



**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**

Leichte Platten aus Beton als bionische Struktur

Martina
Schnellenbach-Held
Jan-Eric Habersaat

Institut für Massiv-
bau, Universität
Duisburg-Essen

Im vorliegenden Beitrag werden drei bionische Strukturen vorgestellt, die für den Einsatz in Stahlbetonplatten mit biaxialen Lastabtrag entwickelt wurden: Bewehrungsführung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes, bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite sowie eine Optimierung der Form und Anordnung von Hohlkörpern. Durch diese innovativen Tragstrukturen wird der Kraftfluss beeinflusst und es stellt sich ein verbessertes Tragverhalten ein. Zur Formfindung und Entwicklung der Strukturen wurden evolutionäre Optimierungsprozesse kombiniert mit (nichtlinearen) Finite-Elemente-Berechnungen eingesetzt. Zum Abschluss der Forschungsphase werden die entwickelten Plattensysteme experimentell untersucht.

1 Einleitung

Die Ansprüche an die Gestaltung eines Bauwerks in Bezug auf das Erscheinungsbild und die Wirkung in der Umgebung spielen eine immer wichtigere Rolle im Entwurfsprozess. Hierbei hat sich eine Entwicklung hin zu leichten, filigranen und tragfähigen Bauwerken herausgebildet. Der Verbundwerkstoff Stahlbeton besitzt alle Voraussetzungen, um Tragwerke und Bauteile innovativ, naturinspiriert und leicht zu gestalten. Die Natur bietet hierfür ein großes Reservoir an Möglichkeiten zur Adaption, die analysiert und für die Problemstellungen des Massivbaus ausgearbeitet werden können.

Die Adaption von Erkenntnissen aus der Natur setzt das Verständnis dieser Strukturen voraus, jedoch soll keine komplette Kopie der Natur auf die Technik entstehen. Die technischen Randbedingungen und Ansprüche sind zu erkennen und zu bewerten. Bionik bedeutet, dass eine direkte Analogie zur Funktionalität der natürlichen Struktur vorhanden ist [1].

Bionische Strukturen nach natürlichen Vorbildern führen im Optimalfall zu einem relativ leichten und gleichzeitig tragfähigen Bauteil. Insbesondere Stahlbetonplatten bieten ein hohes Gestaltungs- aber auch Einsparungspotential, um die bionischen Strukturen für einen innovativen Betonbau zu nutzen.

2 Forschungsziel

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von leichten, materialsparenden und tragfähigen Stahlbetonplatten als bionische Struktur, die durch Adaption von drei natürlichen Vorbildern einen naturinspirierten Kraftfluss erfahren. Dies führt zu einer Verbesserung des Tragverhaltens bei optimiertem Materialeinsatz, wodurch Kosten und Ressourcen eingespart und ein Beitrag zu einer nachhaltigen Bauweise geleistet werden kann. Eine naturinspirierte Gestaltung der Plattenunterseite optimiert nicht nur den Kraftfluss, sondern ersetzt auch die meist kantigen und „langweiligen“ Betonstrukturen durch innovative Formgebung. Die drei ausgewählten natürlichen Strukturen sind für den Einsatz im Betonbau adaptiert und mittels selbst entwickelter Optimierungsverfahren, FE-Simulationen und experimenteller Untersuchungen ausgearbeitet worden. Dabei werden das Biegetragverhalten durch eine verbesserte Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes und die Tragfähigkeit und die optische Wirkung durch Anordnung von natürlichen Querschnittsgestaltungen wie

beispielsweise Rippen optimiert und die innere Plattenstruktur durch Form und Anordnung von Verdrängungskörpern neu gestaltet.

Der Einsatz unterschiedlicher Betone wird in Anlehnung an die biologische Wachstumsregel durchgeführt. Es wird jeweils diejenige Betonart eingesetzt, die die Materialanforderungen des Bauteilbereichs am besten erfüllt. Das Tragverhalten dieser Betonhybridstrukturen wird an validierten FE-Modellen untersucht.

3 Forschungsphase

Die Forschungsphase gliedert sich in vier Hauptarbeitsphasen. Die Arbeitsphasen 1 bis 3 bestehen aus der Generierung und Optimierung der drei Grundstrukturen:

- Struktur 1: Bewehrungsführung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes,
- Struktur 2: Bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite,
- Struktur 3: Optimierung der Form und Anordnung von Hohlkörpern.

