with certainty. With post treatment, strengths of up to 26 N/mm² after 7 d and 34 N/mm² after 365 d could been achieved.

3.3.5 Process technological influences on shape accuracy (hb)

In order to investigate the limits of the manufacturing process – especially the smallest possible element sizes that can be produced – different test geometries were designed. Fig. 19 shows a representation of the installation space with a selection of modelled test geometries with different pin and hole diameters, tongue and groove widths as well as simple wedges. After production, the printed objects were measured with a 3D scanner and compared to their original CAD geometry. Fig. 20 shows an example of the false-colour comparison of two wedges with the associated target geometry. The arrow in each image shows the direction of movement of the print head during production. Initial tests

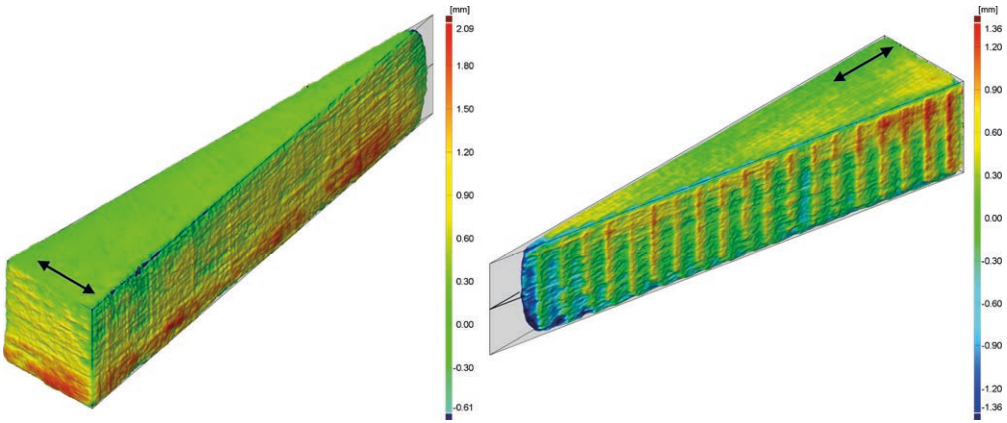

Bild 20: Vergleich zwischen Soll-Geometrie und 3D-Scan von gedruckten Keilen; links: Orientierung quer zur Druckrichtung, rechts: Orientierung längs zur Druckrichtung | **Fig. 20:** Comparison between target geometry and 3D scan of printed wedges; left: orientation perpendicular to print direction, right: orientation in print direction

3.3.6 Demonstratoren (hb)

Begleitend zu den Festigkeits- und Formtreueversuchen wurden mehrere kleinformatige Testobjekte und Demonstratoren (Bilder 21 und 22) hergestellt, die das Potential der selektiven Zementaktivierung verdeutlichen.

3.3.7 Fazit SCA

Nach Abschluss dieses Forschungsvorhabens können Bauteile mittels SCA mit für den Bau ausreichenden Festigkeiten von bis zu 16 MPa und nach Nachbehandlung sogar bis zu 26 MPa, jeweils nach 7 d, produziert werden. Für eine gute Festigkeit ist eine gute Verteilung des Wassers zwischen den Schichten maßgebend. Dies führt zu dem ungewöhnlichen Phänomen einer steigenden Festigkeit mit steigendem w/z-Wert. Dieser Effekt wurde später auch in [18], [19] gezeigt. Dies resultiert jedoch aus der kapillargetriebenen Wasserverteilung, die bei einem größeren Wasserangebot (und somit w/z-Wert) höhere Festigkeiten erzeugt. Es konnte gezeigt werden, dass für eine optimale Wasserverteilung bezüglich Festigkeit und Formtreue die Granulometrie des Partikelbetts eine wichtige Rolle spielt. Ebenso hat der Entpackungs- und Nachbehandlungsprozess einen großen Einfluss auf die finale Bauteilgeometrie und die praktische Anwendbarkeit des Verfahrens. Die prozesstechnologischen

with 40 vol% calcium aluminate cement showed deviations between the CAD model and the printed object in the range of ±3 mm.

The tests also showed that the shape fidelity of the object depends strongly on the unpacking process. After printing, the objects must be freed from adhering loose material, for example by brushing. If too much pressure is applied during cleaning, the final shape of the object can be distorted. Standardized or even automated unpacking processes must first be defined and tested in order to assess the achievable shape accuracy of the various combinations of material and process parameters. There is also still a need for research concerning the unpacking and post-treatment of large-scale building elements.

