

Vibrationsmodulierter 3D-Betondruckkopf

Das Projekt legt entscheidende Grundlagen zur Entwicklung eines neuen 3D-Druckverfahrens, basierend auf den thixotropen Frischbetoneigenschaften und dem Vibrationsaustrag unter Schwerkrafteinfluss.

Vision

Im Vorlaufforschungsprojekt werden entscheidende Grundlagen zur Entwicklung eines neuen 3D-Betondruckverfahrens und der dafür benötigten Maschinenkomponenten gelegt. Ausgehend von einfachen, robusten und verschleißreduzierten mechanischen Systemstrukturen sowie Betrachtungen zu Gemengerezepturen (gemeinsam mit der TU Dresden) soll der vibrationstechnische Ansatz, basierend auf der thixotropen Eigenschaft des Frischbetons, zum 3D-Druck von Beton unter der Wirkung der Schwerkraft entwickelt und getestet werden. Die vorgelagerten Prozessschritte wie die Gemengeherstellung oder der Gemengetransport zum Betonreservoir stehen nicht im Fokus der Betrachtung und sollen mit am Markt verfügbarer Maschinenteknik mit allen Randbedingungen für die dafür einzustellenden Gemengeeigenschaften erfolgen.

Materialentwicklung

In Zusammenarbeit mit der TU Dresden wurden Betonrezepturen mit einem Größtkorn von 8 mm und nachhaltigen Bindemitteln entwickelt, die durch einen Schwingungseintrag zu fließen beginnen, jedoch unmittelbar nach dem Vibrationsende grünstandfest stehen. Es wurde eine Methodik entwickelt, um anhand von kleinen Gemengeproben zu einer Eignungsaussage für den schwingungsbasierten Austrag unter Schwerkraftwirkung zu kommen. Hierfür kommt eine Kombination des klassischen Ausbreitmaßversuches nach Hägermann und eines Vibrationsprüfstandes zum Einsatz. Das erste Ziel dieser Versuche war die Bestimmung des Ausbreitmaßes in Abhängigkeit von der Schwingzeit und Anregungsart. Hier zeigten sich geeignete Kombinationen aus Mengen und Anregungsparametern, die im Folgenden weiterverwendet wurden. Zudem wurden Versuche durchgeführt, um das Aktivierungs- und Aushärteverhalten der geeigneten Gemenge über der Zeit zu ermitteln. Hier ergab sich ein offenes Verarbeitungszeitfenster von bis zu 80 Minuten.



Bild 1: Ausbreitverhalten eines Betongemenges auf dem modifizierten Schwingprüfstand

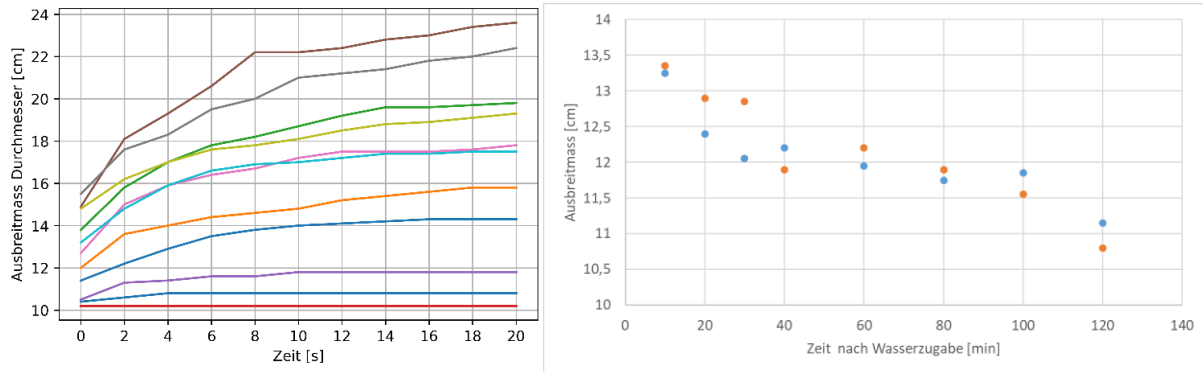


Bild 2: Ergebnisse des Ausbreitverhaltens bei 11 unterschiedlichen Schwingungserregungen (links) sowie Langzeitversuche zur Bestimmung der Verarbeitungszeit (rechts)

