

Leichte Platten aus Beton mit biaxialem Lastabtrag als bionische Strukturen

- ▶ Martina Schnellenbach-Held, Jan-Eric Habersaat
- ▶ Institut für Massivbau (IfM), Universität Duisburg-Essen

1 Forschungsanlass

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist die Entwicklung von leichten, ressourcenschonenden und tragfähigen Stahlbetonplatten als bionische Struktur, die durch Adaption natürlicher Formen und Prinzipien einen naturähnlichen Kraftfluss aufweisen. Es wurden drei voneinander unabhängige bionische Stahlbetonplattenstrukturen entwickelt und hinsichtlich des Tragverhaltens untersucht.

Das Forschungsprojekt gliedert sich in die drei Arbeitsphasen:

1. Untersuchung und Optimierung einer spinnennetzartigen Bewehrungsanordnung,
2. Entwicklung einer bionischen Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite,
3. Optimierung des Kraftflusses durch die Form und die Anordnung von Hohlkörpern im Platteninneren.

Die naturinspierte Gestaltung der Plattenunterseite führt neben der veränderten Tragstruktur zu einer innovativen Formgebung, die die überwiegend kantigen und „langweiligen“ Betonstrukturen ersetzen kann.

1.1 Methodik zur Entwicklung bionischer Strukturen

Als Methoden zur Entwicklung von bionischen Strukturen sowie zur Berechnung der neuartigen Stahlbetonplatten wurden evolutionäre Optimierungsalgorithmen in Kombination mit

physikalisch nichtlinearen Finite-Elemente-Analysen eingesetzt.

1.2 Optimierungsalgorithmen

Die Entwicklung der bionischen Strukturen in den einzelnen Arbeitsphasen basiert auf Optimierungsalgorithmen der biologischen Evolution in Kombination mit numerischen Analysen. Evolutionäre Algorithmen (EA) [1] bilden den biologischen Evolutionsprozess in einem Softwaresystem ab, um beispielsweise technische Probleme zu lösen. Basis für die Optimierungsaufgaben im Rahmen des Forschungsvorhabens stellt ein am Institut für Massivbau (IfM) selbstentwickelter EA „GPCore“ [2] dar.

Unter Einsatz von EA wurden eine spinnennetzartige Bewehrungsführung und eine naturinspierte Anordnung von Rippen und Querrippen entwickelt. Der evolutionäre Optimierungsalgorithmus GPCore wurde für die jeweilige Problemstellung erfolgreich weiterentwickelt.

1.3 Finite-Elemente-Analysen

Die physikalisch nichtlinearen Berechnungen in den einzelnen Arbeitsphasen wurden mit dem Finite-Elemente-Programmsystem TNO DIANA [3] durchgeführt. Es wurde eine 3D-Modellierung mit isoparametrischen Volumenelementen (20-knotige Brickelemente sowie zehn-knotige Tetraederelemente) mit quadratischen Ansatzfunktionen gewählt.

Die numerischen Untersuchungen der Stahlbetonplatten erfolgten für den Druck- und Zugbereich mit dem *Total-Strain*-Konzept. Die Bauteiluntersuchungen konnten hiermit realistisch abgebildet werden. Da eine diskrete Darstellung der Rissbildung für die numerischen Untersuchungen nicht notwendig und außerdem sehr zeit- und rechenintensiv ist, wurde für die Simulationen der Modelle eine verschmierte Rissbildung verwendet. Das Materialverhalten des Betons unter Zugbeanspruchung wurde mit dem uniaxialen Materialmodell nach Hordijk [4], die Abbildung des Betons unter Druckbeanspruchung mit dem Materialmodell nach Thorenfeld [5] beschrieben.

Die Bewehrung wurde als eingebettetes (*embedded*) Element abgebildet. Es wird von einem starren Verbund zwischen Bewehrung und Beton ausgegangen. Die Bewehrung wurde mittels eines bilinearen isotropen Plastizitätsmodells abgebildet, welches durch den Elastizitätsmodul sowie die Fließgrenze des Betonstahls definiert ist.

2 Bewehrungsführung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes

2.1 Optimierung der Bewehrungsanordnung

Ziel war die Entwicklung eines innovativen naturinspirierten Ansatzes zur Bewehrung von Stahlbetonplatten. Die Grundgeometrie der Bewehrung orientiert sich an dem Aufbau eines Radspinnennetzes. Mittels evolutionärer Optimierungsalgorithmen (GPCore) wurden tragfähige Strukturen mit möglichst geringem Bewehrungsgehalt entwickelt. Die Optimierungsvariablen wurden so verändert, dass für das gegebene statische System das optimale Individuum entsteht. Zur Optimierung der Tragfähigkeit wurden die Winkel α und φ zwischen den radialen Bewehrungsstäben sowie die Anzahl der Bewehrungsstäbe in den vorab definierten Bereichen Alpha, Beta, Phi, Gamma, Ring sowie Ecke variiert, [6], [7].

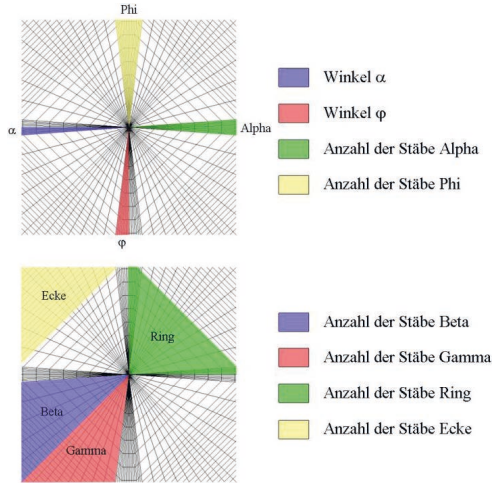
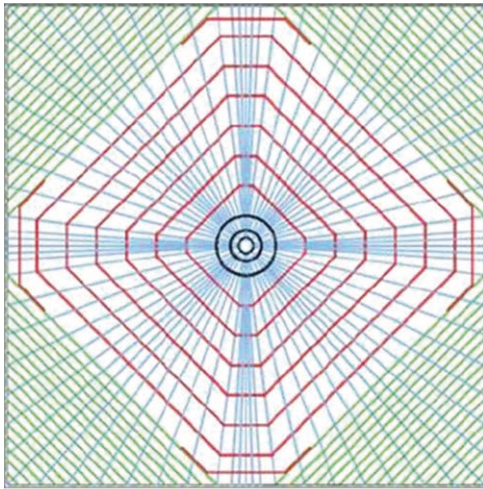


Bild 1: Optimierungsvariablen

Die maximale Menge der Bewehrung (\varnothing 10 mm) in einer Platte wurde für die Modelle mit einer Abmessung von $5,0 \times 5,0 \times 0,15$ m auf 400 m Bewehrungslänge begrenzt. Dies entspricht der Bewehrung einer Referenzplatte mit orthogonal verlegter Bewehrung im Abstand von 12,5 cm.