3.3.6 Demonstrators (hb)

In addition to the strength and shape retention tests, several small-format test objects and demonstrators (Figs. 21 and 22) were produced to illustrate the potential of selective cement activation.

3.3.7 Summary SCA

After completion of this research project, SCA can be used to produce components with sufficient strength of up to 16 MPa after 7 d and

Bild 21: Verschiedene durch selektive Zementaktivierung hergestellte Testobjekte zur Beurteilung der Formtreue | **Fig. 21:** Selection of test objects produced by selective cement activation to gauge the achievable accuracy

sowie materialtechnologischen Grundlagen für eine erfolgreiche Weiterentwicklung des Verfahrens konnten herausgearbeitet werden.

Aufgrund der momentan noch recht hohen Wasseraufnahme der Bauteile im erhärteten Zustand herrscht für eine Anwendung im Außenbereich noch weiterer Forschungsbedarf. Jedoch eignet sich der Baustoff bereits aufgrund der hohen Oberflächenauflösung und der möglichen Komplexität der Bauteile für die Herstellung von nicht bewitterten Bauteilen.

4 Fazit und Ausblick

Die additive Fertigung von Betonbauteilen kann durch selektives Binden von Gesteinskörnung mit Zement realisiert werden. In dem hier dokumentierten Projekt wurde das selektive Binden parallel und vergleichend in zwei Varianten untersucht: *Selective Cement Paste Intrusion* (SPI) und Selective Cement Activation (SCA).

Mit beiden Verfahrensvarianten sind Festigkeitswerte erreichbar, welche denen von herkömmlich gefertigtem Normalbeton entsprechen. Mit der SPI konnten Druckfestigkeiten von bis zu 78 MPa nach 7 d erreicht werden, mit der SCA bis zu 26 MPa nach 7 d. Die Frage nach den Möglichkeiten zur Integration von Bewehrung war nicht Gegenstand dieses Projektes.

after post-treatment up to 26 MPa after 7 d. For favourable material properties a good distribution of water between the layers is essential. This leads to the unusual phenomenon of increasing strength with increasing w/c ratio. This effect was later also shown in [18], [19]. This results from the capillary-driven water distribution, which produces higher material strength with a larger water supply (and thus w/c ratio). It could be shown that the granulometry of the particle bed plays an important role for optimum water distribution with respect to material strength and shape retention. The unpacking and post-treatment process also has a major influence on the final component geometry and the practical applicability of the process. The process-technological as well as material-technological basics for a successful further development of the process were determined.

Due to the currently high water absorption of the printed components in the hardened state, there is still a need for further research for an outdoor application. However, due to the high surface resolution and the possible complexity of the components, the building material is already suitable for the production of non-weathered components.

Bild 22: Innen verstrebte Rohrstücke, hergestellt durch selektive Zementaktivierung | **Fig. 22:** Pipes with internal structures manufactured by selective cement activation

Für SPI-Bauteile konnte bereits eine hohe Dauerhaftigkeit gegenüber Frost-, Frost-Tausalz-Angriffen und Karbonatisierung nachgewiesen werden. Sie eigenen sich somit potentiell für den späteren Einsatz als bewehrtes Außenbauteil.

Im Vergleich zur Extrusion zeichnet sich das selektive Binden durch eine signifikant größere geometrische Freiheit aus. Überhänge und Brücken sind praktisch uneingeschränkt baubar, da die ungebundenen Partikel als Stützmaterial für auskragende Bereiche des Bauteils dienen. Allerdings sind keine ungefüllten, geschlossenen Hohlräume möglich, da in diesen ungebundenes Material gefangen ist.

Die geometrische Auflösung liegt bei beiden Varianten im Bereich von wenigen Millimetern. Grundsätzlich ist das Potential zu hohen Auflösungen bei der SCA höher als bei der SPI, da zur Aktivierung des Zementes lediglich Wasser ausgebracht werden muss, was eine feinere Düsentechnologie erlaubt. Allerdings erwies sich hier das Entpacken der Bauteile aus dem Sand-Zement-Gemisch als anspruchsvoll, sodass filigrane Strukturen nur bedingt machbar waren. Das Entpacken bei der SPI hingegen, wo die Bauteile lediglich aus einem reinen Sandbett geborgen werden müssen, lässt sich technisch wesentlich einfacher realisieren.

