
Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken

Dipl.-Ing. Michael Herrmann, Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c. Werner Sobek
Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren, Universität Stuttgart

Dieses Forschungsvorhaben wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. (Aktenzeichen: F20-10-1-053 / II3 – F20-10-38)

Einleitung

Die gebaute Umwelt steht nicht nur für ca. 35 % des Energieverbrauchs und 35 % der Emissionen, sondern auch für 60 % des Ressourcenverbrauchs und – zumindest in Zentraleuropa – für mehr als 50 % des Massenmüllaufkommens. Das Bauwesen spielt somit eine zentrale Rolle bei der Bewahrung oder Zerstörung unseres Planeten (Sobek et al., 2010). Klar ist ebenso, dass wir angesichts der hinreichend bekannten Fakten wie Erderwärmung, zur Neige gehende Rohstoffe, steigende Energiekosten und zunehmende Zerstörung unseres Ökosystems endlich handeln müssen. Durch die Entwicklung von leichteren, sortenrein rezyklierbaren Bauteilen kann das Bauwesen zu einer signifikanten Reduktion des weltweiten Ressourcenverbrauchs, des Müllaufkommens, der Emissionen und des Energieverbrauchs beitragen. Ein wichtiger Schritt zur Entwicklung solcher Bauteile ist die Gradierung der zugrundeliegenden Werkstoffe.

Eine Gradierung der Eigenschaften ermöglicht es, die innere Struktur eines Bauteils optimal auf die Erfüllung der Anforderungen abzustimmen. Hoch beanspruchte Zonen werden dabei mit hochfestem Material belegt, in niedrig beanspruchten Zonen poröse Materialien mit einer der Beanspruchungshöhe kontinuierlich oder in Stufen angepassten Porengröße und/oder Porendichte angeordnet.

Die Anwendung des Konzepts der funktionalen Gradierung auf Bauteilen aus Beton bzw. Stahlbeton ist insbesondere dann vielversprechend, wenn innerhalb eines Bauteils inhomogene oder verschiedenartige Anforderungen auftreten. Mögliche Anwendungsbereiche sind, neben vorwiegend biegebeanspruchten Bauteilen wie Balken und Platten, auch Stützen und Wände, sowie Rohre, Schalenträgerwerke und Bauteile mit freier Geometrie. Geschossdecken und Außenwände haben sich als besonders relevant für die Anwendung des Konzepts der funktionalen Gradierung von Bauteilen erwiesen.

Stand der Forschung

Als Gradientenwerkstoffe werden solche Materialien bezeichnet, bei denen sich eine oder mehrere Eigenschaften, etwa die Härte, die Dichte, die Porosität oder die chemische Zusammensetzung, in mindestens einer Raumrichtung über eine bestimmte Länge kontinuierlich ändern (Rödel, 1996). Die Natur bietet vielfältige Beispiele für dieses

Optimierungsprinzip wie etwa die gradierten zellartigen Strukturen (Spongiosa) im Inneren von Knochen und funktionale Übergänge im zellularen Aufbau von Pflanzen oder der Haut (vgl. Abb. 1).



Abb. 1: Schnitt durch einen Oberschenkelhalsknochen als Beispiel natürlicher dichtegradierteter Strukturen

Der Forschungsbereich der Gradientenwerkstoffe wurde 1971 von Forschern des Massachusetts Institute of Technology (MIT) durch die englische Bezeichnung „Functionally Graded Materials“ (FGM) eingeführt. Im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 733 „Gradientenwerkstoffe“ (1995-2003) (Kieback et al., 2003) wurden insbesondere Gradierungen zwischen Keramiken und Metallen, Metallen und Metallen sowie Keramiken und Polymeren untersucht. Diese Gradierungen haben bei den genannten Forschungsarbeiten in der Regel eine Ausdehnung von einigen hundert Mikrometern bis zu mehreren Millimetern.

