

Zusammenfassung der Promotionsschrift

Ultraschallgestützte Betonherstellung

Konzept für eine ressourcenschonende Betonproduktion

vorgelegt von

M.Sc. **Ricardo Remus**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor-Ingenieur

an der Fakultät Bauingenieurwesen
der Bauhaus-Universität Weimar

Mentor: Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
Status des Doktoranden: intern

Cottbus, 26.01.2022

Problemstellung und Zielsetzung der Arbeit

1. Aktuell findet aufgrund gesellschaftspolitischer Forderungen in vielen Industriezweigen ein Umdenken in Richtung Effizienz und Ökologie aber auch Digitalisierung und Industrie 4.0 statt. In dieser Hinsicht steht die Bauindustrie, im Vergleich zu Industrien wie IT, Automobil- oder Maschinenbau, noch am Anfang. Dabei sind die Potentiale bezüglich Ressourceneffizienz und Prozessoptimierung gerade in der Bauindustrie besonders hoch.
2. Die internationale Ressourcen- und Klimadebatte führt verstärkt dazu, dass nun auch im Bauwesen mit großer Intensität nach neuen Lösungsansätzen gesucht wird. Einerseits erfolgt intensive Forschung und Entwicklung im Bereich alternativer, klimafreundlicher Zemente. Andererseits werden auch auf Seiten der Betonherstellung innovative Konzepte geprüft.
3. Aufgrund der hohen Anforderungen an Konstruktion, Qualität und Langlebigkeit von Bauwerken, besitzen Betonfertigteile oftmals Vorteile gegenüber Ortbeton. Perspektivisch wird sich deshalb die Herstellung von Betonbauteilen immer stärker von der Baustelle in das Fertigteilwerk verlagern. Dabei müssen die vorhandenen Prozesse kritisch analysiert und optimiert werden.
4. Bei der Herstellung von Betonteilen im Fertigteilwerk liegt ein besonderer Fokus auf der Optimierung der Frühfestigkeitsentwicklung. Hohe Frühfestigkeiten sind Voraussetzung für einen hochfrequenten Schalungszyklus, was Arbeiten im 2- bzw. 3-Schichtbetrieb ermöglicht. Oft werden zur Sicherstellung hoher Frühfestigkeiten stark aufgemahlene Portlandzemente in Kombination mit hohen Zementgehalten im Beton und/oder mit einer Wärmebehandlung eingesetzt. Unter diesen Rahmenbedingungen ist eine ökologisch nachhaltige Betonproduktion mit verminderter CO₂-Bilanz nicht möglich.
5. Zielstellung der Arbeit ist die Erforschung einer ultraschallgestützten Betonherstellung mit dem Ziel, die Betonerhärtung zu beschleunigen. Hierbei werden die Betonbestandteile Zement und Wasser in Form einer Zementsuspension mit Ultraschall vorbehandelt. Die Arbeit soll die Grundlagen dafür legen, einen entsprechenden Prozess in der industriellen Betonproduktion zu nutzen und somit eine Beschleunigung der Betonerhärtung auf klimafreundliche, energieeffiziente Weise zu ermöglichen.

Stand der Wissenschaft

6. Das untersuchte Verfahren führt bereits bekannte technologische Konzepte des zweistufigen Betonmischens (bzw. Suspensionsmischen) sowie der Sonochemie zusammen.
7. Das Suspensionsmischverfahren beinhaltet das separate Vormischen von Zement und Wasser (sowie evtl. Feinstbestandteile und Zusatzmittel) und die Vermischung dieser Zementsuspension mit den Gesteinskörnungen in einen sekundären zweiten Schritt. Dem Verfahren liegt die Erkenntnis zu Grunde, dass Zement und Wasser wesentlich höhere Mischenergien zum vollständigen Aufschluss benötigen, als die übrigen Bestandteile des Betons. Vor allem im Zuge der Entwicklung von sog. Hochleistungs- und Ultrahochleistungsbetonen wurde diese Art des Mischens verstärkt untersucht.
8. In der Sonochemie wird Ultraschall mit dem Ziel eingesetzt, chemische Reaktionen zu beeinflussen, um zum Beispiel den Reaktionsumsatz zu erhöhen. Am FIB wurde in Vorgängerarbeiten bereits herausgearbeitet, dass Ultraschall in zementären Systemen in der Lage ist, die Hydratation von Zement bzw. dessen Hauptbestandteil Tricalciumsilikat (C₃S) zu beschleunigen. Die Überführung dieser Ansätze in einen