Im Rahmen des Projektes wurden eigens entwickelte Versuchsgeräte im Labormaßstab mit Ein-

4 Conclusion and outlook

The additive production of concrete components can be realized by selective binding of aggregates with cement. In the project documented here, the selective binding was investigated in parallel and comparatively in two variants: Selective Cement Paste Intrusion (SPI) and Selective Cement Activation (SCA).

With both process variants, material strength values can be achieved which correspond to those of conventionally produced concrete. With SPI, compressive strengths of up to 78 MPa after 7 d could be achieved, with SCA up to 26 MPa after 7 d. The question of the possibilities of integrating reinforcement was not the subject of this project.

For SPI components, a high durability against freeze-thaw and freeze-thaw attacks and carbonation could already be proven. Thus, they are potentially suitable for later use as reinforced exterior components.

Compared to extrusion, selective bonding is characterized by a significantly greater geometric freedom. Overhangs and bridges can be built practically without restrictions, as the unbound particles serve as support material for cantilevered areas of the component. However, no unfilled, closed cavities are possible, as unbound material remains trapped in these areas.

The geometric resolution of both variants is in the range of a few millimetres. In principle, the potential for high resolutions is higher with SCA than with SPI, since only water has to be applied to activate the cement, which allows finer nozzle technology. However, the process of unpacking the components from the sand/cement mixture proved to be challenging, so that filigree structures were only possible to a limited extent. Unpacking components produced via SPI where only a retrieval from a pure sand bed is necessary, is technically easier to implement.

The project used specially developed experimental equipment on a laboratory scale with a

zeldüse (SPI) oder kleinen Düsen-Arrays (SCA), kleinen Bauräumen (max. 450 mm × 600 mm × 500 mm) und geringen Baugeschwindigkeiten verwendet.

Die Ergebnisse des Projektes werden aktuell im laufenden Transferprojekt „Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen“ vertieft und weitergeführt. Da hier auf bereits vorhandene Technologie aus dem 2D-Großformatdruck zurückgegriffen werden konnte und nur Wasser als Fluid zum Einsatz kommt, waren die Voraussetzungen für eine schnelle technische Umsetzung in besonderem Maße gegeben. Gegenstand des Projektes ist die Skalierung der Verfahrensvariante SCA in den industriellen Maßstab. Hier wurden bereits deutliche Fortschritte bezüglich Bauraumgröße, Baugeschwindigkeit und Festbetoneigenschaften erarbeitet.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 257344691 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

single nozzle (SPI) or small nozzle arrays (SCA), small build volumes (max. 450 mm × 600 mm × 500 mm) and low build speeds.

The method of selective cement activation is currently being studied in the ongoing transfer project “Industrial 3D Concrete Printing by Selective Cement Activation – Process, Material, Applications”. Since in this process variant, it was possible to fall back on already existing technology from 2D large format printing using only water as fluid, the conditions for a fast technical implementation seem particularly favourable. The object of the project is to scale up the SCA process variant for industrial application. Significant progress has already been made in terms of build volume, manufacturing speed and hardened concrete properties.

Acknowledgement

The authors would like to thank the German Research Foundation (DFG) for funding the project (number 257344691) within the Priority Programme SPP 1542.

Literatur | References

[1] Gebhardt, A.: Additive Fertigungsverfahren: Additive Manufacturing und 3D-Drucken für Prototyping – Tooling – Produktion. 5. Aufl., München: Hanser, 2016

[2] Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Proc. of 4th Int. Symp. on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials – HiPerMat, 09.–11.03.2016 in Kassel, Kassel: Kassel University Press, 2016, S. 193–202

[3] Wagner, J.-P.; Reichertz, A.; Hannöver, A.; Siebert, B.; Osterminski, K.; Braun, F.; Kirchgeßner, M.: Bluten von Frischbeton: Versuchsergebnisse mit dem Eimerverfahren des DBV-Merkblatts. Beton (2007) 12, S. 558–565

[4] Perrot, A.; Rengeard, D.; Picandet, V.; Mélinge, Y.: Hydro-mechanical properties of fresh cement pastes containing polycaboxylate superplasticizer. Cement and Concrete Research (2013), S. 221–228