In der vierten Arbeitsphase werden die entwickelten Strukturen 1 bis 3 experimentell untersucht.

3.1 Aufbau und Lage einer Bewehrungsführung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes

Als erste bionische Struktur ist eine Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes erarbeitet worden. In einem Optimierungsprozess unter Einsatz evolutionärer Algorithmen (vgl. [2]) wurde die neuartige Bewehrungsstruktur entwickelt. Die neustrukturierten Stahlbetonplatten werden in dem Prozess über ihre „Fitness“ charakterisiert. Diese errechnet sich aus der Durchbiegung in Plattenmitte in Abhängigkeit von der Gesamtlänge der verlegten Bewehrung in einer Platte. Als Referenzwert werden die Ergebnisse von orthogonal bewehrten Stahlbetonplatten mit vergleichbarem Bewehrungsgehalt herangezogen [3].

Zu Beginn des Optimierungsprozesses wurde eine Versuchsreihe zur Grundlagenuntersuchung mit dem Ziel durchgeführt, den Einfluss radialer und tangentialer Bewehrungsanordnungen auf das Trag- und Verformungsverhalten zu analysieren. Hierfür wurden quadratische Platten mit verschiedenen, nicht optimierten radialen und tangentialen Bewehrungsanordnungen geprüft. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in den Optimierungsprozess integriert worden.

Die Ergebnisse der Grundlagenuntersuchungen zeigten bereits, dass das Riss-, Material- und Verformungsverhalten bei radial und tangential bewehrten Platten wenigen Streuungen unterliegt. Die Ergebnisse sind sehr einheitlich und lassen sich deshalb später auf ein zu entwickelndes Ingenieurmodell gut übertragen. Bereits im

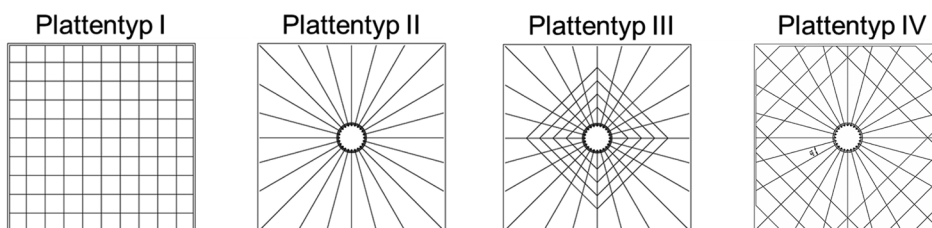


Bild 1: Untersuchte Bewehrungsanordnungen im Grundlagenversuch



Bild 2: Neuartige Bewehrungsanordnung [Foto: Jan-Eric Habersaat]

Gebrauchszustand lieferten die nicht optimierten Plattentypen III und IV in Bild 1 sehr gute Ergebnisse. Die Verformungen der Platten sind in diesem Bereich geringer als die Verformungen einer konventionell bewehrten Referenzplatte [4].

In der Optimierungsphase führte der Formfindungsprozess unter Einsatz evolutionärer Algorithmen mit Berücksichtigung der Fitness der einzelnen Individuen zu einer Konfiguration, die sich über eine Vielzahl von Generationen einstellte. Die Bewehrungsanordnung besitzt eine radial verlaufende Grundbewehrung und zwei tangentielle Bewehrungsbereiche, in denen jeweils ein konstanter Abstand der Bewehrungsstäbe untereinander vorliegt [3]. Die optimierte Anordnung der Bewehrung ist in Bild 2 zu sehen. Der anfangs numerisch idealisierte Knotenpunkt in Plattenmitte, in dem sich die radialen Bewehrungsstäbe treffen würden, wird durch die Anordnung von Zugringen aufgelöst. Der Zugring wurde in der Grundlagenversuchsreihe erfolgreich getestet und in einer optimierten Form im Großversuch eingesetzt.