Die Entwicklung des Gradientenbetons stellt einen neuen Forschungszweig dar, welcher erstmals vom ILEK aufgenommen wurde. Die Grundlagen konnten im Projekt „Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen“, kurz „Gradientenwerkstoffe im Bauwesen“ (Heinz et al., 2011), erforscht werden. Die Anwendung der Gradientenbetone auf biegebeanspruchte Bauteile wurde im Projekt „Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierteter Elementdecken“, kurz „Gradierte Elementdecken“ (Herrmann and Sobek, 2014), untersucht. Beide Projekte wurden dankenswerterweise durch die Forschungsinitiative Zukunft Bau des BMVBS ermöglicht. Die Weiterentwicklung der Automatisierung der Herstellungsverfahren wird derzeit im Rahmen des DFG-Schwerpunktprogramms 1542 „Leicht Bauen mit Beton“ im Teilprojekt „Optimalstrukturen aus funktional gradierten Betonbauteilen“ in einer Kooperation mit dem Institut für Systemdynamik und dem Institut für Werkstoffe im Bauwesen am ILEK erforscht.

Mischungsentwürfe für gradierten Beton

Eine Gradierung von Bauteilen aus Beton kann durch Anordnung unterschiedlicher Porositäten, Einbringen diverser Zuschlagstoffe (bis hin zu Hohlkörpern oder Zuschlägen mit bestimmten, gezielt gewählten Steifigkeiten), Verwendung unterschiedlicher Betone oder durch Kombination der genannten Maßnahmen erreicht werden. Zuerst wurden die beiden möglichen Extrema der Betone als Randbedingungen definiert. Als gefügedichtetes Extremum des Gradientenbetons wird ein hochfester Feinkornbeton gewählt. Das poröse Extremum des Gradientenbetons, die sogenannte Kernmischung, bildet ein haufwerksporiger Leichtbeton mit porosierter Matrix (Faust, 2003). Durch eine Minimierung der Porosität werden die statischen Eigenschaften verbessert. Durch die Maximierung der Porosität werden die Wärmedämmeigenschaften erhöht und das Eigengewicht reduziert. Zwischen diesen beiden Mischungen können die Eigenschaften durch eine Anpassung der Porosität innerhalb der Grenzen frei variiert werden. Exemplarisch und zur Definition der Eigenschaftsverläufe wurde dies in sieben Schritten durchgeführt. Die Festbetoneigenschaften lassen sich in Beziehung zur Porosität setzen. Bei steigendem Porenvolumen der Luftporen nehmen die statischen Eigenschaften wie Festigkeit und Steifigkeit ab, die bauphysikalischen Eigenschaften, wie eine abnehmende Wärmeleitfähigkeit λ , verbessern sich (vgl. Abb. 2). Die Prüfung der Festbetoneigenschaften der Mischungsentwürfe bestätigte diese bekannte Abhängigkeit von der Rohdichte

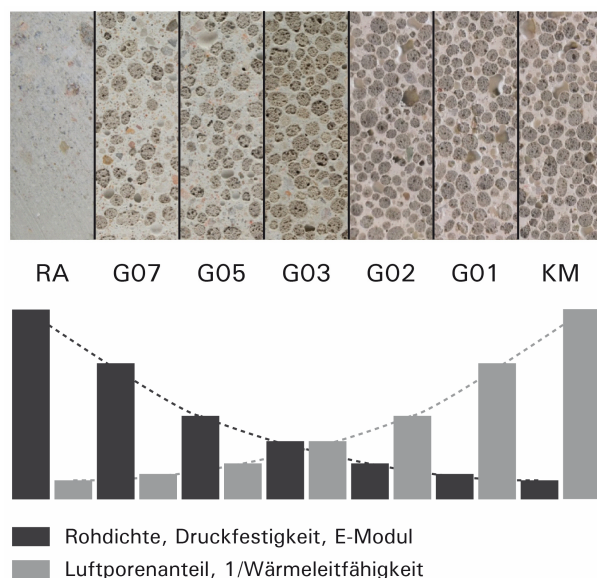


Abb. 2: Verlauf der Festbetoneigenschaften bei einer schrittweisen Erhöhung der Porosität

Herstellungsverfahren für Bauteile aus gradiertem Beton

Ausgehend von den homogenen Mischungsentwürfen wurden in einem nächsten Schritt Herstellungsverfahren entwickelt, die es ermöglichen, die „Gradierung in Stufen“ in eine möglichst fugenlose Gradierung zu überführen. Nachfolgend werden ausgewählte Herstellungsverfahren beschrieben. Weitere Versuche zu den Herstellungsverfahren

Betondrucken, Kontrolliertes Entmischen, Infiltration, Gradiertes Mischen und Herstellung mit reversiblen Platzhaltern sind im Abschlussbericht des Forschungsvorhabens „Gradientenwerkstoffe im Bauwesen“ (Heinz et al., 2011) beschrieben.