[5] Weger, D.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Additive Fertigung von Betonbauteilen durch selektive Zementleim-Intrusion. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband 20. Int. Baustofftagung – ibausil, 12.–14.09.2018 in Weimar, Weimar: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität Weimar, Bd. 1, 2018, S. 1-01–1-16

[6] Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B.: Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges. Cement and Concrete Research 112 (2018) – Special Issue (SI): Digital Concrete 2018, S. 50–65 – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018

[7] Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength. In: Maekawa, K.; Kasuga, A.; Yamazaki, J. (Hrsg.): Proc. of 11th fib Int. PhD Symp. in Civil Engineering, 29.–31.08.2016 an der University of Tokyo (Japan), 2016, S. 403–410

[8] Pierre, A.; Weger, D.; Perrot, A.; Lowke, D.: Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study. Materials and Structures 51 (2018) 22, 12 S. – DOI: https://doi.org/10.1617/s11527-018-1148-5

[9] Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.; Talke, D.; Henke, K.: Additive manufacturing of concrete elements using selective cement paste intrusion – Effect of layer orientation on strength and durability. In: Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proc. of the 1st Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete (ICCDF) 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), 2018, extended abstract (auf USB-Stick)

[10] Estelle, P.; Lanos, C.; Perrot, A.; Amziane, S.: Processing the vane shear flow data from Couette analogy. Applied Rheology 18 (2008), S. 34037-1–34037-6

[11] Koehler, E. P.; Fowler, D. W.: Development of a portable rheometer for fresh portland cement concrete. ICAR Report 105-3FICAR 5: Measuring the Workability of High Fines Concrete, Austin, TX (USA), 2004

[12] DIN EN 12390-3:2009-07: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2009.

[13] DIN CEN/TS 12390-9:2017-05 (DIN SPEC 91167): Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016:

[14] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW, Hrsg.): BAW-Merkblatt: Frostprüfung von Beton (MFB). Ausgabe 2012, zugegriffen am 30.5.2018.

[15] DIN CEN/TS 12390-10:2007-12: Prüfung von Festbeton – Teil 10: Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes von Beton; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-10:2007.

[16] Lowke, D.; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C.: 3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen. In: Ludwig, H.-M. (Hrsg.): Tagungsbericht zur 19. Int. Baustofftagung – ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2015, Beitrag 20-10, S. 1-1113–1-1120

[17] Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle-bed 3D-Printing by Selective Cement Activation – Applications, material and process technology. Cement and Conrete Research 134 (2020) – Special Issue for the 2nd RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication 2020 (SI: Digital Concrete 2020; Bos, F. P.; Salet, T. A. M.; Wolfs, R. (Hrsg.)), 106077, 13 S. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106077

[18] Shakor, P.; Sanjayan, J.; Nazari, A.; Nejadi, S.: Modified 3D printed powder to cement-based material and mechanical properties of cement scaffold used in 3D printing Construction and Building Materials 138 (2017), S. 398–409

[19] Xia, M.; Nematollahi, B.; Sanjayan, J.: Compressive Strength and Dimensional Accuracy of Portland Cement Mortar Made Using Powder-Based 3D Printing for Construction Applications. In: Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proc. of 1st RILEM Int. Conf: on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), RILEM Bookseries 19, Cham: Springer Int. Publ., 2019, S. 245–254

[20] Henke, K.: Additive Baufertigung durch Extrusion von Holzleichtbeton. Diss., TU München, 2016

[21] Weger, D.; Talke, D.; Lowke, D.; Henke, K.: Video „3D-Betondruck, Variante ‚Paste Intrusion': Herstellung eines mit inneren Streben ausgesteiften Rohres". ITSZ-Medienzentrum der TU München (gefördert durch Informationszentrum Beton GmbH), 2017

[22] Talke, D.; Henke, K.; Weger, D.: Selective Cement Activation (SCA) – new possibilities for additive manufacturing in construction. In: Lázaro, C.; Bletzinger, K.-U.; Oñate, E. (Hrsg.): Form and Force – Proc. of the IASS Annual Symp. 2019 – Structural Membranes 2019, 07.–10.10.2019 in Barcelona (Spanien), IASS, 2019, 8 S.