Das Last-Verformungs-Verhalten der während des Optimierungsvorgangs erzeugten Strukturen wurde mit physikalisch nichtlinearen Finite-Elemente-Simulationen ermittelt und anschließend mittels der vorab definierten Fitnessfunktion bewertet. Die Fitness errechnet sich aus dem Verhältnis der Durchbiegung in Plattenmitte zur Gesamtlänge der verlegten Bewehrung in der Platte. Die Ergebnisse wurden mit denen orthogonal bewehrter Platten mit äquivalentem Bewehrungsgehalt (verlegte Bewehrungslänge mit \varnothing 10 mm) verglichen.

Bild 2 zeigt die Bewehrungsanordnung mit den drei maßgebenden Bewehrungsbereichen. Der während des Optimierungsprozesses noch vereinfacht simulierte Knotenpunkt in Plattenmitte (Überlagerung aller radialen Stäbe) wurde für die numerischen Detailuntersuchungen sowie für die experimentellen Untersuchungen mit einer Zugringkonstruktion ausgebildet. Die Bewehrung besteht aus einer radialen Grundbewehrung (blau in Bild 2) und zwei tangentialen Bewehrungsbe-



- Radiale Grundbewehrung
- Tangentiale Eckbewehrung
- Tangentiale Bewehrung

Bild 2: Bewehrungsanordnung

reichen: den in grün dargestellten Eckdiagonalen sowie den rot eingezeichneten Oktagonen mit je vier langen und vier kurzen Seiten.

2.2 Finite-Elemente-Berechnungen

Die anschließenden numerischen Untersuchungen, bei denen die Zugringkonstruktion berücksichtigt wurde, zeigte ein verbessertes Tragverhalten der spinnennetzartig bewehrten Platte gegenüber der orthogonal bewehrten Referenzplatte. Zur Ausbildung der Zugringkonstruktion wurden verschiedene Varianten, bspw. unterschiedliche Betonstahldurchmesser sowie Baustahl-Zugringe, untersucht. Je größer der Bewehrungsquerschnitt des Zugrings ist, desto geringer sind die Verformungen der Platte.

2.3 Experimentelle Untersuchungen

Es wurden insgesamt neun Stahlbetonplatten mit Abmessungen von $4,0 \times 4,0 \times 0,13$ m am IfM

| Platte | Lagerung | Lasteinleitung | Bewehrung | Betoneigenschaften nach 28 d | |
|--------|----------------------|----------------|------------------------------|--|--|
| | | | | Druckfestigkeit f_c [N/mm ²] | Elastizitätsmodul E_c [N/mm ²] |
| SP1 | Ecken frei | Flächenlast | Konstruktion A orthogonal | 38,4 | 23.777 |
| Ref1 | | | | 35,7 | 24.375 |
| SP2 | Ecken eingespannt | | Konstruktion A orthogonal | 36,3 | 23.950 |
| Ref2 | | | | 36,5 | 25.307 |
| SP3 | | | Konstruktion B | 41,1 | 27.491 |

Tabelle 1: Versuchsprogramm



Bild 3: Konstruktion A (links) und Konstruktion B (rechts)

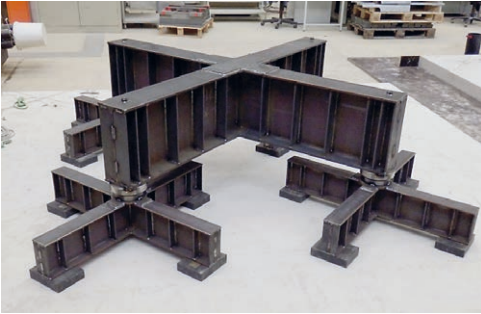


Bild 4: Lasteinleitungsstruktur

geprüft (Tabelle 1). Hierbei wurden Einflüsse der Lasteinleitung, der Lagerungsbedingungen sowie der Bewehrungsbildung untersucht. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden drei Referenzplatten mit kreuzweise verlegter Bewehrung ($\varnothing 10/12,5$ cm) hergestellt und geprüft.

Die entwickelte Platte wurde mit zwei unterschiedlichen Zugringkonstruktionen getestet.

Dabei kamen eine massive Konstruktion aus Baustahl, die gleichzeitig der Lagesicherung diente (Konstruktion A), und eine filigranere Konstruktion (B) mit zwei Zugringen aus Betonstahl ($\varnothing 14$ mm) und einem dünnen Baustahlring zum Einsatz. Bei Konstruktion A (Bild 3, links) wurden die angeschlossenen Bewehrungsstäbe mit Schlaufen am jeweiligen Zugring rückverankert, bei Konstruktion B (Bild 3, rechts) wurden die radialen Bewehrungsstäbe an die Konstruktion geschweißt.

Die Lasteinleitung erfolgte als äquivalente Flächenlast über eine Lasteinleitungsstruktur mit 16 Lasteinleitungsflächen, Bild 4, mit einer Prüfgeschwindigkeit von 1 mm/min.

Bild 5 zeigt anhand der Last-Verformungs-Kurven der Probekörper SP2 (Konstruktion A), SP3 (Konstruktion B) und Ref2 die Auswirkungen der spinnennetzartigen Bewehrungsanordnung auf das Biegetragverhalten. Hierbei wird

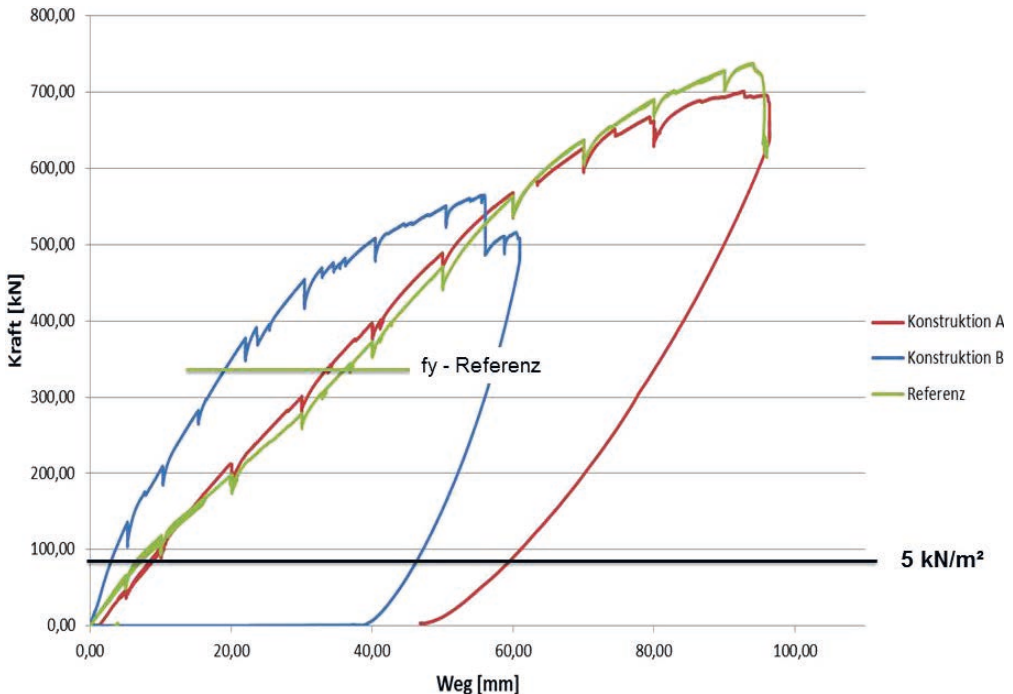


Bild 5: Last-Verformungs-Diagramm – experimentelle Untersuchungen: Konstruktionen A, B und Referenz