Der Vergleich der numerischen Untersuchungen der optimierten Struktur unter idealen Voraussetzungen und einer orthogonal bewehrten Referenzplatte mit einem vergleich-

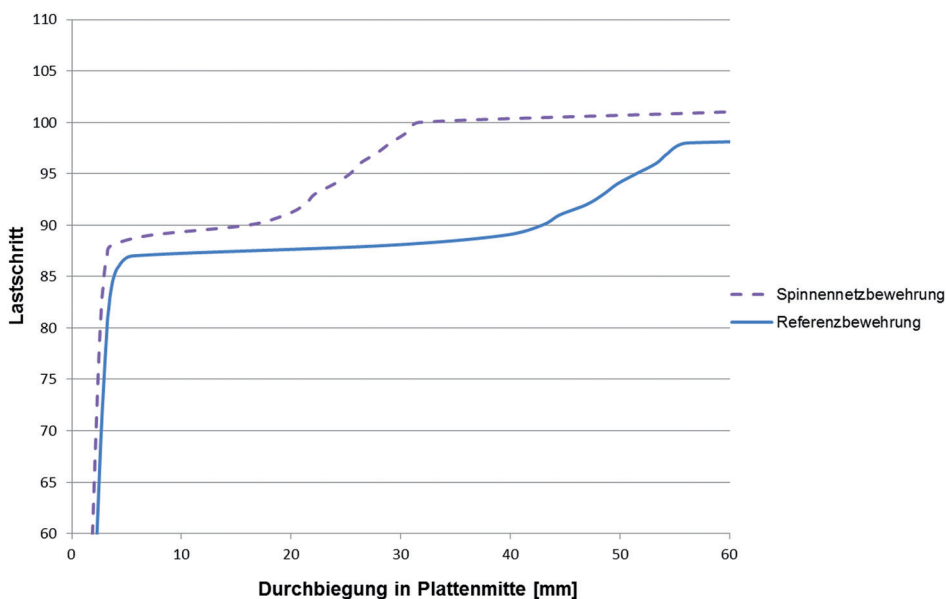


Bild 3: Last-Verformungsdiagramm (numerische Ergebnisse)

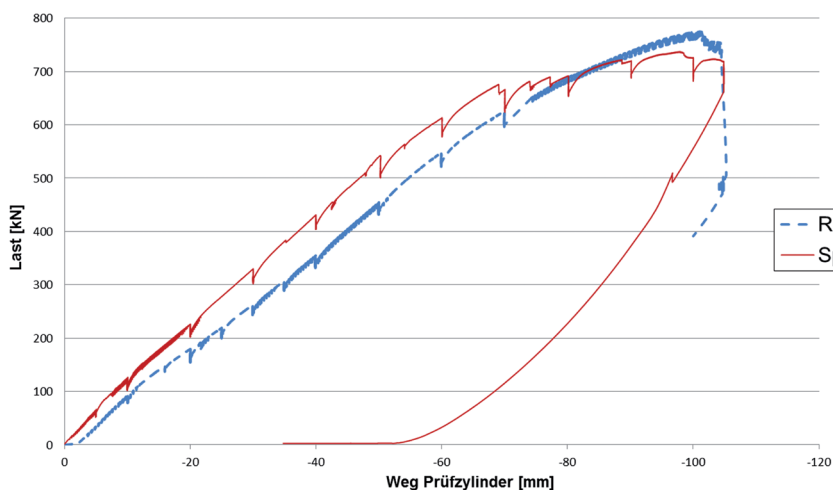


Bild 4:
Last-Verformungs-
diagramm
(Ergebnisse der
experimentellen
Untersuchungen)

baren Bewehrungsgehalt zeigt bei den nichtlinearen Simulationen ein verbessertes Tragverhalten (s. Bild 3). Bei identischen Belastungen weist die neu entwickelte Plattenstruktur eine geringere Verformung auf. Durch die tangentialen Bewehrungsstäbe in den Eckbereichen sowie in Plattenmitte werden die Zugspannungen sehr gut aufgenommen. Der Winkel zwischen den Hauptzugspannungen und den Bewehrungsstäben ist kleiner als bei konventionell bewehrten Platten.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen zeigen, dass die neuartige Bewehrungsführung eine hohe Duktilität im plastischen Bereich aufweist. Über etwa 90 % der Belastungszeit verbessert sich das Last-Verformungsverhalten der Platte (Bild 4). Die Versuchsplatten weisen eine sehr feine und gut verteilte Rissbildung auf. Die Aufzeichnungen der Stahldehnungen zeigen, dass sich die Spannungsverteilung im Bauteil von konventionell bewehrten Platten unterscheidet. Die Stahldehnungen in den radialen sowie in den tangentialen Bewehrungsbereichen steigen zum Plattenrand hin an. Hierbei sind vor allem die tangentialen Bewehrungsbereiche hoch beansprucht. Über die eingesetzte Zugringkonstruktion verteilen sich die Zugkräfte relativ homogen auf die radialen Bewehrungsstäbe, so dass der Betonstahl vergleichsweise kleine Stahldehnungen in diesem Bereich erfährt. Nur die Zugringe selber weisen in diesem Bereich hohe Dehnungen auf. Es liegt eine hauptspannungsorientierte Bewehrungsanordnung vor.

