



**TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DRESDEN**

Institut für Massivbau <http://massivbau.tu-dresden.de>

SILKE SCHEERER, MANFRED CURBACH (HRSG.)

LEICHT BAUEN MIT BETON

**FORSCHUNG IM
SCHWERPUNKTPROGRAMM 1542
FÖRDERPHASE 1**

Mischungsentwicklung für funktional gradierten Betonbau

T. Sören Sippel
Hans-Wolf Reinhardt
Institut für Werkstoffe im Bauwesen,
Universität Stuttgart

Um eine funktionale Gradierung im Betonbau zu erzielen, werden zwei Betonmischungen mit konträren Eigenschaften benötigt. Je nach Herstellungsverfahren sind die Materialzusammensetzung und damit die Verarbeitbarkeit, Dichte und Festigkeit beider Mischungen anzupassen. Grundsätzlich soll dabei eine der beiden Mischungen gute Festigkeitseigenschaften bei minimaler Porosität zeigen und für die Aufgaben des statischen Lastabtrags geeignet sein. Die zweite Mischung hingegen ist durch einen hohen Luftporenanteil sehr leicht und wenig fest, kann dafür jedoch mit verbesserten Wärmedämmwerten auch bauphysikalische Anforderungen erfüllen. Ziel in einem interdisziplinären Forschungsvorhaben ist, beide Mischungen in unterschiedlichen Verfahren stufenlos und kontinuierlich ineinander zu überführen und somit funktional gradierte Betonbauteile in einem teilautomatisierten Verfahren herzustellen.

1 Einführung

Zu Beginn des Forschungsprojektes geht es zunächst darum, geeignete Beton- oder Mörtelmischungen in Abhängigkeit des Herstellungsverfahrens für funktional gradierte Bauteile zu finden. Dabei kann auf die Mischungsentwürfe und Ergebnisse aus [1] und [2] zurückgegriffen werden. Durch die Herstellung von Betonmischungen mit unterschiedlichen Zuschlägen und Luftporenbildnern entstehen Betone mit variierender Dichte und unterschiedlichen Materialeigenschaften. Als äußere Grenzen der funktional gradierten Bauweise dienen für die weitere Forschungstätigkeit zwei Mischungen mit völlig divergierenden Eigenschaften hinsichtlich statischer und bauphysikalischer Zielgrößen, im Folgenden als Mischung I und Mischung II bezeichnet.

Mischung I verknüpft die Eigenschaft minimaler Porosität mit zugehöriger maximaler Festigkeit. Mischung II besitzt gegenläufige Eigenschaften mit maximaler Porosität und zugehöriger geringer Festigkeit (siehe bitte auch Bild 3 im Beitrag von WOLF ET AL. im vorliegenden Band). An beide Mischungen sind zudem Anforderungen unterschiedlicher Herstellungsverfahren gestellt, weshalb möglichst wenig Komponenten für die Zusammensetzung gewählt werden, um sowohl eine Veränderung der Zusammensetzung als auch die Anpassung an die jeweiligen Herstellungsverfahren nachvollziehbar zu ermöglichen.

2 Mischungsentwicklung für Nassspritzverfahren

Die grundlegenden Bestandteile der Mischung I sind Zement CEM I 52,5 R, Sand 0/2 als Gesteinskörnung und Wasser. Für die Mischung II wird der Sand durch einen Blähglas-Leichtzuschlag 1/2 ersetzt und es werden zusätzliche Porosierungsmittel verwendet (hier: Sika-Aer Solid). Je nach Herstellungsmethode ergeben sich so Frischbetonrohichten von $\rho_{FB,I} = 2,27 \text{ kg/dm}^3$ bis $\rho_{FB,II} = 0,37 \text{ kg/dm}^3$. Gleichzeitig reduziert sich der Zementgehalt von über 400 kg/m^3 bei Mischung I auf lediglich 120 kg/m^3 in Mischung II. Bei diesem geringen Zementgehalt lassen sich die Frischbetoneigenschaften mit Betonzusatzmittel nur sehr schwer oder gar nicht mehr einstellen. Trotzdem ist der Aspekt der Förderbarkeit im Nassspritzverfahren von großer Relevanz. Die geforderte Konsistenz für eine gleichmäßige Pumpbarkeit kann hierbei nur mit zusätzlichem Wasser erreicht werden. Dabei erhöht sich der w/z-Wert von 0,4 bei Mischung I