über den Prüfzylinderweg die globale Verformung des Plattensystems berücksichtigt. Die Platten SP2 und SP3 zeigten eine verbesserte Biegesteifigkeit gegenüber der Referenzplatte. Auch wenn Platte SP3 die Traglast der Referenzplatte nicht erreichte, konnte bei einer üblichen Nutzlast des Hoch- und Ingenieurbaus ein deutlich verbessertes Tragverhalten erzielt werden. Beispielsweise sind bei einer Nutzlast von $5,0 \text{ kN/m}^2$ die Systemverformungen bei Platte SP3 deutlich geringer als bei den beiden anderen Plattentypen. SP2 erzielte eine mit der Referenzplatte vergleichbare Traglast und zeigte das duktilste Verhalten im Traglastbereich. Die geringere Traglast bei SP3 ist auf den kleineren Zugringquerschnitt im Vergleich zu Ausführung SP2 sowie auf das Versagen der auf Stoß geschweißten Betonstahlringe zurückzuführen.

Die Versuche bestätigten die Erkenntnisse der zuvor durchgeführten numerischen Analysen hinsichtlich des Einflusses der Zugringe auf das Biegetragverhalten des Systems. Unter hohen Lasten kam es bei SP2 zu einer lokalen muldenartigen Verformung, die eine starke Rissbildung mit großen Rissbreiten in Plattenmitte hervorrief.

Die Analyse der Stahlspannungen zeigt, dass die verschiedenen Konstruktionen A und B der Platten SP2 und SP3 unterschiedliche Spannungsverteilungen in den radial angeordneten Bewehrungsstäben hervorrufen. Die größten Stahldehnungen treten jedoch bei beiden Konstruktionsarten in den Zugringen und in den tangentialen Bewehrungsbereichen auf. Die normative Streckgrenze des Betonstahls ($f_y = 500 \text{ N/mm}^2$) wird als erstes beim Bewehrungsstahl der Referenzplatte bei einer Last von 340 kN erreicht. Im Vergleich dazu erreicht der Bewehrungsstahl der Versuchsplatten SP2 und SP3 die Streckgrenze bei einer Belastung von 390 kN bzw. 350 kN .

Aus den Unterschieden im Last-Verformungsverhalten wird deutlich, dass der Querschnitt des Zugrings sowie die Verankerung der radialen Stäbe an der Zugringkonstruktion das Tragverhalten maßgeblich beeinflussen. Es

ist zu berücksichtigen, dass die geringen Verformungen von Platte SP3 (Konstruktion B) auch auf die höheren Betonfestigkeiten zurückzuführen sind.

2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse: Spinnennetzbewehrung

Mittels evolutionärer Optimierung ist es gelungen, eine Bewehrungskonfiguration entsprechend eines Spinnennetzes zu finden, die bei gleichbleibendem Bewehrungsgehalt der Platte ein besseres Tragverhalten aufweist. Das im Optimierungsprozess entwickelte Modell der spinnennetzbewehrten Stahlbetonplatte zeigte in den physikalisch nichtlinearen numerischen Analysen und in den Bauteilversuchen ein verbessertes Biegetragverhalten im Gebrauchslastbereich gegenüber einer konventionell bewehrten Referenzplatte.

Kritisch bei den spinnennetzbewehrten Platten ist die konstruktive Durchbildung des Zugringes, der die Radialspannungen aufnimmt. Die Versuche haben gezeigt, dass hier weiterer Forschungs- und Entwicklungsbedarf besteht.

3 Bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite

Die Untersuchung der Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite wurde zuerst basierend auf dem natürlichen Vorbild der Profilierung analog zur Blattunterseite der Riesenseerose durchgeführt. Die Riesenseerose ist eine sehr tragfähige, natürliche Konstruktion, die durch ihre Profilierungen einen optimalen Materialeinsatz aufweist. Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden sowohl Rippenanordnungen neu konzipiert als auch weitere Varianten zur bionischen Querschnittsgestaltung durch die Anordnung gekrümmter Plattenunterseiten zur Optimierung der Tragfähigkeit untersucht.

3.1 Rippenplatten

Rippendecken bieten als Ausführungsvariante im Massivbau die Möglichkeit, den räumlichen

Entwurf flexibel zu gestalten, Material effektiv einzusetzen und gleichzeitig eine filigrane und ansprechende Form zu schaffen. Trotz einiger innovativer Beispiele werden Rippendecken bisher meistens mit rechtwinkligen Rippenstrukturen ausgebildet. Inspiriert von der Blattunterseite der Riesenseerose wurde in dieser Arbeitsphase eine Rippenanordnung für Rippendecken entwickelt, die das Tragverhalten bei vergleichbarem Materialeinsatz verbessert.

3.1.1 Rippenentwicklung

Anhand einer FE-Parameterstudie unter Ansatz linear-elastischen Materialverhaltens wurden verschiedene Rippenanordnungen an Platten mit einer Grundfläche von 5,0 m × 5,0 m untersucht. Eine Verbesserung des Tragverhaltens durch die Anordnung von radialen Rippen mit Querrippen, die unter einem Winkel von 45° zu den Rändern lagen, wurde erreicht.

Im anschließenden Optimierungsprozess (GPCore) wurden die Modelle unter Berücksichtigung der Optimierungsparameter Rippengeometrie (Höhe und Breite), minimale Plattenspiegellhöhe, Rippenanzahl sowie Lage und Form der Querrippen für ein optimiertes Tragverhalten entwickelt. Die Optimierung wurde in zwei Phasen durchgeführt. Nachdem in Phase 1 die radiale Rippengeometrie ausgearbeitet wurde, wurde in Phase 2 die

Anordnung der Querrippen entwickelt. Als Referenzwerte zur Beurteilung der Qualität dienten die Ergebnisse einer konventionellen orthogonalen Rippenplatte (Struktur 7 in Tabelle 2). Als Restriktion wurde eine maximale Plattenhöhe von 35 cm einschließlich der Rippen formuliert.

Die Fitness F der generierten Modelle wurde in Abhängigkeit der Verformung f des Systems sowie des Materialeinsatzes und der Materialkosten von Beton und Betonstahl bewertet. Ein niedriger Zahlenwert steht für eine gute Fitness.

$$F = (V_B \cdot \alpha_B + I_R \cdot \alpha_S) \cdot (1 + (f - 20) / 100) / 100$$

- Mit: V_B Betonvolumen [m³]
- I_R Rippenlänge [m²] (berücksichtigt den unterschiedlichen Bewehrungsanteil)
- f Durchbiegung in Feldmitte [mm]
- α_B Preis/m³ Beton
- α_S Preis/lfd m Betonstahl ($d_s = 10$ mm)

In Tabelle 2 sind die verschiedenen Rippenanordnungen und die berechnete Fitness zusammengefasst. Die Ergebnisse des Optimierungsprozesses bestätigen, dass sich durch den Einsatz von Querrippen – analog zu den Querverstrebungen bei Blättern – das Tragverhalten verbessert. Auf der Basis von Struktur 5 wurde eine Rippenplatte ausgearbeitet und experimentell untersucht [8].