Bildnachweise | Picture credits

- Bild | Picture 1: Klaudius Henke [20]
- Bild | Picture 2: Standbild aus [21]
- Bilder | Pictures 3, 4, 13, 14, 19, 20, 22: Daniel Talke
- Bild | Picture 5: Daniel Weger [2]
- Bilder | Pictures 6, 7, 9–12: Daniel Weger [5]
- Bild | Picture 8: Daniel Weger
- Bild | Picture 15: Dirk Lowke [6], [16]
- Bild | Picture 16: Dirk Lowke [6]
- Bild | Picture 17: Dirk Lowke [17]
- Bild | Picture 18: Dirk Lowke, Daniel Weger [17]
- Bild | Picture 21: Daniel Talke [22]

Bereits zuvor publizierte Abbildungen wurden für den vorliegenden Bericht teilweise modifiziert. | Previously published illustrations have been partially modified for the present report.

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Additive Fertigung frei geformter, bewehrter Betonbauteile durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen | Additive manufacturing of free formed reinforced concrete elements by selective binding with calcium silicate cements

Antragsteller 1 | Applicant 1:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen Professor und Lehrstuhlinhaber | Professor and chair holder
DFG-Geschäftszeichen | DFG reference number:	GE 1973/19-1 (Projektnummer | Project number: 257344691)
Adresse | Address:	TU München, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm), Franz-Langinger-Straße 10, 81245 München
Kontakt | Contact:	+49 89 0289 27061 | gehlen@tum.de | www.bgu.tum.de/cbm
Antragsteller 2 | Applicant 2:	Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter Professor und Lehrstuhlinhaber | Professor and chair holder
DFG-Geschäftszeichen | DFG reference number:	WI 2879/4-1 (Projektnummer | Project number: 257344691)
Adresse | Address:	TU München, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion (hb), Arcisstraße 21, 80333 München
Kontakt | Contact:	+49 89 289 22416 | winter@tum.de | www.bgu.tum.de/hb
Berichts-/Förderzeitraum | Reporting/funding period:	01.10.2014–30.09.2017 Kostenneutrale Verlängerung bis | Cost-neutral extension up to: 31.12.2017
Team | Team:	Daniel Talke (hb) Daniel Weger (cbm) Klaudius Henke (hb) Dirk Lowke (cbm)

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Lowke, D.; Weger, D.; Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.; Gehlen, C.: 3D-Drucken von Betonbauteilen durch selektives Binden mit calciumsilikatbasierten Zementen – Erste Ergebnisse zu betontechnologischen und verfahrenstechnischen Einflüssen. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband der 19. Int. Baustofftagung ibausil, 16.–18.09.2015 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2015, Beitrag 20-10, S. 1-1113–1-1120
- Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D Printing of Concrete Structures with Calcium Silicate based Cements using the Selective Binding Method – Effects of Concrete Technology on Penetration Depth of Cement Paste. In: Fehling, E.; Middendorf, B.; Thiemicke, J. (Hrsg.): Proc. of Hipermat 2016 – 4th Int. Symposium on Ultra-High Performance Concrete and High Performance Construction Materials, 09.–11.03.2016 in Kassel, erschienen in Schriftenreihe Baustoffe und Massivbau, Heft 27, Kassel: kassel university press, 2016, S. 193–202
- Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.: 3D printing of concrete structures using the selective binding method – Effect of concrete technology on contour precision and compressive strength. In: Maekawa, K.; Kasuga, A.; Yamazaki, J. (Hrsg.): Proc. of 11th Int. fib PhD Symp. in Civil Engineering, 29.–31.08.2016 in Tokio (Japan), 2016, S. 403–410
- Henke, K.; Talke, D.; Winter, S.: Multifunctional Concrete – Additive Manufacturing by the Use of Lightweight Concrete. In: Bögle, A.; Grohmann, M. (Hrsg.): Interfaces: architecture.engineering.science – Proc. of the IASS Annual Symp. 2017, 25.–28.09.2017 in Hamburg, Hamburg: HCU und IASS, 2017, Beitrag Nr. 10133, Book of Abstracts: S. 85, Langfassung auf USB-Stick, 9 S.
- Pierre, A.; Weger, D.; Perrot, A.; Lowke, D.: Penetration of cement pastes into sand packings during 3D printing: Analytical and experimental study. Materials and Structures 51 (2018) 22, 12 S. – DOI: 10.1617/s11527-018-1148-5.
- Lowke, D.; Dini, E.; Perrot, A.; Weger, D.; Gehlen, C.; Dillenburger, B.: Particle-bed 3D printing in concrete construction – possibilities and challenges. Cement and Concrete Research 112 (2018) – Special Issue (SI): Digital Concrete 2018, S. 50–65 – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.05.018

