

Diploma Thesis

Development of a bionic structure made of textile reinforced concrete based on the boxfish carapace

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Diplom-Ingenieur
of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Entwicklung eines bionischen Tragwerks aus Textilbeton nach dem Vorbild des Kofferfischskeletts

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades einer
Diplom-Ingenieurin
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Marlene Wachberger, BSc

Matr.Nr.: 01526357

unter der Anleitung von

O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. **Johann Kollegger**

Dipl.-Ing. Dr. techn. **Philipp Preinstorfer**

Institut für Tragkonstruktionen
Forschungsbereich Stahlbeton- und Massivbau
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/Stiege 2/ 3.Halbstock, 1040 Wien, Österreich

Wien, im November 2022



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Danksagung

Allen voran möchte ich meinem Betreuer, Dipl.-Ing. Dr. techn. Philipp Preinstorfer danken, der mich trotz großer Distanz hervorragend betreut hat, sich viel Zeit für mich nahm und mit mir gemeinsam nach Lösungen für die zeitweise sehr komplex erscheinende Problemstellung suchte. Dank gebührt auch Herrn O.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.-Ing. M.Eng. Johann Kollegger, dessen Vorträge über Betonbau bereits im Bachelorstudium mein Interesse an dem Werkstoff geweckt haben.

Herrn Mag. Dr. Daniel Abed-Navandi und dem Haus des Meeres möchte ich für die Bereitstellung des Kofferfisch-Kadavers und die warnenden Worte bezüglich des Kofferfisch-Giftes danken. Herrn Robert Illek und seinem Team der zoologischen Hauptpräparation im Naturhistorischen Museum Wien danke ich für die Aufbereitung des Skeletts, die glücklicherweise trotz der hohen Toxizität des Tieres problemlos funktioniert hat. Frau MSc Viola Winkler gilt mein Dank für die Erstellung eines MicroCT-Scans und eines virtuellen 3D-Modells des Fischeskeletts, welches einen besonders tiefen Einblick in dessen Struktur ermöglichte. Dem Institut für Tragkonstruktionen der TU Wien sei an dieser Stelle für die Finanzierung hierfür gedankt.

Meinen Freunden und langjährigen Studienkollegen Dipl.-Ing. Franz Untermarzoner und Dipl.-Ing. Lukas Rohrer danke ich für die laufenden Berichte über ihre eigenen Arbeiten am Institut für Tragkonstruktionen, die mich dazu anregten, mein eigenes Beton-Projekt zu starten.

Ebenso großer Dank geht an meine Studienkollegin, Freundin und Mitbewohnerin, Dipl. Ing. Lisa Lackner, die mir stets einen Schritt voraus war und mich motivierte, meine eigene Arbeit voran zu treiben.

Meinen Eltern möchte ich für die langjährige emotionale, sowie finanzielle Unterstützung danken, die mir das Studium ermöglichte. Zu guter Letzt danke ich meinem Partner, Mst. Christopher Zdrasil, der mich durch Höhen und Tiefen begleitet und mich immer unterstützt hat.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Kurzfassung

Beton trägt aufgrund des hohen Treibhausgasausstoßes, der vor allem bei der Produktion von Zement anfällt, maßgeblich zur globalen Erwärmung bei. Durch den Einsatz von Hochleistungswerkstoffen in einer belastungsoptimierten Bauteilgeometrie ist es möglich, ressourcensparendere, effizientere Konstruktionen zu errichten. Die Verwendung von korrosionsbeständigen Faserverbundwerkstoffen, wie zum Beispiel Textilbewehrung anstelle von üblicher Stahlbewehrung, ermöglicht darüber hinaus eine Reduktion der erforderlichen Betondeckung auf ein Minimum. Auf diese Weise können wesentlich schlankere, leichtere Bauteile konstruiert und Betonvolumen gespart werden.