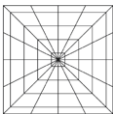
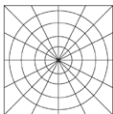
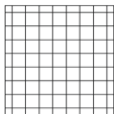
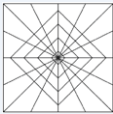
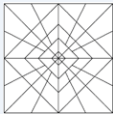
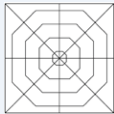
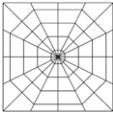
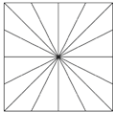
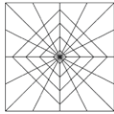
| Struktur / Fitness | | | | | |
|--------------------|---|----------|---|---------------------|--|
| 1 / 5,54 |  | 4 / 5,12 |  | 7 / 5,52 (Referenz) |  |
| 2 / 4,97 |  | 5 / 4,21 |  | 8 / 4,42 |  |
| 3 / 5,14 |  | 6 / 4,1 |  | 9 / 4,6 |  |

Tabelle 2: Übersicht Rippenstrukturen

| Geometrie | Bewehrung | Referenzplatte |
|---|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> ■ 4,0 m × 4,0 m Grundfläche ■ 10 cm Rippenbreite ■ 5 cm Rippenhöhe ■ 5 cm Plattenspiegel | <ul style="list-style-type: none"> ■ Rippen: 2 Ø 10 ■ Plattenspiegel: Q188 ■ Querkraftbewehrung: - | <ul style="list-style-type: none"> ■ 7 cm Dicke ■ Ø 10/20 cm kreuzweise |

| Platte | Druckfestigkeit f_c [N/mm ²] | Elastizitätsmodul E_c [N/mm ²] | Traglast [kN] | Versagensart |
|--------|--|--|---------------|------------------|
| R1 | 62,0 | 32810 | 341 | Schubversagen |
| R2 | 57,8 | 31956 | 340 | Schubversagen |
| Ref | 56,4 | 31923 | 312 | Biegezugversagen |

Tabelle 3: Versuchsübersicht Rippenplatten

3.1.2 Experimentelle Untersuchung

Innerhalb der Versuchsreihe wurden zwei Rippenplatten und eine Referenzplatte (Vollplatte) hergestellt und getestet. Tabelle 3 zeigt die Eigenschaften der Probekörper, die Materialeigenschaften des Betons nach 28 Tagen sowie die erreichte Traglast der jeweiligen Prüfkörper. Bild 6 zeigt die Negativschalung der Rippenplatte sowie die Plattenunterseite. Die Lasteinleitung erfolgte als äquivalente Flächenlast über die in Kapitel 2.3 vorgestellte Konstruktion.

Ein Schubriss bei einer radialen Rippe der Prüfkörper R1 und R2 führte zum Lastabfall und damit zum Versagen des Systems. Bild 7 verdeutlicht die Versuchsergebnisse anhand eines Last-Verformungs-Diagramms, Bild 8 zeigt eine Detailaufnahme des Schubrisses.

Neben den verbesserten Tragfähigkeitseigenschaften und einer erhöhten Duktilität, weist die filigrane Leichtbaustruktur durch ihre naturinspirierte Form eine sehr ansprechende Struktur an der Plattenunterseite auf.

3.2 Krümmungen

Zur weiteren Optimierung der Querschnittsgestaltung und des Tragverhaltens wurden drei unterschiedlich an der Plattenunterseite gekrümmte Plattentypen (Kuppelplatte, s. Bild 9) entwickelt und untersucht. Als Optimierungsvariablen dienten der Stich, die Art der Krümmung und die Plattenhöhe. Plattentyp 1 ist über eine Krümmung, die bis zum Plattenrand verläuft, definiert. Bei Plattentyp 2 ist der Krümmungsradius an den beiden Plattendiagonalen orientiert (zwei Krümmungsrichtungen). Im Gegensatz zu den

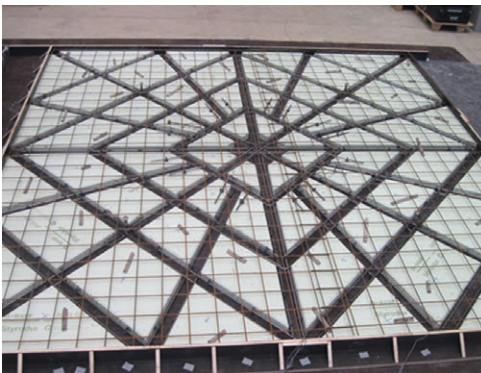


Bild 6: Bewehrte Negativschalung der Rippenplatte (links) und Probekörper nach dem Versuch (rechts)

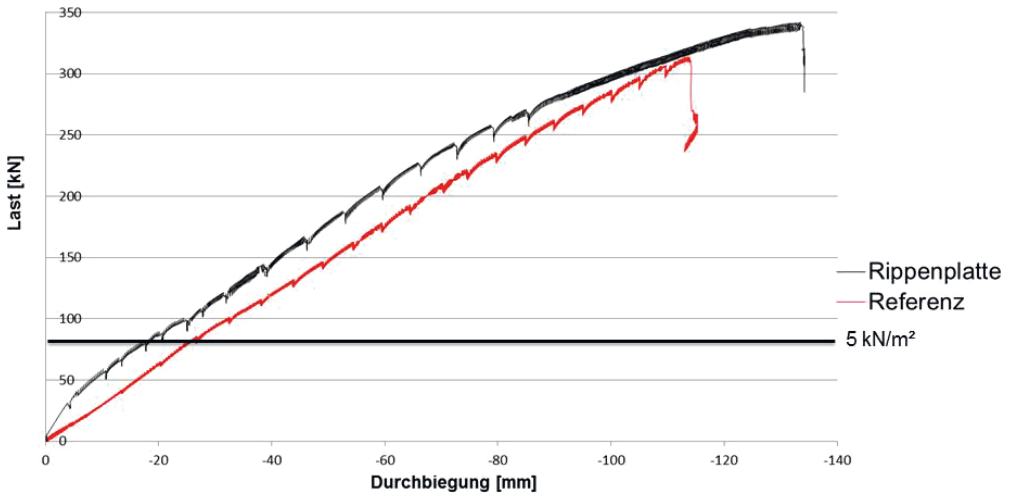


Bild 7: Last-Verformungs-Diagramm: experimentelle Untersuchungen: Rippenplatten R1 und R2, Referenzplatte



Bild 8: Versagen durch Schubrissbildung

anderen Platten hat Plattentyp 3 eine einfach gewölbte Krümmung über die Plattendiagonale.

Für die numerischen Untersuchungen wurde als Basis eine quadratische Grundfläche der Platten von 7,5 m × 7,5 m gewählt. Es wurden Festigkeitseigenschaften des Normbetons C25/30 angesetzt. Die Bewehrungsführung wurde in drei Varianten getestet: a) Ringbewehrung (4 Ø 10 mm), b) äquivalente Bewehrung der Referenzplatte

(kreuzweise Ø 14 mm/15 cm) als Ring- und Meridianbewehrung und c) unbewehrt. Die Kuppelplatten bzw. Referenzplatten wurden sowohl mit einer Randeinspannung als auch mit einer horizontal unverschieblichen Lagerung modelliert.