- Weger, D.; Gehlen, C.; Lowke, D.: Additive Fertigung von Betonbauteilen durch selektive Zementleim-Intrusion. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband der 20. Int. Baustofftagung ibausil, 12.–14.09.2018 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2018, S. 1-1–1-16
- Lowke, D: Partikelbett 3D-Drucktechniken für den Betonbau – Möglichkeiten und Herausforderungen. In: Ludwig, H. M. (Hrsg.): Tagungsband der 20. Int. Baustofftagung ibausil, 12.–14.09.2018 in Weimar, Weimar: F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde der Bauhaus-Universität Weimar, 2018, S. 1-257–1-269
- Weger, D.; Lowke, D.; Gehlen, C.; Talke, D.; Henke, K.: Additive manufacturing of concrete elements using selective cement paste intrusion – Effect of layer orientation on strength and durability. In: Wangler, T.; Flatt, R. J. (Hrsg.): Proc. of 1st Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication – Digital Concrete (ICCDF) 2018, 10.–12.09.2018 in Zürich (Schweiz), 2018, extended abstract (auf USB-Stick)
- Weger, D.; Gehlen, C.; Lowke, D.: 3D-Betondrucken – Stand der Forschung an der TUM. In: Fischer, O.; Gehlen, C.; Große, Ch.; Heinz, D. (Hrsg.): Beiträge zur 6. DAfStb-Jahrestagung mit 59. Forschungskolloquium, 11./12.10.2018 in München, TU München, 2018, S. 25–35
- Lowke, D.; Talke, D.; Dressler, I.; Weger, D.; Gehlen, C.; Ostertag, C.; Rael, R.: Particle-bed 3D-Printing by Selective Cement Activation – Applications, material and process technology. Cement and Conrete Research 134 (2020) – Special Issue for the 2nd RILEM Int. Conf. on Concrete and Digital Fabrication 2020 (SI: Digital Concrete 2020; Bos, F. P.; Salet, T. A. M.; Wolfs, R. (Hrsg.)), 106077, 13 S. – DOI: https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106077

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Dissertationen | Dissertations

- Weger, D.: Additive Fertigung von Betonstrukturen mit der Selective Paste Intrusion – SPI. 2020
- Talke, D.: Additive Fertigung mittels selektiver Zementaktivierung. (Fertigstellung geplant | Completion planned for 2022)

Studienarbeiten | Student's research projects

- Schmidt, L.: 3D-Drucken von Beton – Einfluss von Schichtdicke & w/z-Wert. cbm, Bachelorarbeit, 2014
- Maric, M.: 3D printing of concrete – Effect of water cement ratio and layer thickness on concrete strength characteristics. cbm, Seminararbeit, 2015
- Elekes, M.: Einfluss der rheologischen und betontechnologischen Eigenschaften von Zementleimen auf die Konturtreue und die Druckfestigkeit bei Verwendung der „selective paste intrusion method". cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Geppert, F.: 3D-Drucken von Beton – Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Bestimmung der Wasserpermeabilität und Einfluss der Packungsdichte auf die Wasserpermeabilität und Wasserverteilung von im selektiv aktivierenden Druckverfahren hergestellten Bauteilen. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Gerber, S.: 3D-Drucken von Beton – Einfluss von Schichtdicke, W/Z-Wert, Zementgehalt und Zementart. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Gerceker, B. E.: Rheologische Optimierung von Leimen für das Fertigungsverfahren Selective Paste Intrusion: Einfluss verschiedener Fließmittel. cbm, Seminararbeit, 2016
- Lipp, A.: 3D Drucken mit Beton – Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Konturtreue und die Festigkeit bei Verwendung der „Cement Paste Intrusion Method". cbm, Seminararbeit, 2016
- Lomakovych, V.: Druckköpfe zur dosierten Ausbringung von Wasser für die additive Fertigung von großformatigen Bauteilen durch selektives Binden von Gesteinskörnung mit Zement. hb, Bachelorarbeit, 2016
- Maric, M.: 3D printing from concrete. cbm, Masterarbeit, 2016
- Reich, M.: Testgeometrien für das selektive Binden von Quarzsand – Konzeption, Entwicklung und Entwurf. hb, Bachelorarbeit, 2016
- Reßle, S.: 3D-Drucken von Beton mittels Selective Paste Intrusion. cbm, Bachelorarbeit, 2016
- Rzeznik, N.: Ökologische Einsparpotentiale durch Additive Fertigung mit kraftflussoptimierter und multi-funktionaler Form. cbm, Masterarbeit, 2016
- Wostatek, C.: Konzeption von Zementleimen für das additive Fertigungsverfahren selective paste intrusion. cbm, Masterarbeit, 2016