Simulation

Um das 3D-Betondruckverfahren effizient umsetzen zu können, wurden Partikelsimulationen mit einem speziell entwickelten Materialmodell für thixotropen, druckfähigen Frischbeton eingesetzt und anhand der Laborschwingungsversuche kalibriert. Aus Simulationen mit ersten Entwürfen möglicher Kombinationen von Maschinenkomponenten ergaben sich Empfehlungen für günstige Betriebsparameter sowie Verbesserungsvorschläge für die konstruktive Umsetzung und die Gemengeentwicklung.

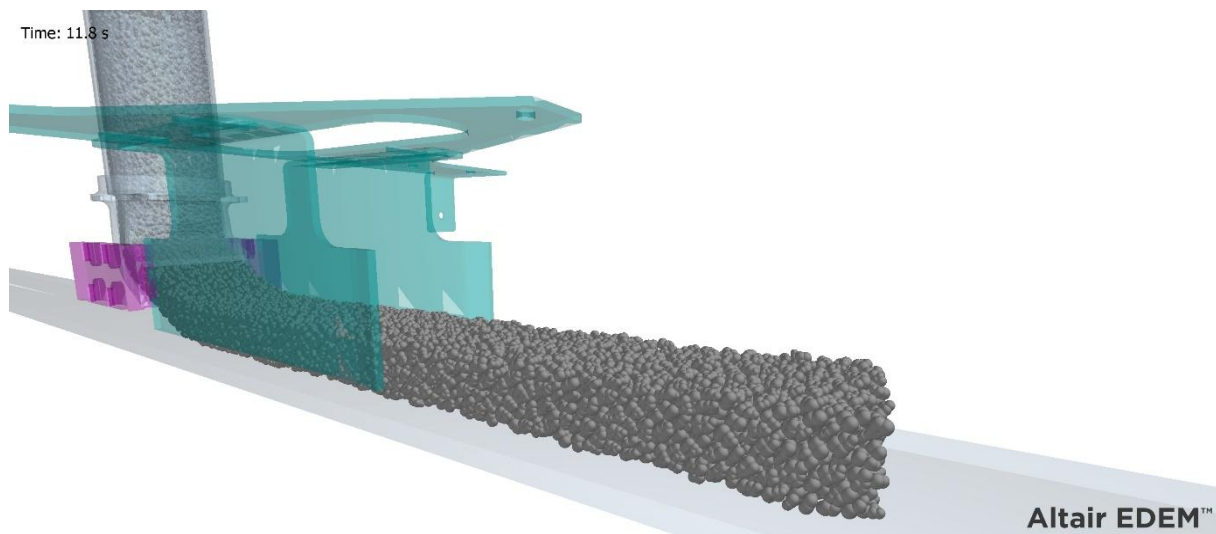


Bild 3: DEM-Simulation einer erfolgreichen Kombination von Gemenge, Maschinenkomponenten und Betriebsparametern

Laborversuchsstand

Mit Hilfe des konstruierten und gebauten Laborversuchsstandes erfolgten Austragsversuche mit verschiedenen Gemengen und Prozessparametern. Hier kamen nicht nur die selbst entwickelten Betonrezepturen, sondern auch marktverfügbare und zugelassene Produkte zum Einsatz. Der schwingungsbasierte Austrag des Frischbetons

konnte damit gut nachgewiesen werden. Beim Start der Vibrationserregung begannen die Gemenge aus dem Mundstück des Druckkopfes zu fließen, beim Stopp blieben sie stehen. In den Laborversuchen wurden immer zwei Lagen übereinander gedruckt und mit dem Glättschlitten hinter dem Austragskopf eine glatte Seitenfläche erzeugt. Mit verschiedenen Verfahrenseinstellungen erzeugte Probekörper konnten anschließend auf Druck- und Biegezugfestigkeiten untersucht werden.