größentechnischen Herstellprozess ist allerdings bislang noch nicht gelungen. Nach wie vor werden hier für eine schnelle Betonerhärtung spezielle Betonzusammensetzungen, verschiedene Verfahren der Wärmebehandlung sowie anorganische oder organische Zusatzmittel genutzt. Oftmals stehen diese Konzeptionen im Widerspruch zu der Zielstellung einer nachhaltigen CO₂-armen Betonherstellung

Eingesetzten Methoden

9. Die Arbeit ist in 3 Abschnitte unterteilt, bei denen der Abstraktionsgrad zu einer realen Betonproduktion sukzessive reduziert wird. Der erste Teil der Arbeit umfasst grundlegende Untersuchungen am Modellsystem C₃S - Ca(OH)₂. Im zweiten Teil der Arbeit werden Portlandzementsuspensionen betrachtet. Der dritte Teil der Arbeit beschäftigt sich dann mit Betonen bis hin zu einer Anwendung der neuen Technologie im industriellen Maßstab.
10. In den Untersuchungen am Modellsystem C₃S - Ca(OH)₂, werden die Hydratation von beschallten Suspensionen mittels Messung der elektrischen Leitfähigkeit, Analyse der Ionenkonzentration mittels ICP-OES, Thermoanalyse, Messung der BET-Oberfläche sowie einer optischen Auswertung mittels Rasterelektronenmikroskopie (REM) verfolgt. Der Fokus liegt entsprechend der Zielstellung auf den ersten Stunden der Hydratation.
11. Die Untersuchungen an Zementsuspensionen werden auf der Basis von statistischen Versuchsplänen durchgeführt. Dabei werden Modelle erstellt, die das Verhalten der einzelnen Faktoren beschreiben. Zur Beschreibung der Fließeigenschaften werden das Setzfließ- und Ausbreitmaß von Zementsuspensionen bestimmt. Die Beschleunigung der Erhärtung wird mit Hilfe der Ermittlung des Zeitpunkts des Erstarrens der Zementsuspension bestimmt.
12. Im nächsten Schritt werden die Untersuchungen auf den Betonmaßstab mit Hilfe einer Technikumsanlage erweitert. Dabei wird zunächst der Einfluss des zweistufigen Mischens mit Ultraschall auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften betrachtet. Darüber hinaus wird ein umfangreiches Untersuchungsprogramm zur Bewertung der Dauerhaftigkeit durchgeführt. Aufbauend auf den Erfahrungen mit der Technikumsanlage wird das Ultraschall-Vormischsystem in mehreren Stufen weiterentwickelt und abschließend in einem Betonwerk zur Betonproduktion verwendet.

Wesentliche Ergebnisse

13. In den Untersuchungen am Modellsystem zeigt sich, dass die Beschleunigungswirkung in verdünnten Suspensionen (w/f-Wert = 50) stark von der Portlanditkonzentration der Lösung abhängt. Je niedriger die Portlanditkonzentration, desto größer die Beschleunigungswirkung. Ergänzende Untersuchungen der Ionenkonzentration der Lösung sowie am hydratisierten C₃S zeigen, dass unmittelbar nach der Beschallung erste Hydratphasen vorliegen. Die durch Ultraschall initiierte Beschleunigung ist in den ersten 24 Stunden am stärksten und klingt dann sukzessive ab. Die Untersuchungsergebnisse werden durch Experimente an C₃S-Pasten (w/f-Wert = 0,50) bestätigt. Infolge der Beschallung wird ein früheres und verstärktes Auftreten von C-S-H Phasen festgestellt. Optisch zeigt sich, dass die C-S-H Phasen der beschallten Pasten nicht nur viel früher auftreten, sondern kleiner sind und fein verteilt über der Oberfläche des C₃S vorliegen.
14. Die Ergebnisse der Untersuchungen an Zementsuspensionen zeigen, dass es besonders bei den Verarbeitungseigenschaften der Portlandzementsuspensionen zur

Ausbildung eines spezifischen Energieeintrages kommt. Bis zu diesem Punkt wird die Verarbeitbarkeit (Setzfließ- und Ausbreitmaß) verbessert. Bei Überschreiten dieses Punktes, der als kritischer Energieeintrag definiert wurde, nimmt das Setzfließ- und Ausbreitmaß wieder ab. Das Auftreten dieses Punktes ist im besonderen Maße abhängig vom w/z-Wert. Mit sinkendem w/z-Wert wird der Energieeintrag, der eine Verbesserung der Fließeigenschaften hervorruft, reduziert.

