

Untersuchung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens eines 3D-Druckmörtels mittels Ultraschalls

Motivation und Zielsetzung:

Durch die 3D-Betondrucktechnologie, als ein automatisiertes und additives Fertigungsverfahren, kann eine adäquate Steigerung der Produktivität und zugleich ein optimierter und ressourcenschonender Materialeinsatz erzielt werden. Jedoch erfordert der 3D-Betondruck einen Werkstoff, der in der frühen Verarbeitungsphase eine optimale Pumpbarkeit und Extrudierbarkeit aufweist und zusätzlich zum Verarbeitungszeitpunkt über ein schnelles Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten verfügt. Die Charakterisierung des 3D-Druckmörtels erfolgte durch den Einsatz von zerstörenden und zerstörungsfreien Prüftechniken in den Laboren der Bundesanstalt für Materialforschung und-prüfung (BAM). Im Vordergrund stand hierbei die Untersuchung des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens des 3D-Druckmörtels mittels Ultraschalls und der Vergleich mit klassischen Messtechniken. Ziel dieser durchgeführten Untersuchungen war die Weiterentwicklung und Optimierung des 3D-Betondruckes im Extrusionsverfahren. Zudem sollen diese Erkenntnisse bei der Erarbeitung zukünftiger Normen und Standards helfen, da derzeit nur wenige Studien in diesem Forschungsbereich existieren, welche sich mit der Analyse der Frisch- und Festmörteleigenschaften im Zusammenhang mit dem 3D-Betondruck auseinandersetzen. Aktuell ist es noch nicht möglich, eine industrielle Anfertigung von 3D-gedruckten Betonbauteilen zu gewährleisten, weil die Anforderungen im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und Tragfähigkeit noch nicht erfüllt werden.

Experimentelle Untersuchungen:

Analyse des Erstarrungs- und Erhärtungsverhaltens des 3D-Druckmörtels mittels Ultraschallmessungen:

Varianz in der Probendicke 25 mm und 50 mm

Ultraschallmessung

- 1 Monitor sowie Maus und Tastatur zur Bedienung der W-Box
- 2 W-BOX als Messdatenerfassungssystem zur Initiierung und Aufzeichnung der US-Signale
- 3 ALMEMO 2590A Datenlogger zur Messung der Temperaturentwicklung
- 4 Zelle 1 mit durchgehender Fräsung und Polymidfolie zur Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit (Anschluss Port 1+2 W-BOX)
- 5 Zelle 2 mit durchgehender Fräsung und Polymidfolie zur Messung der Longitudinalwellengeschwindigkeit (Anschluss Port 3+4 W-BOX)
- 6 Zelle 3 zur Bestimmung der Temperaturentwicklung des 3D-Druckmörtels

Ultraschallmessung

Konstruktionszeichnung

Untersuchung der rheologischen Frisch- und Festmörteleigenschaften durch die Anwendung von zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfmethoden:

Messung der Erstarrungszeiten über den Eindringwiderstand (Texture Analyzer und Vicat)

Analyse der Konsistenz und Verarbeitbarkeit (Hägemann)

Charakterisierung der lastunabhängigen Verformung (Schwindkegel und Schwindprisma)

Wärme- und Temperaturverlauf (Kalorimetrie)

Biegezug- und Druckfestigkeitsprüfungen

Analyse des Verbundverhaltens des 3D-Druckmörtels:

Konstruktionszeichnung Ultraschall

Versuchsstand Ultraschallmessungen (Schichtverbund)

Haftzugprüfungen

Darstellung und Auswertung der Untersuchungsergebnisse:

Entwicklung der Ultraschall Parameter über die Zeit.

- Bei Impedanz- und Geschwindigkeitszunahme ist eine ansteigende Erhärtung und Erstarrung des 3D-Druckmörtels festzustellen.
- Immenser Einfluss von Wellenlänge λ und Frequenz f bei der Evaluierung der Ultraschalldaten.
- Korrelation zwischen Erstarrungszeiten nach Vicat (DIN EN 196-3) und Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten in Verbindung mit Ultraschall erkennbar.

Zeitliche Entwicklung der Ultraschallgeschwindigkeit v und Wellenlänge λ (Verifizierung mit Messsystem der Firma Vallen in blau)

Gegenüberstellung der Ultraschallgeschwindigkeit mit den Erstarrungszeiten nach Vicat

Mischungen:	(1)	(2)	MW	(3)	(4)	MW
Wassergehalt	13.5%	13.5%		14.0%	14.0%	
Erstarrungsbeginn [min]	10	9.5		8	9	
Erstarrungsende [min]	23.5	20.5		31	34	
v [m/s] bei EE	650	625	637.5	500	520	636
v [m/s] bei EE	1280	1480	1380	1800	2012	1906
vmax [m/s]	3900	3900	3900.00	3300	3300	3300.00
vmax [%] bei EE	16.67	16.03	16.36	16.67	15.76	16.24
vmax [%] bei EE	32.62	37.95	35.38	54.55	60.97	67.76

Anmerkung: vmax Mischungen 3 und 4 nicht ganz der Höchstwert, weil nur 16 s Messdauer
Legende: v = Ultraschallgeschwindigkeit; EE = Erstarrungsbeginn; EE = Erstarrungsende

Ergebnisse der zerstörenden und zerstörungsfreien Prüfmethoden

Temperaturverlauf

Ausbreitmaß

Biegezugfestigkeit

Druckfestigkeit

Volumetrische Verformungsmessungen

Lineare Verformungsmessungen

Verbundverhalten mittels Ultraschall

Verbundfestigkeit Schichten

Zusammenfassung und Ausblick:

In Bezug auf die additive Betonfertigung ist zu konstatieren, dass das Material ein rapides Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten aufweist, wodurch eine optimale Pumpbarkeit und Extrudierbarkeit nur für eine kurze Zeitspanne zur Verfügung steht. Durch die Erhöhung des Wassergehaltes kann der Zustand des optimalen Fließverhaltens länger aufrechterhalten werden, jedoch wird dabei die Festigkeitsentwicklung gehemmt. Das rasche Erstarrungs- und Erhärtungsverhalten des 3D-Druckmörtels, ermöglicht es die nächste Schicht in einem kurzen Austragungsintervall aufzutragen. Denn das Material ist steif genug, um nicht zu fließen und sein Eigengewicht und das der nachfolgenden Schichten tragen zu können. Aufgrund des rasanten plastischen Schwindverhaltens sollte zur Vermeidung von Mikrorissen eine adäquate Nachbehandlung des Werkstoffes, insbesondere in den ersten 24 h nach dem Anmischen erfolgen.