auf 1,5 in Mischung II. Niedriger Zementgehalt und die höhere Wasserzugabe führen zu sehr geringen Festigkeiten und zu langen Erstarrungs- und Erhärungszeiten [3]. Bei Verwendung in einem funktional gradierten Bauteil kommt es deshalb zu unerwünschten Vermischungen und zum Auftrieb leichter Mischungen, wie Bild 1 zeigt. Im weiteren Verlauf des Forschungsprojektes wird deshalb die Methode des Trockenspritzens weiter verfolgt. Dabei erfolgt die Wasserzugabe erst am Düsensystem oder über die Eigenfeuchte des Materials und kann nur in begrenztem Umfang variiert werden. Aus diesem Grund muss bei Mischung II der Zementgehalt deutlich erhöht werden, wodurch eine Herstellung im Bereich sehr geringer Rohdichten von $\rho_{FB,II,Tr} \leq 0,80 \text{ kg/dm}^3$ momentan noch ausgeschlossen wird [4].



Bild 1: Auftrieb einer leichten Betonmischung beim Nassauftrag [Foto: Gabriela Metzger]

3 Versuchsbeschreibung zur Automatisierung der Trockenspritz-Prozesskette

Erste Ergebnisse händischer Spritzversuche im Trockenspritzverfahren zeigen, dass große Streuungen in den Festigkeitseigenschaften nicht zu vermeiden sind, z. B. Bild 2. Beim gleichzeitigen Auftrag aus zwei Spritzdüsen sind bei manueller Herstellung gleichmäßige und reproduzierbare Ergebnisse nicht zu erreichen. Druckregelung, Düseneigenbewegung, Wasserzugabe und andere Parameter müssen gezielt gesteuert werden. In Zusammenarbeit mit dem Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart wird deshalb an einer automatisierten Prozesskette gearbeitet. Der Prototyp der Herstellungsplattform ist dazu bereits aufgebaut. Fotos des Prototyps sind in den Beiträgen von WOLF ET AL. und WÖRNER/SAWODNY in diesem Buch enthalten. Dieser kann durch gezielte Ansteuerung zwei Spritzdüsen in beliebigen Raumrichtungen automatisiert führen und den Übergangsbereich von Mischung I nach Mischung II beliebig erzeugen. Erste Versuchsserien dienen zur Verifizierung der theoretischen Ansätze und sind aktuell in Bearbeitung.

3.1 Materialförderung

Wichtigstes Merkmal der automatisierten Spritztechnik (Bild 3) ist ein gleichmäßiger und steuerbarer Materialstrom. Dabei ist die Menge des geförderten Materials von folgenden Parametern abhängig: Drehzahl des Rotors der Trockenspritzmaschine, Kammervolumen des Drehtellers, anliegender Luftdruck (beeinflusst den Druck im Förderschlauch, den Ausblasgrad der einzelnen Drehtellerkammern und die Verdichtung des aufgetragenen Materials), Schüttdichte des Materials, Korngrößenverteilung und Beschaffenheit des Materials, Eigenfeuchteanteil des Fördermaterials und Ausblasfaktor der Kammern.