Um der verbesserten Duktilität der bionischen Plattenstruktur gerecht zu werden, bietet es sich an, die Platten als Betonhybridsystem auszubilden. Dabei wird der obere Bereich des Plattenquerschnitts – die hochbeanspruchte Druckzone – mit hochfestem Beton ausgebildet. Dies erhöht den Bauteilwiderstand für die einwirkenden Biegebeanspruchungen. Die Struktur erfährt somit weitere Verbesserungen hinsichtlich der Biegetragfähigkeit.

3.2 Bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite

Analog zu den Profilierungen natürlicher Strukturen, wie sie beispielsweise auf der Blattunterseite von Riesenseerosen vorkommen, werden in dieser Arbeitsphase an der Plattenunterseite Rippen angeordnet. Rippendecken sind im Massivbau eine Variante, um den räumlichen Entwurf flexibel zu gestalten und tragfähige Deckensysteme bei gleichzeitigem effektiven Materialeinsatz zu konstruieren [5]. Konventionell werden bis-

her meistens rechtwinklige Strukturen ausgebildet. Einzelne Tragwerke weisen bereits innovative Lösungen auf, um den Kraftfluss zu verbessern und somit die Tragfähigkeit zu erhöhen und Material einzusparen [6].

Zu Beginn dieser Arbeitsphase wurde der Einfluss unterschiedlichster Rippenanordnungen in einer Parameterstudie getestet. Dabei wurden die Varianten:

- (1) radiale Rippen,
 - (2) radiale Rippen mit Vouten im Auflagerbereich,
 - (3) radiale Rippen mit Querrippen parallel zu den Rändern,
 - (4) radiale Rippen mit Querrippen in einem Winkel von 45° zu den Rändern
- sowie als Vergleichssysteme:
- (5) eine Vollplatte und
 - (6) eine Platte mit orthogonaler Rippenstruktur

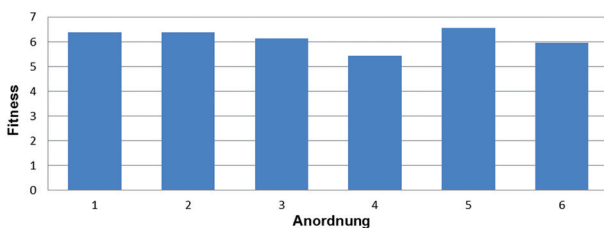


Bild 5: Einfluss unterschiedlicher Rippenanordnungen

als FE-Modell generiert und untersucht. Die Fitness (Bewertung der Qualität) der Strukturen wurde für diese Optimierungsphase durch das Produkt aus Durchbiegung in Plattenmitte multipliziert mit dem Betonvolumen der jeweiligen Struktur errechnet. Bild 5 zeigt, dass durch eine sinnvolle Rippenanordnung die Tragfähigkeit erhöht bzw. der Materialeinsatz minimiert werden kann. Mit Struktur 4 wurde für die getesteten Anordnungen das beste Ergebnis erzielt.

Der anschließende Optimierungsprozess zur Formfindung erfolgt in zwei Optimierungsphasen. In der ersten Phase wurde die Anordnung radial orientierter Rippen untersucht. Dabei dienen die Anzahl der Rippen, deren Höhe und Breite sowie die Höhe des Plattenspiegels als Optimierungsvariablen. Eine Massivplatte und eine Platte mit orthogonaler Rippenstruktur dienen als Referenzplatten, um die Qualität der Ergebnisse bewerten zu können. Als Restriktion für die erste Optimierungsphase wurde eine Beschränkung der Plattenhöhe einschließlich der Rippen eingeführt. Darauf aufbauend wurde eine erweiterte Optimierungsphase mit der zusätzlichen Restriktion eines maximalen Betonvolumens durchgeführt. Die Modelle in der Parameterstudie wurden mit linear-elastischem Materialverhalten abgebildet.