Schichtweises Gießen

Bei diesem Verfahren werden die zur Verfügung stehenden Mischungen unterschiedlichen Bereichen innerhalb eines Bauteils so zugeordnet, dass sie das dort erforderliche Anforderungsprofil erfüllen. Die Anzahl und Dicke der Schichten sowie die Variation der Mischung von Schicht zu Schicht, erlauben es, die Eigenschaftssprünge an den Schichtgrenzen des Bauteils zu steuern. Die Eigenschaften der einzelnen Schichten können punktgenau über die jeweils verwendete Betonmischung gewählt werden. Die Schichtengrenzen verbinden sich aufgrund des Nass-in-Nass-Einbaus und stellen bei einer ausreichend feinen Auflösung keine tragstrukturelle Schwachstelle dar. Abb. 3 zeigt die Herstellung eines skalierten Gradientenbetonbalkens für den Vier-Punkt-Biegeversuch im Umkehrverfahren. Der Träger besteht aus drei Schichten in vertikaler und in horizontaler Richtung.

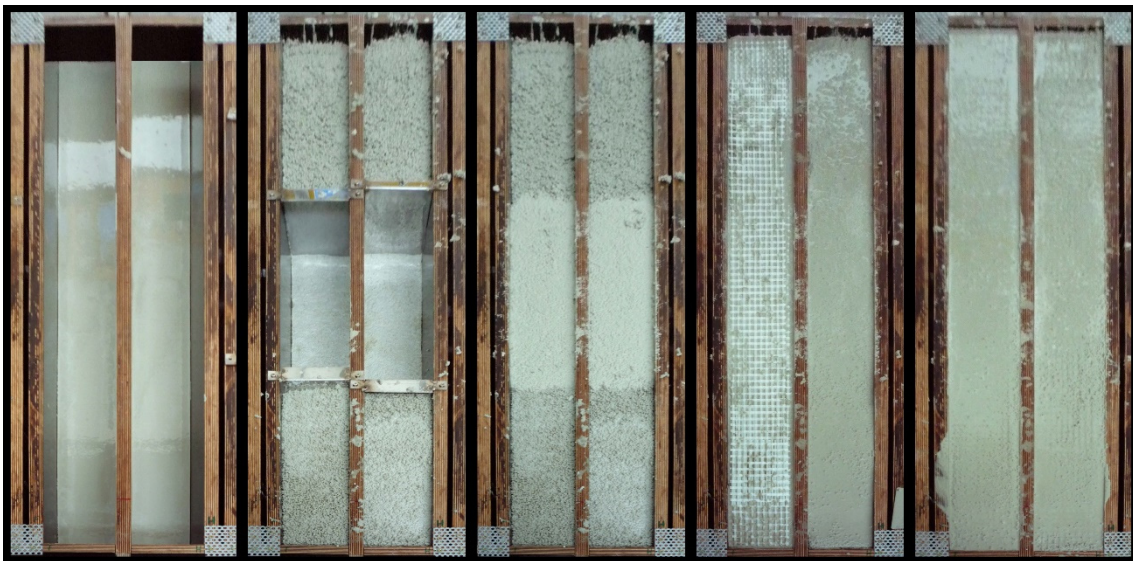


Abb. 3: Fertigung eines Gradientenbetonträgers im Schichtenverfahren

Gradientensprühtechnik

Die Sprühtechnik weist gegenüber schichtweisen Gießverfahren eine Reihe von Vorteilen auf. Während bei gegossenen Betongradienten der Eintrag von Verdichtungsenergie zu einer Aufhebung des vormals kontrolliert eingestellten Gradienten führen kann, kann bei Anwendung der Gradientensprühtechnik eine weitere Verdichtung entfallen, da der Beton bereits durch den Aufprall verdichtet wird. Der Materialauftrag in dünnen Schichten ermöglicht eine feine Auflösung und das Betonieren auf gekrümmten Schalungen. Zudem lässt sich das Verfahren automatisieren und sowohl im Fertigteilwerk wie auch auf der Baustelle (dort mithilfe der Großraumrobotik) umsetzen.