Bild 2: Probekörper mit ungleichmäßigem Gefüge [Foto: T. Sören Sippel]



Bild 3: Betontechnologie für den Herstellungsprozess
[Foto: Gabriela Metzger]

Die maschinenabhängigen Faktoren werden zu Beginn der Versuchsserien ermittelt, Herstellerangaben werden überprüft und bei allen Versuchen soweit wie möglich messtechnisch erfasst. So konnte eine tatsächliche Drehzahlgeschwindigkeit von 0,1 U/s, also sechs Umdrehungen des Rotortellers pro Minute, als Startwert festgelegt werden. Der für den Volumenstrom der Luft notwendige Luftdruck wurde zwischen 1,4 bis 2,5 bar variiert. Die Spritstreifen veränderten sich dadurch jedoch nur geringfügig. Bei höheren Werten wurde ein etwas gleichmäßiger und flacherer Spritzauftrag festgestellt. Mit diesen Einstellungen werden bei Verwendung der Mischung I innerhalb einer Minute 26 kg Frischbeton gefördert, wobei rund 87,2 M.-% als Betonauftrag aufgebracht werden und die restlichen 12,8 M.-% als Rückprall ungenutzt bleiben.

Über eine Absaugvorrichtung wird der Rückprall nach jedem Materialauftrag entfernt, damit möglichst wenig davon in das Bauteil eingebaut wird. Gleichzeitig wird eine weitere Verwertung des abgesaugten Rückpralls, eventuell direkt wieder als Zuschlag für die Mischungskonzeption, untersucht. Durch geeignete Parametereinstellungen wie Feuchtegehalt der Ausgangsmaterialien, Druckregelung und optimierte Wassereinstellung in Vor- und Hauptbenetzung kann der Anteil des Rückpralls weiter reduziert werden.

Das Kammervolumen des Rotordreh Tellers beträgt laut Herstellerangabe 3,7 Liter bei 15 Kammern. Dieser Wert konnte bei eigenen Versuchen bestätigt werden. Wichtiger für die Materialförderung ist jedoch der Ausblasgrad. Auch bei hohem Druck werden die einzelnen Kammern der Rotorscheibe nicht vollständig ausgeblasen. Laut Hersteller verbleiben rund 30 % des Materials in den Kammern. Erste Versuche mit Mischung I bestätigten diesen Wert. Jedoch ist zu erwarten, dass der Ausblasgrad bei Mischungen mit leichtem Zuschlag und bei geringer Eigenfeuchte deutlich höher liegen wird. Weitere Versuche dazu sollen diesen Wert verifizieren oder die Veränderung des Ausblasgrades bestimmen.

Der Eigenfeuchteanteil der Ausgangsmaterialien beeinflusst in hohem Maße sowohl die Gleichmäßigkeit des Fördervolumenstroms in den Trockenspritzschläuchen bis zur Spritzdüse als auch den Rückprallanteil. Je höher der Feuchtegehalt, desto geringer die Menge des Rückpralls. Allerdings verursacht ein hoher Feuchtegehalt Pulsationen im Förderstrom, was einen gleichmäßigen Materialauftrag erschwert. Der Feuchtegehalt des Sand-Zement-Gemisches konnte bei der Versuchseinrichtung vor Ort bis jetzt noch nicht direkt überprüft werden. Dies wird in kommenden Versuchen nachgeholt, um dann einen Zusammenhang zwischen Rückprallmenge in Anhängigkeit des Feuchtegehalts der Ausgangsmaterialien herleiten zu können.

3.2 Wasserzugabe

Für die Festbetoneigenschaften des ausgebrachten Materials sind der Wassergehalt und damit das Verhältnis von Wasser und Zement von größter Bedeutung. In der Versuchseinrichtung erfolgt die Wasserzugabe über drei unterschiedliche Wege und kann so variiert und gesteuert werden. Zunächst gelangt Wasser über die Eigenfeuchte des Sandes bzw. anderer Ausgangsmaterialien in den Beton. Dieser Wert kann während des Versuches nicht verändert werden und ist im Vorfeld op-