15. Wird Fließmittel vor der Beschallung zur Zementsuspension zugegeben, können die Eigenschaften der Zementsuspension maßgeblich beeinflusst werden. In beschallten Suspensionen mit Fließmittel konnte, in Abhängigkeit des Energieeintrages, die fließmittelbedingte Verzögerung des Erstarrungsbeginns deutlich reduziert werden. Weiterhin zeigt sich, dass der Energieeintrag, der notwendig ist, um den Erstarrungsbeginn um einen festen Betrag zu reduzieren, bei Suspensionen mit Fließmittel deutlich reduziert ist.
16. Auf Grundlage der Beobachtungen an Zementsuspensionen wird der Einfluss von Ultraschall in einen dispergierenden und einen beschleunigenden Effekt unterteilt. Bei hohen w/z-Werten dominiert der dispergierende Einfluss von Ultraschall und der Erstarrungsbeginn wird moderat verkürzt. Bei niedrigeren w/z-Werten dominiert der beschleunigende Effekt, wobei kein oder sogar ein negativer Einfluss auf die Verarbeitungseigenschaften beobachtet werden kann.
17. Die Untersuchungen am Beton zeigen eine deutliche Steigerung der Frühdruckfestigkeiten des Portlandzementbetons. Hierbei kann die zum Entschalen von Betonbauteilen notwendige Druckfestigkeit von 15 MPa deutlich früher erreicht werden als bei unbeschallten Vergleichsbetonen. Das Ausbreitmaß der Betone (w/z-Wert = 0,47) wird infolge der Beschallung leicht reduziert.
18. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass das Beschleunigungspotential der Ultraschalltechnologie genutzt werden kann, um entweder die Festigkeitsklasse des Zementes leitungsneutral zu reduzieren (von CEM I 52,5 R auf CEM I 42,5 R) oder eine 4-stündige Wärmebehandlung vollständig zu substituieren. Die Dauerhaftigkeit der beschallten Betone wird dabei nicht beeinflusst.
19. In den darauf aufbauenden Untersuchungen wird die Anlagentechnik weiterentwickelt, um das Ultraschallvormischen stärker an eine reale Betonproduktion anzupassen (Anlagenkonzept 2). Dabei wird auch eine neue Betonrezeptur mit höherem w/z-Wert (0,52) verwendet. Im Gegensatz zum ersten Beton, wird mit diesem Beton neben der Anfangsfestigkeit auch das Ausbreitmaß gesteigert, was zur Reduktion von Fließmittel genutzt werden kann.
20. Ein Vergleich dieses beschallten Betons mit einem Beton, der mit einem kommerziell erhältlichen Erhärtungsbeschleuniger auf Basis synthetischer C-S-H Keime versetzt wurde zeigt, dass die Beschleunigungswirkung beider Maßnahmen vergleichbar ist. Eine Kombination beider Technologien führt zu einer weiteren deutlichen Steigerung der Frühfestigkeiten, so dass hier von einem synergistischen Effekt ausgegangen werden kann.
21. In der letzten Iterationsstufe, dem Anlagenkonzept 3, wird beschrieben wie das Mischsystem im Rahmen einer universitären Ausgründung signifikant weiterentwickelt und erstmals in einem Betonwerk zur Betonproduktion verwendet wird. Die Ergebnisse zeigen, dass die ultraschallgestützte Betonherstellung die Druckfestigkeitsentwicklung auch im Werksmaßstab deutlich beschleunigen kann. Damit wird die Voraussetzung für eine Optimierung des Herstellprozesses von Fertigteilbetonen hinsichtlich Nachhaltigkeit und Klimafreundlichkeit geschaffen.