Im Rahmen des Forschungsvorhabens „Gradientenwerkstoffe im Bauwesen“ wurde ein Gradienten-Sprühverfahren entwickelt bei dem zwei homogene und förderbare Betonmischungen eingesetzt werden (vgl. Abb. 4). Die Gradientenbildung erfolgt im Sprühkopf oder im Sprühnebel mithilfe der zugeführten Druckluft. Eine Volumenstromregelung der Pumpen ermöglicht eine stufenlose Einstellung des Gradienten von niedrig bis hochfest, von schwer bis ultraleicht und weiter bis zu wärmedämmenden Eigenschaften.

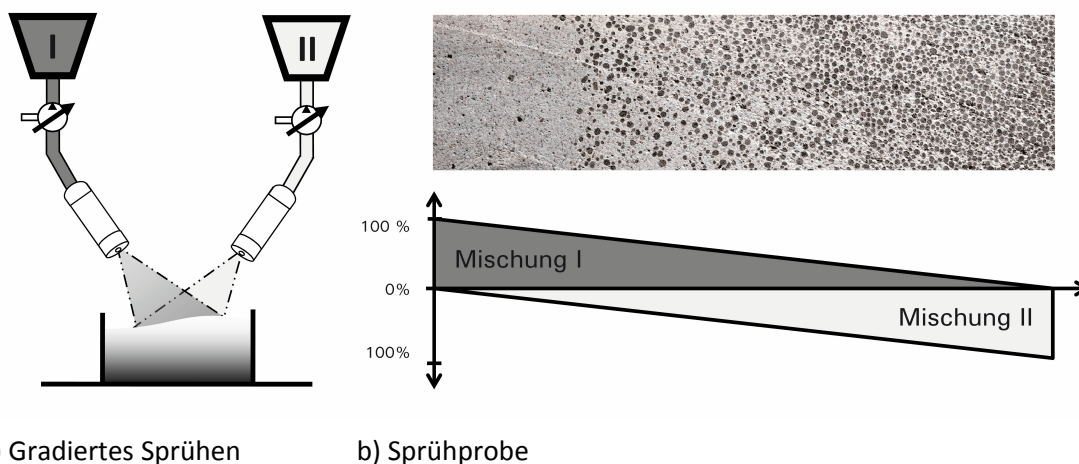


Abb. 4: Schema und Versuchsergebnis des Gradientensprühens

Die Genauigkeit des angewandten Verfahrens ist überwiegend abhängig von der Steuerung der Volumenströme. Eine zielgenaue Einstellung der Eigenschaften ist nur durch eine automatisierte Steuerung der beiden Pumpstränge zu erreichen.

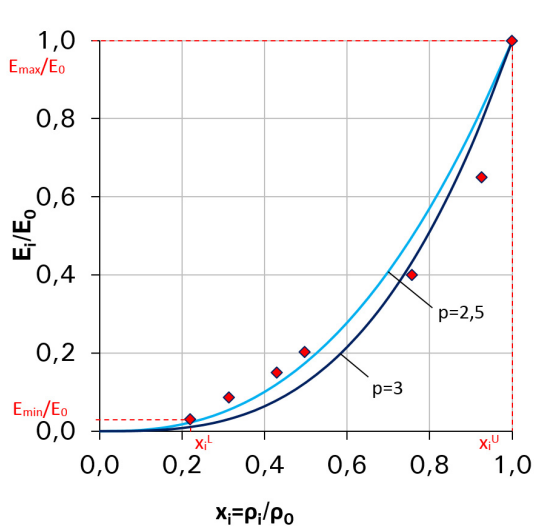
Im Rahmen des DFG-Projekts „Optimalstrukturen aus gradiertem Beton“ wird derzeit ein Manipulator zur Herstellung funktional gradiertter Bauteile mit räumlich freien Gradierungen entwickelt. Der Manipulator kann nach dem Prinzip des Gradientensprühens aus zwei konträren Ausgangsmischungen durch Einstellung unterschiedlicher Mischungsverhältnisse alle dazwischenliegenden Eigenschaften mischen und durch ein Portalsystem räumlich positionieren