timal zu wählen. Über eine Vorbenetzung am Förderschlauch ca. 4 m vor der Düsen Spitze und eine Hauptbenetzung direkt vor der Düsen Spitze wird das benötigte restliche Wasser zugegeben. Diese Wasserzugabe kann separat für beide Trockenspritzmaschinen TSM 1 und TSM 2 gesteuert werden. Erste Versuchsreihen zeigen den Zusammenhang der Aktoreinstellung und der tatsächlichen gemessenen Wassermenge (Bild 4). Um die Wasserausflussmenge genau steuern zu können, wurde durch das Institut für Systemdynamik der Universität Stuttgart eine Regelung des Durchflusses implementiert (siehe bitte den Beitrag von WÖRNER/SAWODNY).

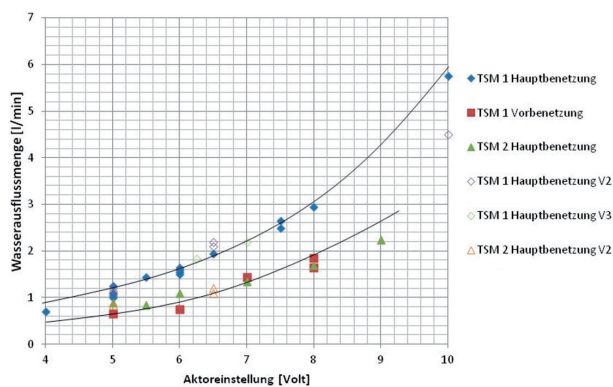


Bild 4: Versuchsreihe zum Wasserausfluss in Abhängigkeit der Aktoreinstellung der Trockenspritzmaschinen

3.3 Rückprallbestimmung

Unerwünschte Begleiterscheinung beim Trockenspritzen von Beton ist der Rückprall von Material. Dieser lässt sich beim Trockenspritzen nicht gänzlich vermeiden und verändert zudem die Zusammensetzung des Spritzbetons gegenüber dem Ausgangspritzgemisch. Außerdem steht eine erhöhte Rückprallmenge den ökologischen und ökonomischen Grundprinzipien des Forschungsprojektes entgegen. Durch den Aufbau des Versuchstandes mit senkrecht nach unten geführter Spritzrichtung wird zudem ein Teil des Rückpralls in das Bauteil eingebaut. Ziel erster Versuchsreihen ist deshalb die Minimierung der Rückprallmenge oder die Entfernung von losem Material vor dem endgültigen Einbau. Als Hauptfaktoren für einen hohen Rückprall konnten die Eigenfeuchte des Ausgangsmaterials, Art und Menge der Wasserzugabe sowie der Förderdruck identifiziert werden. Versuche mit unterschiedlichem Feuchtegehalt des Sandes führten dabei zu den größten Streuungen. Bei konstanten Einstellungen von Drehzahl, Druck, Wasserzugabe, Spritzabstand und Düsenbewegungsgeschwindigkeit wurde über ein definiertes Zeitintervall ein Spritzstreifen auf eine ebene Fläche – in diesem Fall eine Schalplatte – gespritzt. Nach dem Spritzvorgang wurden das lose Material und das aufgebraute und verdichtete Material des Spritzstreifens getrennt gewogen und ins Verhältnis zueinander gestellt. Dabei lag die Rückprallmenge bei feuchterem Sand bei 12,8 M.-% und bei trockenem Sand bei 24,5 M.-%.