Die Eigenschaften der besten bewerteten Strukturen wurden für den zweiten Optimierungslauf verwendet und weiterentwickelt. In diesem Prozess wurden analog zu den natürlichen Strukturen der Riesenseerose Querverstrebungen zwischen den radialen Rippen angeordnet. Durch eine Optimierung der Lage und Geometrie der Querrippen verbesserte sich das Rippensystem.

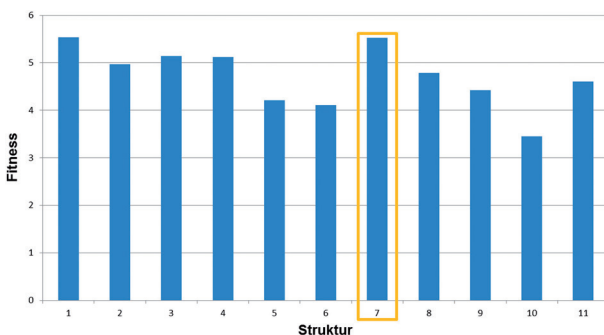


Bild 6: Vergleich der entwickelten Rippenstrukturen mit einer Referenzplatte (orange); kleiner Fitnesswert: verbesserte Tragfähigkeit

Die Rippenstrukturen mit Querverstrebung wurden in FE-Modellen abgebildet und in Abhängigkeit der Verformung und des Materialeinsatzes (Beton und Stahl) bewertet. Bild 6 zeigt die Qualität der einzelnen Plattensysteme. Von den entwickelten Rippenstrukturen wiesen mehrere Systeme eine verbesserte Biegetragfähigkeit gegenüber der Referenzplatte (Struktur 7) auf. Die in Bild 7 dargestellte Platte (diese entspricht der Struktur 5 in Bild 6) ist im Anschluss an die Optimierung und die numerischen Simulationen experimentell untersucht worden. Bild 8 zeigt einen Ausschnitt

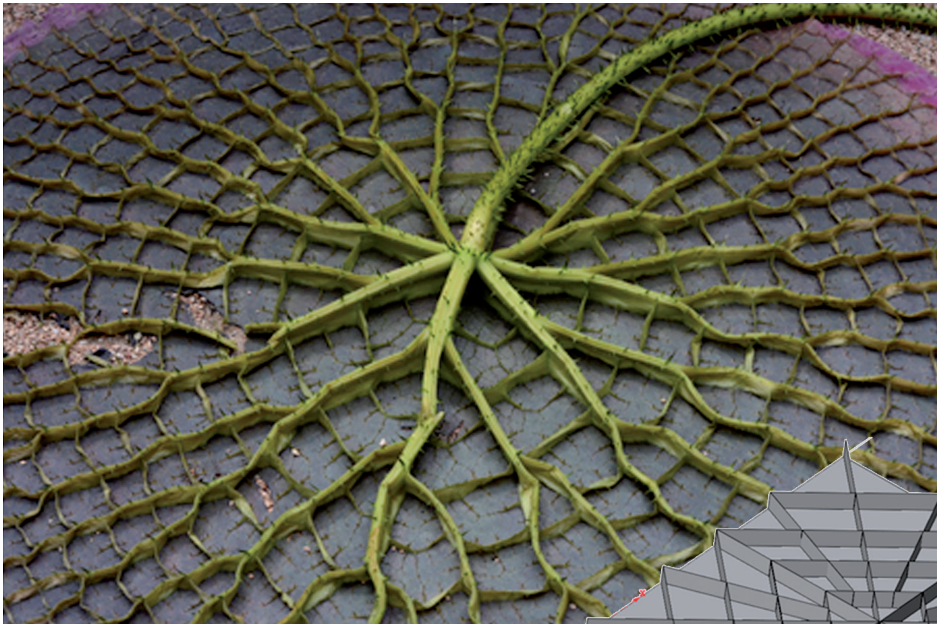


Bild 7: Natürliches Vorbild und FE-Modell
der entwickelten Struktur

[Foto: Jojona, CC BY SA]

Bild 8: Rippendecke mit Messgestell im Prüffeld des IfM

[Foto: Jan-Eric Habersaat]



des Versuchsaufbaus. Die im Bauteilversuch ermittelte Bruchlast der bionischen Rippenplatte ist etwa fünfmal so groß wie die Bruchlast einer Referenzplatte mit identischem Materialeinsatz.