Entwurf gradiertter Betonbauteile

Der automatisierten Herstellung geht der Entwurf dichtegradiertter Bauteile voraus. Die Verwendung von dichtegradierten Strukturen hat das tragstrukturelle Ziel, mit einem Minimum an Materialeinsatz eine gegebene Belastung unter Einhaltung von Verformungsbegrenzungen abzutragen. Die Entwicklung der optimalen Eigenschafts- und Materialverteilung im Bauteil, des sogenannten "Gradientenlayouts", stellt dabei eine besondere Herausforderung dar. Bei einfachen Tragwerken können noch natürliche Vorbilder oder in der Literatur bekannte Größen wie die Hauptspannungstrajektorien zur Orientierung herangezogen werden. Dies ist jedoch bei räumlich komplexen Tragwerken nicht mehr möglich. Um diese Entwurfsaufgabe erfüllen zu können, müssen numerische Routinen entwickelt werden. Die Strukturoptimierung stellt hierfür ein geeignetes Vorgehen dar.

Grundlage der numerischen Optimierung bildet eine materiell nichtlineare Simulation, welche das Verhalten gradiertter Bauteile zutreffend beschreibt. Die Simulationen werden mit dem kommerziellen Finite-Elemente-Programm ABAQUS durchgeführt. Der Werkstoff Beton wird mit dem Materialmodell *Concrete Damaged Plasticity* erfasst, einem elastisch-plastischen Schädigungsmodell für die Abbildung von bewehrtem und unbewehrtem Beton. Diese Ausgangssimulation bildet die Grundlage der numerischen Optimierung.

Die Topologieoptimierung als Teil der Strukturoptimierung beschäftigt sich mit der optimalen Materialverteilung in einem Entwurfsraum. Dabei wird im Laufe der Optimierungsschleifen Material entnommen oder umgelagert. Die verbleibende Struktur ist unter einer gegebenen Belastung möglichst voll ausgenutzt. Es wird eine Materialverteilungsstrategie unter Verwendung des SIMP-Ansatzes (Solid Isotropic Material with Penalization) (Bendsøe, 1989; Bendsøe and Sigmund, 2004) entwickelt. Der SIMP-Ansatz ermöglicht es, mittlere Dichten im Entwurfsraum einzuführen. Beim SIMP-Ansatz wird der Zusammenhang zwischen dem E-Modul E_i und der Designvariablen x_i über folgenden Potenzansatz beschrieben:



$$E_i = (x_i)^p E_i^0, \quad p > 1$$

$$x_i = \frac{\rho_i}{\rho_i^0}$$

Abb. 5: Anpassung des SIMP-Ansatzes an die Prüfergebnisse der gradierten Betonmischungen

E_i^0 ist der E-Modul eines massiven Elements, ρ_i^0 die Dichte eines massiven Elements. Die Exponentialfunktion des Ansatzes wird an den exponentiellen Zusammenhang zwischen Steifigkeit und Dichte der entwickelten Gradientenbetonmischungen angepasst (vgl. Abb. 5). Somit stehen während des gesamten Optimierungsvorgangs nur physikalisch realisierbare Materialien zur Verfügung. Das Optimierungsergebnis ist eine mit den Gradientenbetonmischungen herstellbare Dichteverteilung und wird als Gradientenentwurf bezeichnet. Alle durchgeführten Optimierungen finden im linear elastischen Bereich des Materialverhaltens statt. Im Anschluss an eine Optimierung wird eine materiell nichtlineare Simulation durchgeführt, um das Optimierungsergebnis in allen Traglastbereichen bewerten zu können.