Bild 5: Einbau von losem Rückprall in Probekörper
[Foto: T. Sören Sippel]

3.4 Spritzstreifen

Um später den Aufbau eines gradierten Bauteils zu ermöglichen und gezielt steuern zu können, ist eine Charakterisierung der aufgebraute Spritzstreifen notwendig. Abhängig vom Spritzdüsenabstand und der Düsen eigenbewegung ergeben sich unterschiedliche Schichtaufbauten. Auch Wassergehalt, Druckeinstellung und Mischungszusammensetzung verändern die Form sowie die späteren Eigenschaften der Spritzstreifen. Erste manuelle Vermessungen bei zuvor festgelegten Parametern nach Abschnitt 3.1 und bei 80 cm Spritzabstand (ohne Düsen eigenbewegung) ergeben Spritzstreifen von ca. 30 cm Breite mit einer maximalen Höhe in Streifenmitte von 1,2 bis 1,5 cm (Bild 6). Durch eine augenscheinliche Prüfung erfolgt weiterhin eine Charakterisierung hinsichtlich Gleichmäßigkeit, Fehlstellen und Oberflächenbeschaffenheit der Spritz-



Bild 6: Manuelle Vermessung eines Spritzstreifens
[Foto: T. Sören Sippel]

streifen, wie zum Beispiel Einschlagkrater von großen Sandkörnern, seitliches Wegfließen oder Durchmischung aller Materialien. An der Versuchseinrichtung angebrachte Sensoren ermöglichen zusätzlich eine automatisierte Vermessung des Spritzauftrags (s. Beitrag WÖRNER/SAWODNY). Durch manuelle und automatische Vermessung kann die automatisierte Prozesskette optimiert werden, um so einen gleichmäßigen Schichtauftrag in Abhängigkeit aller relevanten Parameter als Grundlage für den späteren gradierten Bauteilaufbau realisieren zu können.

trag in Abhängigkeit aller relevanten Parameter als Grundlage für den späteren gradierten Bauteilaufbau realisieren zu können.

4 Anstehende Arbeitsschritte

4.1 Weitere Versuchsreihen

Die zu steuernden Parameter aus Kapitel 3 sind in weiteren Versuchsserien für beide Mischungen I und II festzulegen. Außerdem muss das Fördervolumen beider Mischungen variabel steuerbar sein, um später einen gradierten Verlauf erzeugen zu können. Die Abhängigkeit des Fördervolumens von Drehzahlgeschwindigkeit, Förderdruck und Wasserzugabe muss also in bestimmten einstellbaren Grenzen bekannt sein. Dazu werden die oben beschriebenen Versuche mit beiden Mischungen bei unterschiedlichen Drehzahlen durchgeführt. Festbetonprüfungen an gespritzten oder ausgesägten Prismen, Bestimmung des Rückpralls und Beurteilung der Spritzstreifen ermöglichen dann eine iterative Optimierung des Herstellungsprozesses.

4.2 Zerstörungsfreie Prüfungen

Sobald eine Kopplung des Entwurfprozesses an die automatisierte Herstellung möglich ist und definierte funktional gradierte Bauteile hergestellt werden können, soll die innere Struktur und der Aufbau der Gradierung mittels zerstörungsfreier Prüfungen untersucht werden.

In einem ersten Schritt werden dazu homogen gefertigte Prüfkörper verschiedenen Prüfmethoden unterzogen. Geplant ist hier vor allem der Einsatz von Ultraschall-Transmissionsmessungen, Infrarotthermographie und Computertomographie. Die gewonnenen Erkenntnisse werden dann für die Prüfung gradierter Bauteile genutzt. Bei den Ultraschallmessungen kann der Dichteverlauf des Bauteils über eine schichtweise Anordnung der Schallempfänger in beliebiger Raumrichtung ermittelt werden. Die Infrarotthermographie ermöglicht dagegen nur eine Oberflächenbetrachtung. Zur Prüfung der bauteilimmanenten Gradierung muss der Probekörper aufgeschnitten und lagenweise abgebildet werden.