Bild 4: Laborversuchsstand im CAD und umgesetzt



Bild 5: Austragsversuche

Demonstrator

Mit den Erfahrungen der Austragsversuche am Laborversuchsstand wurde ein größer skaliert Demonstrator entwickelt, welcher mit einem Industrieroboter bewegt werden kann. Das Systemkonzept wurde angepasst, Verbesserungen - insbesondere an Materialbehälter und Erregersystem - einbezogen und zu einer Konstruktion umgesetzt. Damit können nun Betonquerschnitte bis zu B:100 x H:60 mm und einer Austragsgeschwindigkeit bis 50 mm/s gedruckt werden. Die nach Verlassen des Glättschlittens sofortige Grünstandfestigkeit der getesteten selbst entwickelten und marktverfügbaren 3D-Druckbetone ermöglicht eine zügige Wiederbedruckbarkeit. Innerhalb von 5 Minuten wurden inzwischen sechs Lagen formstabil übereinander gedruckt.

In quer geschnittene Probekörper lassen sich die einzelnen Drucklagen optisch nicht mehr unterscheiden. Die durch den 3D-Druckprozess erzeugte Gemengeverflüssigung führt zu einer guten Lagenverbindung was an monolithisch gegossene Betonbauteile heranreicht. Die Verwendung von einem 8-mm-Größtkorn macht aus dem 3D-Druckmörtel (wie z. B. bei einigen marktgängigen extruderbasierten 3D-Betondruckverfahren) einen 3D-Druck-Beton, was die erreichbaren Festigkeiten erhöht und den Zementanteil reduziert, weil bei gleichem Volumen mehr Gesteinskörnung enthalten ist. Dies verbessert den ökologischen Fußabdruck und senkt Kosten. Eine weitere Erhöhung des Größtkorns wird mit dem entwickelten Verfahren einfach möglich sein.

Das Verfahren des vibrationsmodulierten 3D-Druckes wurde zum Europa-Patent angemeldet. Nun wird ein Anbieter gesucht, der den Demonstrator zur Marktreife entwickelt und in die Anwendung einführt.

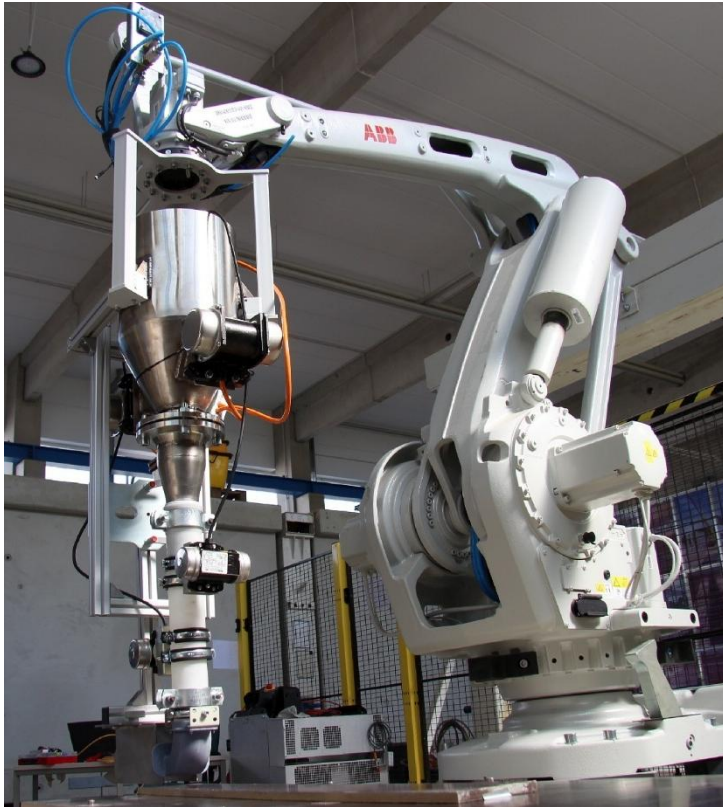


Bild 6: Demonstrator - Vibrationsmodulierter 3D-Betondruckkopf am Industrieroboter



Bild 7: Schnittbild von 3D-gedruckter Probe