Mithilfe des Optimierungsansatzes lässt ein gradiertes Bauteil entwerfen, welches im Vergleich zu einer 5 m spannenden Flachdecke aus Normalbeton eine Massenersparnis von 42 % aufweist. Dabei wird eine Stahlbewehrung verwendet und es werden alle Anforderungen in den Grenzzustände der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit eingehalten. Lässt man größere Verformungen zu und verwendet eine textile Kohlefaserbewehrung können 62% Masse bei gleicher Tragfähigkeit wie die Massivdecke eingespart werden.

Im Vergleich zu einem Bauteil mit Sandwichtaufbau mit einem nach der Querkraftbeanspruchung gradierten Kern lässt sich bei gleicher Bauteilmasse ein Steifigkeitsgewinn im Bereich von 30 % erzielen sowie die Erstrisslast um 24 % steigern. Die Steifigkeitsgewinne der optimierten Bauteile gegenüber dem Referenzversuch lassen sich durch zwei wesentliche Effekte erklären. Einerseits wird mehr steifes Material in der Zug- und in der Druckzone zwischen den Lasteinleitungen angeordnet, andererseits bildet sich ein Druckbogen bzw. ein Stabwerk zwischen Auflager und Lasteinleitung aus. Ergebnis des Optimierungsprozesses ist ein digitaler Bauplan, welcher die zugehörige Dichte zur räumlichen Position im Bauteil enthält (vgl. Abb. 6).

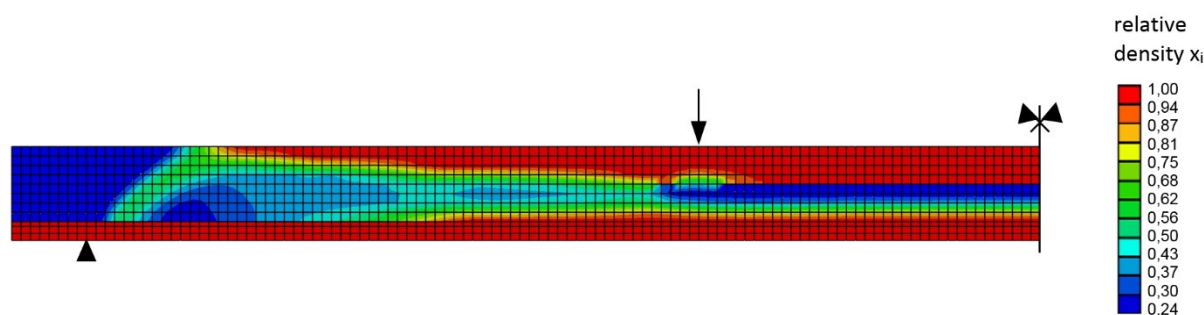


Abb. 6: Optimierungsergebnis der Materialverteilungsstrategie

Anwendungsbereiche von Gradientenbeton

Funktional gradierte Decken

Im Hochbau tragen die Decken mit ihrem Eigengewicht zu bis zu 70 % der Gesamtmasse der Konstruktion bei. Der Abtrag dieser hohen Eigengewichtslasten bedingt dabei sowohl eine große Menge an Bewehrungsstahl in den Decken selbst als auch entsprechend dimensionierte Bauteile wie Stützen, Wände und Fundamente. Gleichzeitig wird bei herkömmlichen massiven Betondecken ein großer Teil des eingebauten Betonvolumens nicht oder nur sehr gering beansprucht. Es liegt deshalb nahe, das Prinzip der Bauteilgradierung auf Decken zu übertragen. In Bereichen mit niedrigerer Druckbeanspruchung kann die Festigkeit des Betons deutlich reduziert werden, was beispielsweise den Einbau von Zonen mit hoher Porosität und somit geringerer Rohdichte nahelegt. Hierdurch wird das Eigengewicht der Decken und damit auch das der gesamten Konstruktion deutlich reduziert (Herrmann and Haase, 2013). Abb. 7 zeigt die innere Porositätsverteilung eines gradierten Deckenstreifens.