Die Formfindung für solche Bauteile ist kein einfaches Unterfangen. Die Natur bietet aber viele Vorbilder für materialgerechtes Konstruieren. Im Rahmen der Bionik wird die Natur als Ideengeber für besonders effiziente Konstruktionsweisen herangezogen. In vorliegender Arbeit wird daran anlehnend das Skelett eines Kofferrfisches untersucht. Zu diesem Zweck wurde mittels Micro-CT Scan ein digitales 3D-Modell des Skeletts angefertigt, welches einen detaillierten Einblick in dessen Aufbau ermöglicht. Das Skelett besteht aus vorwiegend hexagonalen Platten, die an der Unterseite durch Diagonalrippen, sowie einen außen verlaufenden Zugring unterstützt sind. Statischen Überlegungen zufolge wird die Last im Skelett wie folgt abgetragen: Eine von außen angreifende Flächenlast resultiert in Druckspannungen an der Plattenoberseite, Zugspannungen an der Unterseite mit jeweils deutlichen Spannungsspitzen im Plattenzentrum, sowie Normalkräften in den Diagonalrippen, welche zum Rand hin in hohe Drucknormalkräfte (Druckbogenwirkung) übergehen. Der äußere Ring schließt den Kraftfluss über Zugnormalkräfte. In Anlehnung an die Geometrie des Fischeskeletts wird ein Plattentragwerk aus Textilbeton mit dem Ziel bestmöglicher Lastabtragung unter geringstmöglichem Materialaufwand entwickelt. Dieses besteht aus einer dünnen, hexagonalen Betonplatte, schlanken Diagonalrippen, die sich zum Plattenzentrum hin verzüngen, sowie einem exzentrisch zur Plattenunterseite angeordneten Ring aus Stahl. Statische Untersuchungen einer einzelnen Platte zeigen, dass die Schnittgrößen und Verformungen maßgeblich von der Steifigkeit des außenliegenden Zugrings, sowie von der Exzentrizität desselben abhängen. Je steifer der Zugring ist, desto eher kann eine Druckbogenwirkung der Diagonalrippen aktiviert werden, wodurch die Zugbeanspruchungen sowie die Biegeverformungen reduziert werden. Besonders günstige Schnittgrößen- und Verformungszustände können durch Vorspannen des äußeren Zugrings erzielt werden.

In weiterer Folge ist es denkbar, ähnlich wie beim Skelett des Kofferrfisches, mehrere solcher Platten modular zu einem Gesamttragwerk zusammen zu setzen. Langfristiges Ziel ist es, eine schlanke Dach- oder Deckenkonstruktion zu entwickeln, die durch gesteigerte Ressourceneffizienz einen geringeren ökologischen Fußabdruck besitzt als herkömmliche Plattentragwerke aus Stahlbeton.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abstract

Due to its high emission of greenhouse gases, the production of concrete contributes significantly to global warming. With the use of high performance materials, as well as a geometry that is optimized towards the distribution of forces, it is possible to build in a more efficient manner, thus saving resources. Furthermore, the replacement of steel reinforcement with non-corrosive fibre reinforced polymers (FRPs) enables a reduction of the necessary concrete cover. Henceforth, slimmer and lighter structures can be created and the concrete mass can be reduced.

The process of form finding can be difficult. However, nature provides numerous examples for material-efficient constructions. „Bionics” ist the name of a field of science, in which natural role models are taken as inspiration for particularly efficient structures. Following basic principles of bionics, the carapace of a boxfish is analysed in this thesis. By the use of a Micro-CT scan, a digital 3D-model of the carapace was created, which allowed a detailed evaluation of its structure. The carapace consists of numerous scutes, predominantly hexagonal in shape, with struts on the bottom, originating diagonally from the corners and tapering toward the center of the scute. A polygonal ring connects the struts on the outermost border. The structural analysis of the elements suggests the following load transfer: A surface load causes compressive stresses on the top side of the scute and tensile stresses on the bottom, showing peak stresses in the center. Furthermore, it results in tensile forces in the diagonal struts, which transition into high compressive forces towards the corners. The outer polygon serves as a tension ring that shortcircuits the compressive forces of the struts.

Based on the geometry of the boxfish carapace, a possible slab structure made of textile reinforced concrete is found. It consists of a thin, hexagonal concrete slab, slim diagonal ribs, which temper towards the center and an eccentric outer ring of steel. The goal was to maximize its load bearing capacity, while minimizing the amount of material used. Structural analysis of a single hexagonal slab element revealed, that the stress ratio and the deformation of the system is strongly affected by the stiffness of the outer ring as well as its eccentricity. A stiffer ring allows for the formation of a compressive arch along the diagonal elements, resulting in a reduction of tensile forces as well as deflections. Furthermore, favorable results can be achieved by prestressing the outer ring made of tensile elements.