Bereits die physikalisch nichtlinearen Berechnungen zeigen, dass sich mit innovativen Rippenstrukturen filigrane Leichtbaustrukturen mit erhöhter Tragfähigkeit konstruieren lassen. Diese Strukturen erfahren bei vergleichbarem Materialeinsatz und identischer Belastung geringere Verformungen gegenüber Referenzvollplatten und -rippenplatten. Durch die naturinspirierten Formen an der Plattenunterseite wirken die filigranen Platten optisch sehr ansprechend im Vergleich zu bekannten rechtwinkligen Strukturen. Die im Bauteilversuch ermittelte Bruchlast der bionischen Rippenplatte ist etwa fünfmal so groß wie die Bruchlast einer Referenzplatte mit identischem Materialeinsatz.

3.3 Untersuchungen zum Einfluss von Hohlkörperform und -anordnung

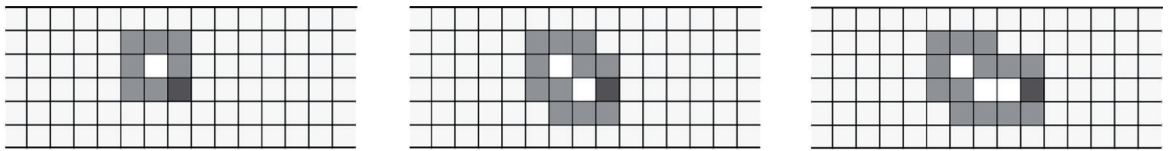
Zur Verbesserung der Tragfähigkeit bei geringstmöglichem Materialeinsatz werden mittels Topologieoptimierungsprozessen Form und Anordnung von Hohlkörpern untersucht.

Als Verfahren zur Formfindung von Hohlkörperbereichen wurde eine Methode auf der Basis des Rücksetzverfahrens gewählt. Hierbei wird das Bauteil in eine beliebige Anzahl von Abschnitten unterteilt. In diesen Abschnitten wird zufällig ein Element ausgewählt, das keine Steifigkeit erhält (ein sogenanntes Leer-Element). Anschließend wird jedes Element, das direkt an das Leer-Element angrenzt, darauf geprüft, wie groß der Einfluss auf die Durchbiegung des Systems ist. Der Einfluss der Hohlstellen auf das Durchbiegungsverhalten der Systeme wird mittels FE-Simulation berechnet. Das Element, das die Durchbiegung des Systems am wenigsten beeinflusst, wird zu einem weiteren Leer-Element umgewandelt und ist der Startpunkt für die nächste Suche (siehe Bild 9).

Da die Wahl des Startelements zufällig erfolgt, wird zur Verifizierung der Ergebnisse dieser Optimierungsprozess mehrmals durchgeführt. Als Abbruchkriterium dient eine vorab festgelegte Anzahl der Leer-Elemente. Diese wurde in mehreren Optimierungsprozessen inkrementell erhöht. Bild 10 zeigt eine Lösung unter Anwendung des Rücksetzverfahrens mit acht Teilbereichen im Designraum. Durch die Variation von Größe und Anzahl der Teilbereiche im Designraum konnten die Anordnung und die Größe der Hohlkörper stark beeinflusst werden. In den folgenden Arbeitsschritten wurden quaderförmige, kugelförmige, elliptische und eiförmige Formen angewendet, um die Tragfähigkeit unter definierten Randbedingungen zu untersuchen.

Numerische Vergleichsstudie zum Einfluss von Form und Anordnung von Hohlkörpern

Im Rahmen einer Vergleichsstudie wurden verschiedene Hohlkörperformen und Anordnungen mittels nichtlinearer Finite-Elemente-Berechnungen analysiert und die Ergebnisse gegenübergestellt. Bild 11 zeigt einige FE-Modelle der FE-Vergleichsstudie, die mit dem Programmsystem TNO DIANA analysiert wurden. Für die Modellierung der Betonelemente sind Tetraedervolumenelemente verwendet worden. Diese Elemente bieten eine schnellere Modellierung der komplexen Modelle im Gegensatz zu den quaderförmigen Volumenelementen, sie verringern die Rechenzeit und sind ausreichend stabil.