Ergebnisse der FE-Simulationen

In Bild 10 ist die Beeinflussung des Tragverhaltens durch Krümmungen auf der Plattenunterseite dargestellt. Die entwickelten Kuppelplattentypen weisen unterschiedliche Steifigkeiten bei gleichen Stichhöhen und gleichen Mindestdicken auf. Die Kuppelplattentypen 1 und 3 zeigen hierbei das beste Tragverhalten.

Weiterhin wurde eine Kuppelplatte des Typs 3 so dimensioniert, dass das Betonvolumen dem einer konventionellen Vollplatte mit einer Plattenhöhe von 27 cm entspricht (15 m³). Die Kuppelplatte hatte einen Stich von 30 cm und in Feldmitte eine Plattenhöhe von 10 cm. Die

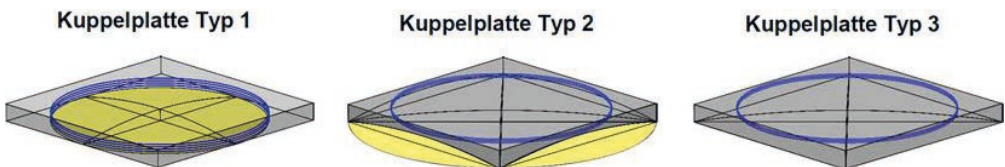


Bild 9: Übersicht der Kuppelplattentypen, von links nach rechts: Typ 1, Typ2, Typ 3

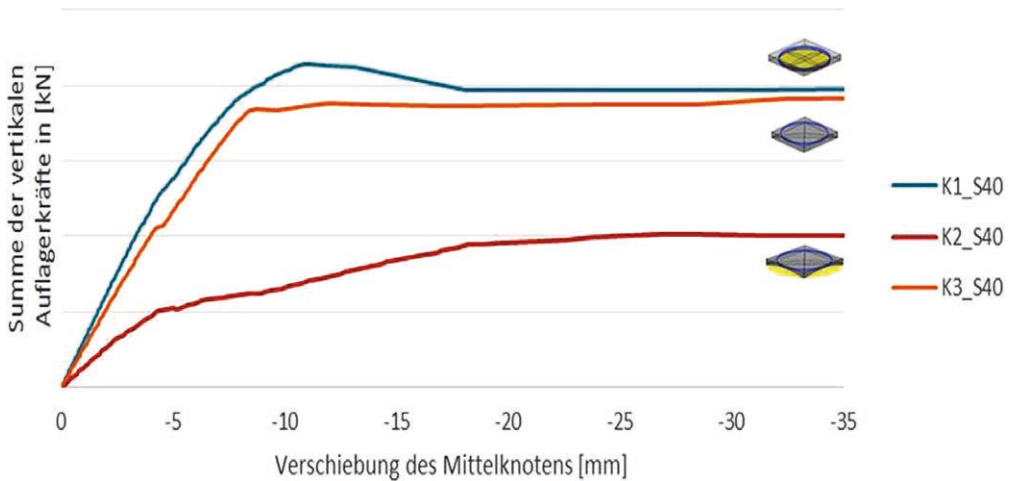


Bild 10: Einfluss der Krümmung auf das Tragverhalten

Bewehrungsmenge betrug jeweils $10,26 \text{ cm}^2/\text{m}$. Bei dieser entwickelten Kuppelplatte ist eine Traglaststeigerung von etwa 60 % zu erwarten. Der Lastabtrag erfolgt größtenteils über einen Druckbogen. Somit werden die auftretenden Momentenbeanspruchungen geringer als bei konventionellen Platten. Neben den positiven Tragfähigkeitseigenschaften muss bei dieser Konstruktionsart beachtet werden, dass die abtreibenden Lagerkräfte zu vergleichsweise hohen Horizontalkräften führen, die entweder durch Widerlager aufgenommen oder durch eine konstruktive Rückverankerung im System gehalten werden müssen.

3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse: Bionische Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite

Die numerischen und experimentellen Untersuchungen an den bionischen Rippenplatten zeigten, dass durch eine sinnvolle naturinspirierte Anordnung der Rippenstruktur eine sehr gute Tragfähigkeit der Platte erzielt werden kann. Die Rippenplatten versagten jeweils nach Entstehung eines Schubrisses.

Die numerischen Untersuchungen der an der Plattenunterseite gekrümmten Platten zeigten, dass die Tragfähigkeit gegenüber einer Refe-

renzplatte bei gleichem Betonvolumen und gleicher Bewehrungsmenge erhöht ist. Dies wird vor allem durch die Änderung des Tragprinzips (Druckbogen) erzielt.

4 Einfluss von Hohlkörperformen und -anordnungen auf das Tragverhalten

Ausgehend von den bekannten Hohlkörperstrukturen für biaxiale Hohlkörperdecken [9] wurde in dieser Arbeitsphase eine Optimierung der Hohlkörperanordnungen und -formen untersucht. Bei den in der Baupraxis verwendeten Hohlkörperanordnungen kann eine Materialersparnis von bis zu 35 % erzielt werden. Der Einsatz von Verdrängungskörpern führt jedoch zu einer reduzierten Querkrafttragfähigkeit der Hohlkörperdecken, diese liegt bei etwa 60 % einer Vollplatte [9].

Das Ziel dieser Arbeitsphase ist die Untersuchung des Einsatzes unterschiedlichster Hohlkörperformen und Hohlkörperanordnungen sowohl zur Steigerung der Querkrafttragfähigkeit als auch zur weiteren Materialersparnis. Als Untersuchungsmethode zur Analyse der verschiedensten Modelle wurden im Rahmen des Forschungsprojekts physikalisch nichtlineare FE-Berechnungen eingesetzt.

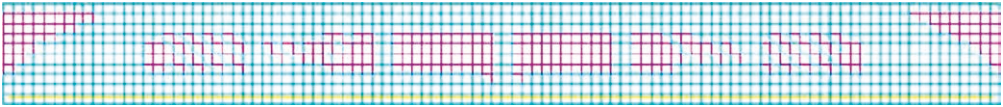


Bild 11: Tragstruktur nach der Anwendung des Rücksetzverfahrens

Ein auf dem Rücksetzverfahren basierender Optimierungsprozess entwickelte über mehrere Optimierungsintervalle eine Tragstruktur mit steifigkeitsfreien Bereichen. Hierbei wurde ausgetestet, welche Bereiche keinen signifikanten Einfluss (Hohlkörperbereich) auf die Verformung des Systems nehmen [10]. In Bild 11 sind die steifigkeitsfreien Bereiche in violett dargestellt.

4.1 FE-Vergleichsstudie unter Einzellast und Flächenlast

Für den Einsatz in Stahlbetonplatten bieten sich verschiedene geometrische Formen als Verdrängungskörper an, bspw. Kugeln oder Würfel. In der numerischen Vergleichsstudie wurde eine Vielzahl von Modellen mit unterschiedlichen Hohlkörperformen und -anordnungen generiert, berechnet und anschließend analysiert. Das Tragverhalten der Modelle ($h = 0,35 \text{ m}$) wur-

de unter einer auflagnernahen Einzellast (Plattengrundfläche $5 \times 5 \text{ m}$) und einer Flächenlast (Plattengrundfläche $7 \times 7 \text{ m}$) untersucht. Der Biegebewehrungsquerschnitt betrug bei allen Platten $7,85 \text{ cm}^2/\text{m}$.