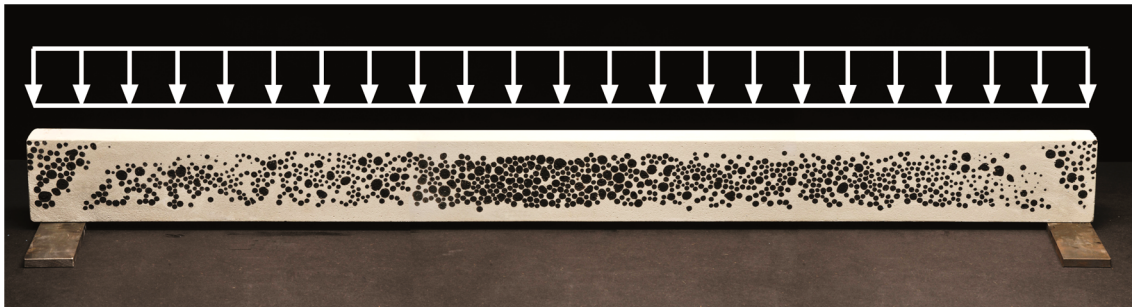


Abb. 7: Porositätsverteilung eines Deckenstreifens unter Gleichlast

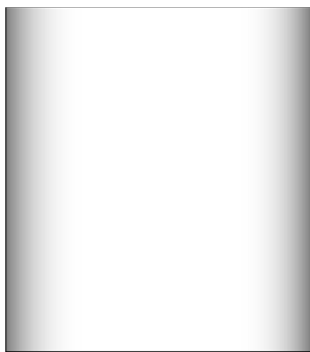
Mithilfe von Versuchen an Bauteilen konnte die Machbarkeit und das Masseneinsparpotential der funktional gradierten Elementdecken belegt werden. Dabei wurden Versuche an Prüfkörpern in zwei Größenmaßstäben durchgeführt und deren Tragverhalten experimentell ermittelt. Die zuerst durchgeführten Versuche an skalierten Bauteilen ermöglichten die Untersuchung des Einflusses des Gradientenaufbaus und der Bewehrungsmaterialien auf die Biegetragfähigkeit. Weiterhin wurden Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit in Abhängigkeit der Schubschlankheit durchgeführt. Hierbei konnten die zugrunde gelegten Bemessungsannahmen bestätigt werden. Es ließen sich Massenreduktionen von 59 % bei Erreichen der rechnerischen Tragfähigkeiten realisieren. Bei den anschließenden Versuchen an Bauteilen im Originalmaßstab konnte ein Maßstabseinfluss auf die Querkrafttragfähigkeit festgestellt werden. Im Vergleich zu den Versuchen an skalierten Bauteilen wurden Mischungen mit höherer Festigkeit im querkraftbeanspruchten Kernbereich erforderlich. Hierdurch reduzierte sich die Massenersparnis auf 43 %. Es konnte festgestellt werden, dass die Gradierung von Betonbauteilen einen maßgeblichen Einfluss auf deren Steifigkeit im Zustand I und auf die Erstrisslast hat. Die Steifigkeit der Bauteile im Zustand II hängt hingegen überwiegend von der eingesetzten Bewehrung ab (Herrmann and Sobek, 2014).

Funktional gradierte Außenwände

Eine weitere für den Massenmarkt vielversprechende Anwendung des Prinzips der Gradierung stellen funktional gradierte Wände dar. Hierbei wird die mögliche Multifunktionalität der Gradientenbetone bei gleichzeitiger Gewichts- und CO₂-Reduktion ausgenutzt. Durch die Gradierung der Eigenschaften Tragen und Dämmen kann ein tragfähiges und zugleich wärmedämmendes Bauteil mit einer dichten Sichtbetonoberfläche entstehen, das sortenrein vorliegt und als rein mineralisches Bauteil sehr gut rezyklierbar ist.

Die Untersuchungen zu funktional gradierten Außenwänden wurden an zwei unterschiedlichen Aufbauten durchgeführt. Beide Wände weisen einen fünfschichtigen Aufbau auf, der aus möglichst dünnen, tragenden Deckschichten, gradierten Übergängen und der hochwärmedämmenden Kernschicht besteht. Bei dem ersten Wandaufbau (Abb. 8 a) wurde Blähglas als Leichtzuschlag verwendet. Bei einer Wandstärke von 0,40 m ergibt sich ein Wärmedurchgangskoeffizient von 0,275 W/m²K. Somit kann mit dieser Lösung das System Mauerwerk plus Wärmedämmverbundsystem durch ein sortenreines Bauteil mit gleicher Gesamtwandstärke ersetzt werden. Mit dem zweiten Wandaufbau (Abb. 8 b) wurden die beschriebenen Werte sogar noch übertroffen. Unter Einsatz von Aerogel als Leichtzuschlag

kann bei einer Gesamtsystemdicke von 0,22 m ein U-Wert von 0,22 W/m²K erzielt und damit die EnEV 2014 erfüllt werden (Heinz et al., 2011).