Betonelemente
 Leer-Elemente
 Test-Elemente
 ausgewählte Elemente

Bild 9: Topologieoptimierung zur Formfindung von Hohlkörpern

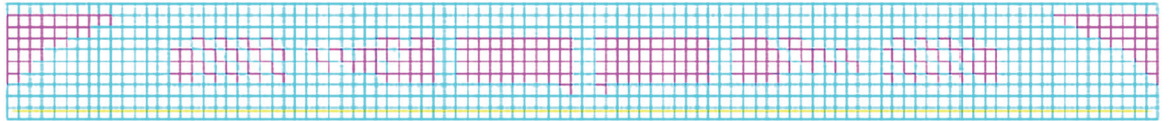


Bild 10: Struktur unter Anwendung des Rücksetzverfahrens

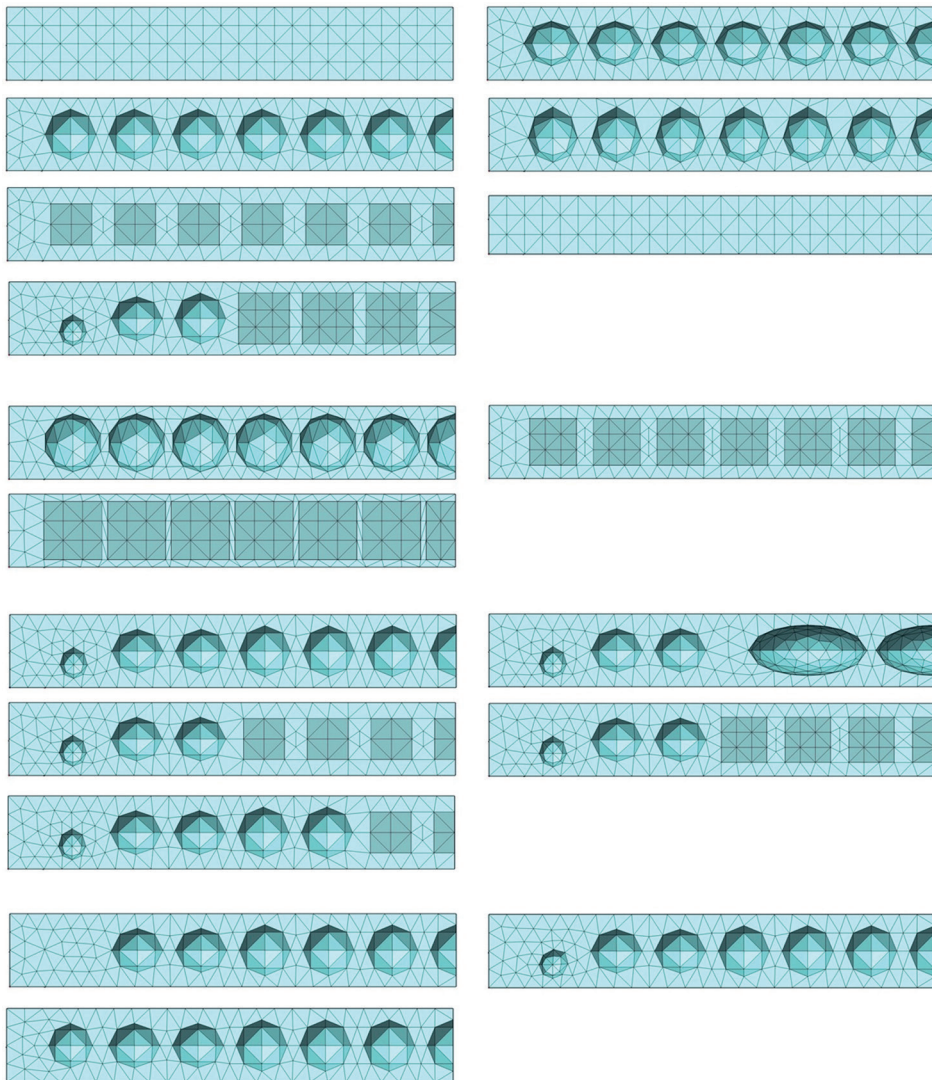


Bild 11: FE-Modelle der Vergleichsstudie

Die verschiedenen Systeme wurden in der Vergleichsstudie inkrementell mit einer Flächenlast und in einer zweiten Berechnung mit einer auflagernahen Einzellast belastet. Es wurden Untersuchungen zum Einfluss der Hohlkörperform und zum Einfluss der Hohlkörperanordnung im Bauteil durchgeführt.