4.1.1 Querkrafttragverhalten

Für die numerischen Untersuchungen zum Querkrafttragverhalten wurde eine Einzellast in einem a/h -Verhältnis von 1,5 aufgebracht. Zunächst wurde der Einfluss bei sehr starker Betonvolumenreduktion (knapp 60 %) mittels würfelförmigen Hohlkörpern (WUHK-32) verglichen mit dem von würfel- und kugelförmigen Hohlkörpern (KUHK-32 und WUHK-25,8) mit einer Ersparnis von etwa 30 %.

Bild 12 zeigt, dass durch die sehr großen Würfel das Tragverhalten erwartungsgemäß sehr stark geschwächt wird. Dies ist insbesondere darauf

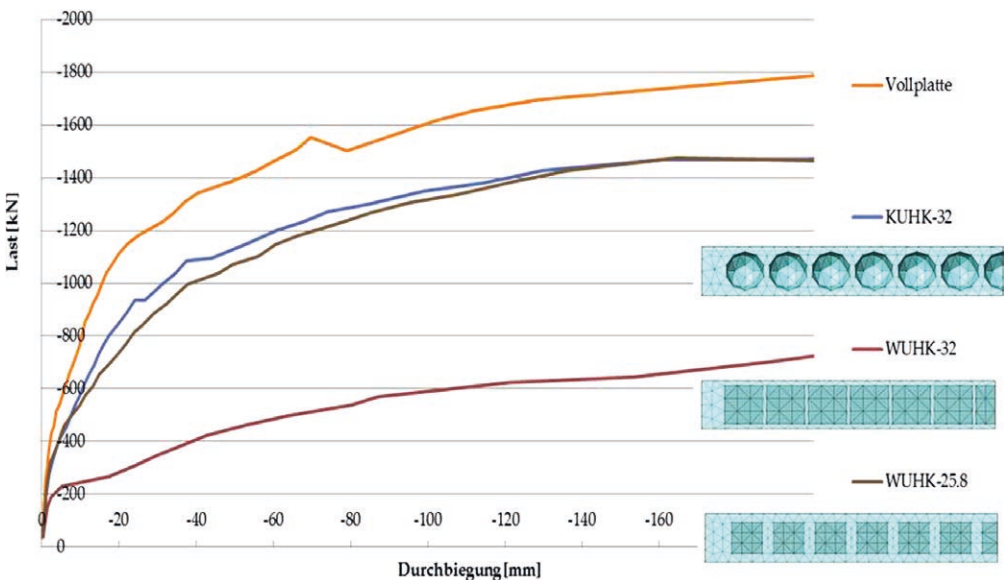


Bild 12: Tragverhalten unter einer auflagnernahen Einzellast

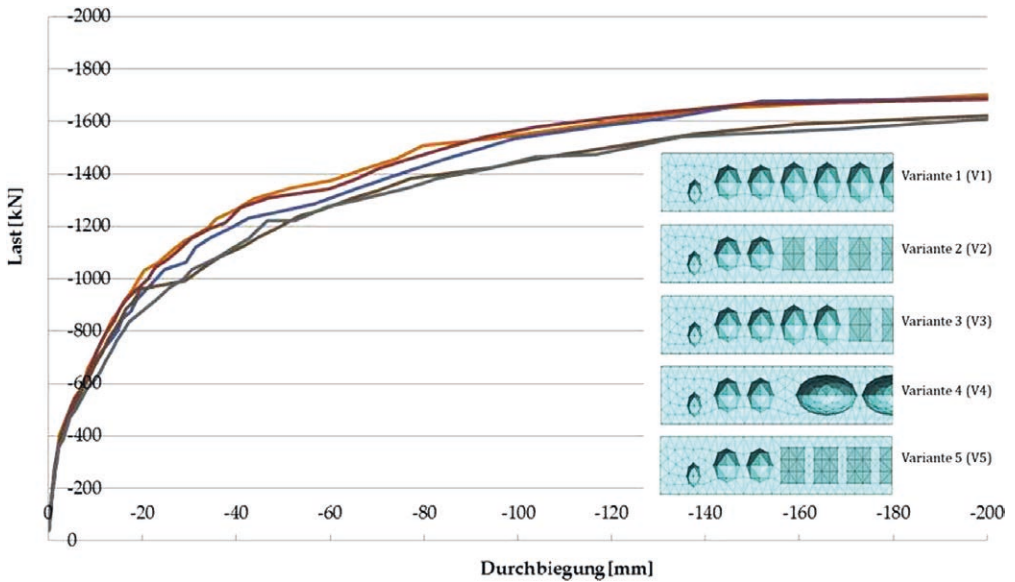


Bild 13: Varianten 1–5 aus der Vergleichsstudie mit einer Betonersparnis von 15 %

zurückzuführen, dass sich die Druckstrebe nur sehr gering bzw. sehr schlecht ausbilden konnte.

Dieser Extremfall wurde im weiteren Simulationsverlauf herunterskaliert, so dass sich bei den folgenden Modellen eine Druckstrebe besser ausbilden konnte. In Bild 13 sind fünf Varianten mit unterschiedlichen Formen und Anordnungen dargestellt. Der Mittelpunktabstand der Hohlkörper beträgt 35 cm bzw. bei den sehr breiten Formen 70 cm. Die Ergebnisse zeigen nur geringe Einflüsse im Tragverhalten auf, so dass durch die Analysen keine eindeutige Anordnung oder Hohlkörperform zur Verbesserung des Querkrafttragverhaltens identifiziert werden konnte.

4.1.2 Biegetragverhalten

Die Hohlkörperanordnungen (Varianten 1–5) weisen unter einer Flächenlast keine nennenswerten Tragfähigkeitsverluste auf. Erst bei einer signifikanten Vergrößerung der Hohlkörper kommt es zu Tragfähigkeitsverlusten infolge des gestörten Kraftflusses in der Druckzone, Bild 14.

Tabelle 4 fasst die Ergebnisse zusammen. Zur Beschreibung des Wirkungsgrades der berechneten Platten, wurde die Materialausnutzung (Flächenlast pro m^3 Beton) der Platten bei einer Verformung von 50 mm verglichen. Die besten Ergebnisse wurden mit kugelförmigen und würfelförmigen Hohlkörpern erzielt. Eine signifikante Verbesserung des Tragverhaltens konnte jedoch nicht erreicht werden.