a) Blähglasbetonkern
U = 0,27 W/m²K; d = 40 cm



b) Aerogelbetonkern
U = 0,22 W/m²K; d = 22 cm

Abb. 8: Vergleich gradierter Wandaufbauten

Zusammenfassung

In biegebeanspruchten Betonbauteilen wie Deckenkonstruktionen sind durch die Eigenschaftsgradierung der Betonmischungen hohe Masseneinsparungen möglich. Durch die Veränderung der Porosität über den Querschnitt lassen sich aber auch die Wärmedämmeigenschaften steuern. Bei Verwendung von hoch wärmedämmenden Leichtzuschlägen im Kern des Bauteils können schlanke Wandquerschnitte realisiert werden, welche gleichzeitig die Anforderungen an die Tragfähigkeit und den baulichen Wärmeschutz erfüllen. Beide Eigenschaften werden somit in einem rein mineralischen, multifunktionalen Monostoffbauteil vereint, welches einfach zu recyceln ist. Hierdurch kann das aktuelle Dilemma der geschichteten Wärmedämmverbundsysteme gelöst werden, bei deren Einsatz eine Vielzahl von Materialien und Schichten untrennbar miteinander verklebt werden. Der Einsatz gradierter Betonbauteile ermöglicht die Rückkehr zum Entwerfen und Konstruieren mit einschaligen, tragenden und wärmedämmenden Wänden in Sichtbetonqualität. Eine effiziente Herstellung wird durch automatisierte Herstellungsprozesse möglich. Den dazu erforderlichen digitalen Bauplan liefern die entwickelten numerischen Optimierungsverfahren. Gradientenbetone können somit in absehbarer Zukunft einen signifikanten Beitrag zur Entwicklung eines nachhaltigen Bauschaffens leisten.

-
- Bendsøe, M.P., 1989. Optimal shape design as a material distribution problem. *Struct. Optim.* 1, 193–202.
- Bendsøe, M., Sigmund, O., 2004. *Topology optimization: theory, methods and applications*. Springer, Berlin.
- Elsner, P., 2005. Gradierte Werkstoffeigenschaften - eine Herausforderung für die Fertigungstechnik. *Futur* 16–19.
- Faust, T., 2003. *Leichtbeton im konstruktiven Ingenieurbau, Bauingenieur-Praxis*. Ernst, Berlin.
- Heinz, P., Herrmann, M., Sobek, W., 2011. *Herstellungsverfahren und Anwendungsbereiche für funktional gradierte Bauteile im Bauwesen (Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau)*. ILEK, Universität Stuttgart.
- Herrmann, M., Haase, W., 2013. Tragverhalten biege- und querkraftbeanspruchter Bauteile aus funktional gradiertem Beton. *Beton- Stahlbetonbau* 108, 382–394.
- Herrmann, M., Sobek, W., 2014. *Entwicklung gewichtsoptimierter funktional gradierter Elementdecken (Abschlussbericht Forschungsinitiative Zukunft Bau)*. ILEK, Universität Stuttgart.
- Kieback, B., Neubrand, A., Riedel, H., 2003. Processing techniques for functionally graded materials. *Mater. Sci. Eng. A* 362, 81–105.
- Neubrand, A., Rödel, J., 1997. Gradient Materials: An Overview of a Novel Concept. *Z. Für Met.* 88, 358–371.
- Rödel, J., 1996. *Verfahren zur Herstellung von Gradientenwerkstoffen*. DE 44 35 146 A 1.
- Sobek, W., Trumpf, H., Heinlein, F., 2010. Recyclinggerechtes Konstruieren im Stahlbau. *Stahlbau* 79, 424–433.