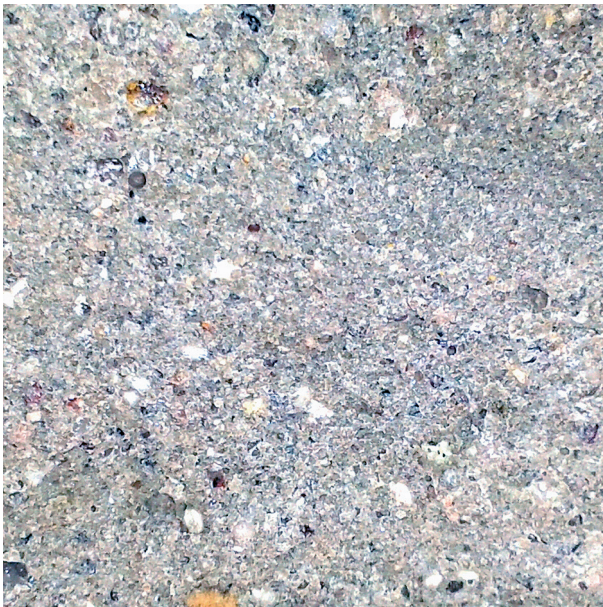


Bild 7: Probekörper mit homogenem Aufbau
[Foto: T. Sören Sippel]

5 Ausblick

Alle erzielten Ergebnisse der in den Kapiteln 3 und 4 beschriebenen Versuche geben Rückmeldung, inwieweit die Parameter im Herstellungsprozess und in der Fertigung gradierter Bauteile

angepasst und optimiert werden können. Somit kann dann durch die Automatisierung der Prozesskette das Ziel einer reproduzierbaren Bauteilherstellung vorgegeben werden. Dadurch soll es möglich sein, ein durch Entwurf und Berechnung vorgegebenes Gradientenprofils auf das Bauteil zu übertragen, mehrere dieser Bauteile mit gleichem Aufbau und gleichen Eigenschaften in Serie zu fertigen und diese Bauteile schließlich auch zu prüfen. Nach dem jetzigen Stand der Forschungsarbeiten im Rahmen des Projektes *Optimalstrukturen aus funktional gradiertem Beton* lässt sich zusammenfassend festhalten, dass die Ziele der interdisziplinären Forschergruppe in einem Prototypen der Herstellungsplattform für funktional gradierte Betonbauteile zusammengeführt werden konnten.

Literatur

- [1] HEINZ, P.; HERRMANN, M.; SOBEK, W.: Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen. Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau (1/2011), Stuttgart: ILEK, 2011.
- [2] SIPPPEL, T. S.: Bestimmung der Eigenschaftsverläufe von Betonmischungen variierender Rohdichte für den Einsatz in funktional gradierten Bauteilen. Diplomarbeit, ILEK, Universität Stuttgart, 2009.
- [3] HAJATI, O.: Untersuchungen des Erstarrungs- und Erhärungsverhaltens von unterschiedlichen Mörtelmischungen. Bachelorarbeit, IWB, Universität Stuttgart, 2013.
- [4] Institut für Werkstoffe im Bauwesen IWB (Hrsg.): Jahresbericht 2011 bis 2013. Universität Stuttgart, vorauss. 09/2014.

Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen – Entwurf, Berechnung und automatisierte Herstellung

Projektleiter:

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek¹

Projektbearbeiter

Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Dr.-Ing. E.h. Hans Wolf Reinhardt³

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht³

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Oliver Sawodny²

Dipl.-Ing. Michael Herrmann¹

Dipl.-Ing. Jan Mittelstädt¹

Dipl.-Ing. Mark Wörner²

Dipl.-Ing. T. Sören Sippel³

Projektlaufzeit

05/2012 – 04/2015

Industriepartner

Otto Knecht GmbH & Co. KG, Metzingen

Sika Deutschland GmbH, Stuttgart

Werner Mader GmbH, Erbach

Winkel GmbH, Illingen

Festo AG & Co. KG, Esslingen

Kaeser Kompressoren SE, Coburg

Holcim Kies und Beton GmbH, Dotternhausen

Web

¹ <http://www.uni-stuttgart.de/ilek>

² <http://www.isys.uni-stuttgart.de>

³ <http://www.iwb.uni-stuttgart.de>