- Roos, M.: Additive Fertigung calciumsilikatbasierter Zemente. cbm, Bachelorarbeit, 2017
- Schwangler, M.: Ökologische Studie zu Leichtbeton und Normalbeton; Vergleich der Baustoffe im gesamten Lebenszyklus aus energetischer Sichtweise. hb, Bachelorarbeit, 2017
- Zehetbauer, T.: 3D-Drucken von Beton – Einfluss der Nachbehandlung auf die Festigkeit von im selektiv aktivierenden Druckverfahren hergestellten Bauteilen. cbm, Bachelorarbeit, 2017
- Zimmermann, B.: Ökologische Optimierung von Bauteilen durch den Einsatz der Additiven Fertigungsmethode „Selective Cement Paste Intrusion" – Einsatz von Additiven zur Konturtreue- und Festigkeitssteigerung, cbm Bachelorarbeit, 2017

Folgeprojekte | Follow-up projects

- Industrieller 3D-Betondruck durch selektive Zementaktivierung – Verfahren, Material, Anwendungen | Industrial 3D concrete printing by selective cement activation – process, material, applications

Antragsteller | Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter
Förderer | Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / Erkenntnistransferprojekt | Knowledge Transfer Project
Förderzeitraum | Funding period:	01.11.2017–29.02.2020
Partner | Partner:	Progress Maschinen & Automation AG, Brixen, Südtirol

- A01: Particle-bed 3D printing by selective cement activation (SCA) – particle surface functionalisation, particle-bed compaction and reinforcement implementation

Antragsteller | Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Dirk Lowke (TU Braunschweig), Prof. Dr. Arno Kwade (TU Braunschweig)
Förderer | Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 277
Förderzeitraum | Funding period:	01.01.2020–31.12.2023

- A02: Particle-bed 3D printing by selective cement paste intrusion (SPI) – particle surface functionalisation, particle synthesis and integration of WAAM reinforcement

Antragsteller | Applicants:	Prof. Dr.-Ing. Christoph Gehlen, Prof. Dr. Arno Kwade (TU Braunschweig), Prof. Dr.-Ing. Michael F. Zäh (TU München)
Förderer | Funding:	Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) / SFB/TRR 277
Förderzeitraum | Funding period:	01.01.2020–31.12.2023

Sonstige Aktivitäten | Special activities

- Seit 2016: Effiziente Steuerung der rheologischen Eigenschaften als Schlüssel für die digitale Fertigung von Bauteilen aus Beton – Experimentelle Untersuchung und numerische Simulation: Int. Kooperation des cbm mit A. Pierre (University of Cergy-Pontoise), A. Perrot (University of Bretagne Sud) und D. Lowke (ehem.: TUM, heute: TU Braunschweig) zur additiven Fertigung von Betonelementen mittels SCI (gefördert durch das Bayerische-Französische Hochschulzentrum – BFHZ) | Since 2016: Efficient rheology control as key factor for digital fabrication in concrete construction – Experimental study and numerical simulation: Int. cooperation with A. Pierre (University of Cergy-Pontoise), A. Perrot (University of Bretagne Sud) and D. Lowke (former: TUM, today: TU Braunschweig) with focus on additive manufacturing of concrete elements by means of SPI (funded by Bayerisch-Französisches Hochschulzentrum (BFHZ) / Centre de Coopération Universitaire Franco-Bavarois (CCUFB)
- Wintersemester 2016/2017: Gastforschungsaufenthalt von Dirk Lowke an der UC Berkley im Rahmen des Projekts „3D Printing of Concrete Structures" (gefördert durch das Bayerisch-Kalifornische Hochschulzentrum – BaCaTec) | Winter semester 2016/2017: SResearch stay of Dirk Lowke at UC Berkley within the project „3D Printing of Concrete Structures" (funded by the Bavaria California Technology Center – BaCaTec)
- Januar 2017: Vorstellung der Forschungsaktivitäten auf der Messe „Bau" in München | January 2017: Presentation of the state of research at the exhibition "Bau" in Munich

View publication stats