4.2 Zusammenfassung der Ergebnisse: Hohlkörperform und -anordnung

Bei der Untersuchung des Querkrafttragverhaltens zeigten die Ergebnisse der FE-Analysen, dass sich die Traglast gegenüber der Traglast einer vergleichbaren Vollplatte stark verringert. Dies ließ sich durch keine der Varianten wesentlich verbessern. Erhebliche Tragfähigkeitsverluste wurden jedoch durch die Anordnung sehr großer würfelförmiger Strukturen nachgewiesen. In der zweiten Untersuchungsreihe wurden Platten unter einer Flächenlast analysiert. In den Ergebnissen sind keine großen Beeinflussungen des Tragverhaltens an den jeweiligen Platten mit unterschiedlichen Hohlkörperformen erkennbar. Einzig durch die Anordnung

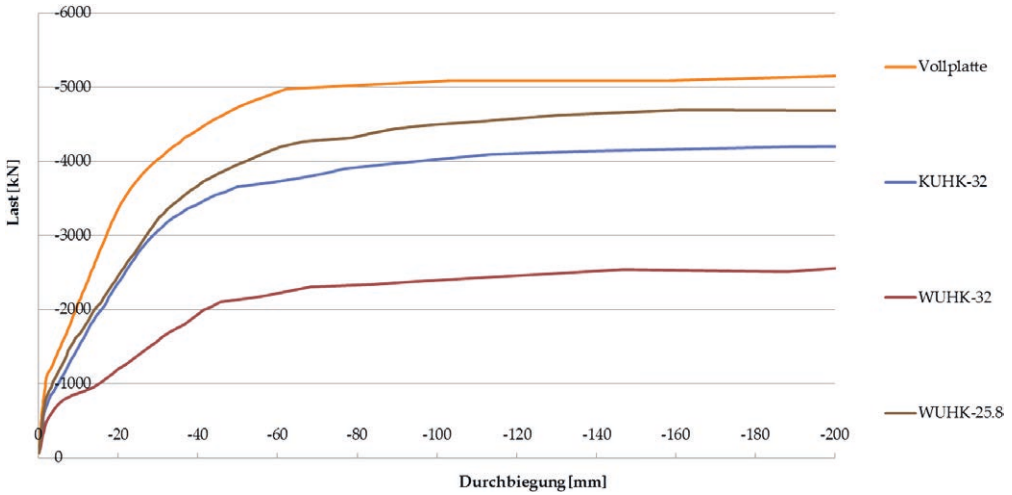


Bild 14: Tragverhalten unter einer Flächenbelastung

| | Kugel | Ellipsoid | Zylinder | Würfel | Torus | Ei | Referenz |
|---|-------|-----------|----------|--------|-------|------|----------|
| Flächenlast [kN/m ²] | 14,5 | 15,2 | 14 | 13,5 | 14,2 | 15,5 | 14,2 |
| Hohlkörperhöhe [cm] | 30 | 15 | 20 | 20 | 8 | 23 | - |
| Betonvolumen [m ³] | 3,14 | 3,89 | 3,48 | 2,94 | 3,63 | 4,07 | 3,5 |
| Ersparnis [%] | 26,8 | 9,3 | 18,8 | 31,4 | 15,3 | 5,2 | 18,4 |
| Materialausnutzung [kN/m ² /m ³] | 4,62 | 3,91 | 4,02 | 4,59 | 3,91 | 3,81 | 4,06 |

Tabelle 4: Lastniveau ausgewählter Hohlkörpermodelle bei 50 mm Verformung unter einer Flächenlast

sehr hoher Hohlkörper wird das Tragverhalten der Platten negativ beeinflusst.

5 Hybridsysteme

In Anlehnung an die biologische Wachstumsregel wurde in dieser Forschungsphase geprüft, welchen Einfluss Materialvariationen (Einsatz verschiedener Betonfestigkeiten) auf das Tragverhalten haben. Durch einen gradierten Aufbau einer Betonkonstruktion mit dem Einsatz eines höherfesten Betons in der Druckzone wird das Bauteil filigraner und gleichzeitig tragfähiger.

Am IfM wurden bereits erfolgreich Kleinversuche zur Untersuchung der Verbundfugen von

gradierten Bauteilen durchgeführt [11]. Durch eine geeignete Betonzusammensetzung, insbesondere durch den Einsatz von Zusatzstoffen, konnte eine erhöhte Fugentragfähigkeit gegenüber bisher bekannten Ergebnissen erzielt werden. Diese Erkenntnisse können für die Entwicklung eines gradierten Betonbauteils genutzt werden.

Die spinnennetzbewehrte Platte sowie eine Rippenplatte wurden als Betonhybridplatte einer FE-Analyse unterzogen. Die spinnennetzbewehrte Platte wurde im oberen Plattenbereich (5 cm ab Plattenoberkante) mit einem hochfesten Beton C80/95 modelliert. Die Rippenplatte wurde ebenfalls mit einem Plattenspiegel aus C80/95 numerisch untersucht. Als Normalbeton wurde für beide Platten ein C25/30 angesetzt.

Die jeweilige Bewehrungsmenge entsprach den Angaben der vorherigen Untersuchungen (s. Kapitel 3.1 und 4.1.2.). Die numerische Simulation zeigte, dass bei der gradierten spinnennetzbewehrten Platte eine Traglaststeigerung von knapp 26 % möglich ist. Bei der gradierten Rippenplatte wurde in der FE-Simulation die Traglast sogar um etwa 100 % gesteigert, Bild 15.

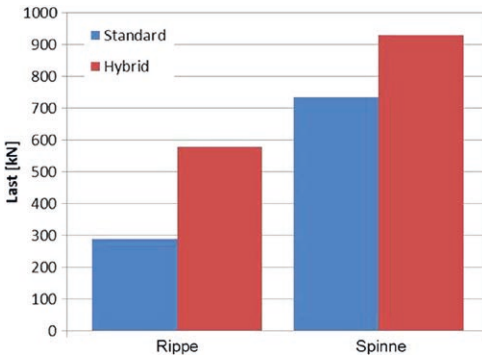


Bild 15: Traglaststeigerung der untersuchten Betonhybridstrukturen

6 Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden unter Einsatz von Optimierungsverfahren kombiniert mit physikalisch-nichtlinearen FE-Analysen und Bauteilversuchen drei unabhängige bionische Strukturen entwickelt. Diese innovativen Stahlbetonplatten besitzen durch die Adaption natürlicher Strukturen einen bionischen Kraftfluss, der das Tragverhalten gegenüber konventionellen Plattensystemen verändert. Mit den durchgeführten physikalisch nichtlinearen FE-Berechnungen konnte das Last-Verformungs-Verhalten der entwickelten Strukturen wirklichkeitsnah abgebildet werden.

Durch die Entwicklung einer hauptspannungsorientierten Bewehrungsanordnung auf der Basis des Radspinnennetzes wurde das Plattentragverhalten positiv beeinflusst. Die Biegesteifigkeit der Platten konnte auf diese Weise verbessert werden. Zusätzlich erhöhte sich die Duktilität der Struktur. Maßgebend für das

Tragverhalten ist die Dimensionierung und Ausbildung des Zugrings.

Die Querschnittsgestaltung an der Plattenunterseite wurde hinsichtlich einer bionischen Rippenstruktur ausgearbeitet und experimentell untersucht. Es zeigte sich, dass die Biegesteifigkeit erhöht und die Tragfähigkeit gegenüber einer konventionellen Stahlbetonplatte gesteigert wird.

Eine weitere Möglichkeit, den Kraftfluss zu steuern und das Tragverhalten positiv zu beeinflussen, konnte durch die Anordnung von Krümmungen an der Plattenunterseite erzielt werden. Der Parabelstich und der Radius stellen bei dieser Struktur die maßgebenden Parameter zur Verbesserung der Steifigkeit dar. Durch die Gewölbewirkung (Druckbogen) entsteht eine stark druckbeanspruchbare Tragstruktur.