Die Auswertung der Vergleichsstudie zeigt, dass würfelförmige Hohlkörper das größte Einsparpotential in Plattenmitte bieten, da in diesem Bereich der Einfluss der Hohlkörperform nur eine sehr geringere Auswirkung auf das Tragverhalten hat. Würfel besitzen das größte Volumen bei der geringsten Höhe. Sehr große ellipsoidförmige Strukturen wurden im Rahmen der Vergleichsstudie untersucht, um durch Einzelstrukturen viel Material einzusparen. Erwartungsgemäß führen diese großen Strukturen zu erhöhter Durchbiegung und zu einem vergleichsweise frühen Versagen. Der Einsatz von Ellipsoiden kann zu sehr guten Ergebnissen führen, hierfür müssen die Anordnung sowie die jeweiligen Abmessungen der Ellipsoidstruktur sinnvoll gewählt werden. Die Vergleichsstudie zeigt, dass durch sinnvolle Anordnung und Kombination unterschiedlicher Hohlkörperformen sehr gute Ergebnisse erzielt werden.

4 Zusammenfassung

Die Natur bietet für viele Problemstellungen des Massivbaus Lösungs- bzw. Optimierungspotentiale. Durch die Entwicklung und den Einsatz bionischer Strukturen lässt sich das Tragverhalten beeinflussen und verbessern. Hierfür müssen sinnvolle Optimierungs- und Adaptionprozesse durchgeführt werden. Mit der Simulation des physikalisch nichtlinearen Bauteilverhaltens unter Einsatz der FEM lassen sich komplexe Strukturen wirklichkeitsnah darstellen. In dem vorliegenden Beitrag wurde ein Forschungsvorhaben vorgestellt, in dem drei bionische Strukturen untersucht und für den Betonbau adaptiert wurden.

Durch Adaption einer hauptspannungsorientierten Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes konnte ein sehr duktiler Bauteilverhalten vor dem Versagen erreicht werden. Unter den gegebenen Randbedingungen verbesserte sich das Verformungsverhalten gegenüber einer Referenzplatte über 90 % des gesamten Belastungszeitraums bei vergleichbarem Tragverhalten.

Die entwickelte bionische Rippendecke weist gegenüber einer Referenzplatte mit äquivalentem Materialeinsatz sowie einer konventionellen Rippendecke eine erhöhte Biegesteifigkeit auf.

In der dritten Arbeitsphase wurde das Tragverhalten von Hohlkörperdecken u. a. in einer numerischen Vergleichsstudie untersucht. Es zeigte sich, dass durch eine sinnvolle Anordnung und Kombination unterschiedlicher Hohlkörperformen ein Einfluss auf das Tragverhalten und den effektiven Materialeinsatz genommen werden kann.

Das in diesem Beitrag vorgestellte Forschungsvorhaben ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt noch nicht beendet. Somit konnten noch nicht alle endgültigen Ergebnisse der Forschungsphase präsentiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] NACHTIGALL, W.; POHL, G.: Bau-Bionik · Natur - Analogien - Technik. 2., neu bearb. und erw. Aufl., Berlin · Heidelberg: Springer Vieweg, 2013.
- [2] SCHNELLENBACH-HELD, M.; PULLMANN, T.: Genetische Optimierung von Tragstrukturen. Bauingenieur 86 (2011), Heft 9, S. 390–399.
- [3] SCHNELLENBACH-HELD, M.; HABERSAAT, J.-E.: Bionic Optimization of Concrete Structures by Evolutionary Algorithms. Structural Engineering International 24 (2014), Heft 2, S. 229–235.
- [4] HABERSAAT, J.-E.: Innovative Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes. In: BREITENBRÜCHER, R.; MARK, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium; 07.–08.11.2013, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 35–40.
- [5] SCHNELLENBACH-HELD, M.; ALDEJOHANN, M.: Deckensysteme – Gestern und Heute. Tiefbau (2006), Heft 4, S. 211–215.
- [6] SCHNELLENBACH-HELD, M.; HABERSAAT, J.-E.: Bionik im Betonbau – Natürliche Strukturen und Konstruktionen als Inspiration für den Betonbau. Bauingenieur 88 (2013), Heft 5, S. 205–213.

Leichte Platten aus Beton als bionische Struktur – Steifigkeitsgerechtes Konstruieren nach biologischen Vorbildern

Projektleiterin

Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held

Projektbearbeiter

Dipl.-Ing. Jan-Eric Habersaat

Projektlaufzeit

10/2011 – 09/2014

Web

<https://www.uni-due.de/massivbau>