In der dritten Arbeitsphase wurde der Einfluss von Hohlkörpern auf das Tragverhalten analysiert. Eine wesentliche Verbesserung des Tragverhaltens bei auflagnahen Lasten konnte nicht erzielt werden. Es zeigte sich aber, dass abgerundete Hohlkörperformen einen geringeren negativen Einfluss auf das Tragverhalten nehmen als große würfelförmige Strukturen.

Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens haben gezeigt, dass mit der Entwicklung bionischer Plattenstrukturen das Tragverhalten von Stahlbetonplatten positiv beeinflusst werden kann. Es ergeben sich jedoch weitere Fragestellungen für die Zukunft. Die Grundlagen wurden durch die Arbeiten in dem vorliegenden Forschungsprojekt geschaffen.

Danksagung

Die Autoren danken der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Projekts Nr. 198421558 innerhalb des Schwerpunktprogramms SPP 1542.

Literatur | References

- [1] Holland, J. H.: *Adaptation in Natural and Artificial Systems*. Ann Arbor: The University of Michigan Press, 1975
- [2] Schnellenbach-Held, M.; Pullmann, T.: *Genetische Optimierung von Tragstrukturen*. Bauingenieur 86 (2011) 9, S. 390–399
- [3] DIANA User's Manual, Release 9.6, TNO, Delft, 10/2014
- [4] Hordijk, D. A.: *Local Approach to Fatigue of Concrete*. PhD thesis, Delft University of Technology, 1991
- [5] Thorenfeldt, E.; Tomaszewicz, A.; Jensen, J. J.: *Mechanical Properties of High-Strength Concrete and applications in design*. In: Proc. of the 1st Int. Symp. on Utilization of High-Strength Concrete, 15.–18.06.1987 in Stavanger (Norwegen), Trondheim: Tapir, 1987, S. 149–159
- [6] Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: *Bionic Optimization of Concrete Structures by Evolutionary Algorithms*. Structural Engineering International 24 (2014) 2, S. 229–235
- [7] Habersaat, J.-E.: *Innovative Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes* In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): *Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 in Bochum, Ruhr-Universität Bochum, 2013, S. 35–40*
- [8] Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: *Bionic Structures for Innovative Concrete Slabs*. In: *Elegance in Structures – Proc. of IABSE Conf. Nara, 13.–15.05.2015 in Nara (Japan), 2015, Book of abstracts: S. 64/65, Langfassung digital, 8 S.*
- [9] Schnellenbach-Held, M.: *Tragverhalten zweiachsiger Hohlkörperdecken*. Der Prüfenieur 35 (2009), S. 36–46
- [10] Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: *Leichte Platten aus Beton als bionische Struktur*. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 102–111 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171410>*
- [11] Fickler, S.: *Verbundfuge zwischen Brückenüberbau und Verankerungskörper*. Tagungsband zum Young Engineers Colloquium YEC2014 of IABSE, 10.03.2014 in Dresden, 2014, S. 4/5

Bildnachweise | Picture credits

- Bilder 1, 11: Irina Schmidt
- Bilder 2–8, 15: Jan-Eric Habersaat
- Bilder 9, 10: Marc Misera
- Bilder 12–14: Seung-Wook Yoo

Projektdaten | Project data

Allgemeine Angaben | General information

Leichte Platten aus Beton mit biaxialem Lastabtrag als bionische Strukturen

Lightweight concrete slabs with biaxial load-bearing as bionic structures

| | |
|---|---|
| Antragstellerin Applicant: | Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held Institutsleiterin Institute's chair |
| DFG-Geschäftszeichen DFG reference number: | SCHN 639/13 (Projektnummer Project number: 198421558) |
| Adresse Address: | Universität Duisburg-Essen, Institut für Massivbau, Universitätsstr. 15, 45141 Essen |
| Kontakt Contact: | +49 201 183 2767 m.schnellenbach-held@uni-due.de massivbau@uni-due.de |
| Berichts-/Förderzeitraum Reporting/funding period: | 01.10.2011–30.09.2015 |
| Team Team: | Jan-Eric Habersaat |

Projektbezogene Publikationen | Project related publications

- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Bionik im Betonbau – Natürliche Strukturen und Konstruktionen als Inspiration für den Betonbau. *Bauingenieur* 88 (2013) 5, S. 205–213
- Habersaat, J.-E.: Innovative Bewehrungsanordnung nach dem Funktionsprinzip des Spinnennetzes In: Breitenbücher, R.; Mark, P. (Hrsg.): Beiträge zur 1. DAfStb-Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium, 07./08.11.2013 an der Ruhr-Universität Bochum, Bochum, 2013, S. 35–40
- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Bionic Optimization of Concrete Structures by Evolutionary Algorithms. *Structural Engineering International* 24 (2014) 2, S. 229–235
- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Leichte Platten aus Beton als bionische Struktur. In: Scheerer, S.; Curbach, M. (Hrsg.): *Leicht Bauen mit Beton – Forschung im Schwerpunktprogramm 1542, Förderphase 1*, Dresden: Institut für Massivbau der TU Dresden, 2014, S. 102–111 – <http://nbn-resolving.de/urn:nbn:de:bsz:14-qucosa-171410>
- Schnellenbach-Held, M.; Habersaat, J.-E.: Bionic Structures for Innovative Concrete Slabs. In: *Elegance in Structures – Proc. of IABSE Conf. Nara*, 13.–15.05.2015 in Nara (Japan), 2015, Book of abstracts: S. 64–65, Langfassung digital, 8 S.

Qualifikation wissenschaftlichen Nachwuchses im Rahmen des Projektes | Qualification of young academics within the framework of the project

Diplom- und Masterarbeiten | Diploma and Master's Theses

- Schmidt, I.: Optimierung von Stahlbetonbauteilen unter Einsatz Evolutionärer Algorithmen. 2012
- Sichma, L.: Optimierung des Kraftflusses mittels Querschnittsgestaltung und unter Verwendung von Betonhybridsystemen. 2012
- Miedzinski, G.: Experimentelle Untersuchung von biaxialen Stahlbetonplatten mit einer nichtorthogonalen Bewehrungsanordnung. 2013
- Thiesmann, S.: Experimentelle Untersuchung von biaxialen Stahlbetonplatten mit einer spinnennetzartigen Bewehrungsanordnung. 2013
- Seung-Wook, Y.: Eine numerische Vergleichsstudie zum Einfluss unterschiedlicher Hohlkörpergeometrien und -anordnungen auf das Tragverhalten von biaxialen Stahlbetonplatten. 2014

- Misera, M. A.: Untersuchung zum Einfluss von Krümmungen auf das Tragverhalten von biaxial gespannten Stahlbetonplatten. 2015
- Sathyakumar, A.: Development of an innovative configuration of hollow bodies for an optimized load-bearing behavior of reinforced concrete slabs regarding the nonlinear material behavior. 2015

Bachelorarbeit | Bachelor's Thesis

- Durski, P.: Auswertung experimenteller Untersuchungen zum Einfluss zweier unterschiedlicher Zugringkonstruktionen auf das Tragverhalten von innovativ bewehrten Stahlbetonplatten. 2015