Subsequently, it is aimed to form a larger slab structure by connecting several of the hexagonal elements, much like the carapace of the boxfish is made of numerous connected scutes. The long-term goal is the development of a slim roof or slab structure made of textile reinforced concrete, that is characterised by an enhancement of resource efficiency and a lower environmental impact compared to ordinary slabs made of steel reinforced concrete.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Inhaltsverzeichnis

Danksagung	II
Kurzfassung	IV
Abstract	VI
Inhaltsverzeichnis	VIII
Abkürzungen	IX
Abbildungsverzeichnis	XII
1 Einleitung	1
1.1 Ausgangslage und Problemstellung	1
1.2 Die Rolle von Beton bezüglich der globalen Treibhausgasemissionen	2
1.3 Faserverbundwerkstoffe zur Reduktion des Betonvolumens	3
1.4 Eigenschaften und ökologische Aspekte von Textilbeton	4
1.5 Aufgabenstellung und Ziel	8
2 Bionik	10
2.1 Begriffsklärung	10
2.2 Technische Biologie versus Bionik – Wo liegt der Unterschied?	11
2.3 Methoden der Bionik	12
2.4 Bionische Disziplinen	15
2.5 Bionik und Nachhaltigkeit	16
2.6 Bionik in der Architektur	19
2.7 Formgebung natürlicher Tragkonstruktionen	22
2.7.1 Polygonale Schalenkonstruktionen	23
2.8 Einige Beispiele aus der Bionik	24
2.8.1 Die Sache mit dem Haken	25
2.8.2 Was Haifische mit dem Fliegen zu tun haben	25
2.8.3 Der Kofferfisch auf Rädern	26
2.8.4 Lüften wie die Termiten	28
2.8.5 Die Seeigelschale als Bauvorlage	29
3 Das Skelett des Kofferfischs	31
3.1 Grundsätzliches zum Kofferfisch	31
3.2 Beschaffung und Aufbereitung des Untersuchungsobjektes	32
3.3 Analyse des Skeletts	32
3.3.1 Gesamtbild und Plattenverteilung	32
3.3.2 Einzelne Platten im Detail	34
3.3.3 Analyse anhand des digitalen 3D-Modells	36
3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Skelettanalyse	40

4	Tragwerksfindung und statische Analyse	41
4.1	Geometrische Randbedingungen und Belastung	41
4.2	Analyse der Schnittgrößen in den Diagonal- und Randrippen und Anpassung des Modells für die Randrippen	43
4.3	Analyse des Systemverhaltens bei Variation der geometrischen Abmessungen . .	45
4.3.1	Variation von Plattendicke und Rippenhöhe	46
4.3.2	Variation des Spannglieddurchmessers	48
4.4	Aufbringen einer Vorspannkraft auf den äußeren Zugring aus Spannstahl und Variation der Größe der Vorspannkraft	50
4.5	Optimierung einer ausgewählten Plattenkonstruktion im Sinne der Einhaltung üblicher Verformungsgrenzwerte und Diskussion des Steifigkeitsunterschieds zu einer rippenlosen Platte	52
4.6	Vorspannung der Zugglieder am Rand	54
4.7	Weiterführende Fragestellungen	55
4.7.1	Herstellungsverfahren	55
4.7.2	Skalierung, Verbindung und mögliche Einsatzbereiche	57
5	Zusammenfassung	60
5.1	Problemstellung und Ergebnisse	60
5.2	Weiterführende Fragestellungen	61

Abkürzungen

BFRP Basalt Fibre Reinforced Polymer

BOS Basic Oxygen Steelmaking

CFRP Carbon Fibre Reinforced Polymer

EAF Electric Air Furnace

FRP Fibre Reinforced Polymer

GFRP Glass Fibre Reinforced Polymer

GWP Global Warming Potential ([kgCO₂-Äq.])

VDI Verein Deutscher Ingenieure



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Abbildungsverzeichnis

1.1	FRP Bewehrungselemente	5
a	FRP Stäbe	5
b	FRP Textilbewehrung	5
2.1	Drei Schritte zur Entwicklung eines bionischen Produkts	12
2.2	Vorgangsweise bei Biology Push und Technology Pull Methode	13
2.3	Bionische Grunddisziplinen und deren Teilgebiete	15
2.4	Stadt der Künste und der Wissenschaften in Valencia – L’Umbracle und L’Hemisfèric	20
2.5	Frei Ottos Olympiadaach in München	22
2.6	Voronoi-Diagramm	24
a	Mercedes Benz’ „Bionic Car”	28
b	Leichtbaustruktur des „Bionic Car”	28
3.1	Untersuchtes Kofferfisch-Exemplar	32
a	Jungtier	32
b	Kadaver	32
3.2	Untersuchtes Skelett	33
a	Seitenansicht	33
b	Frontalansicht	33
c	Draufsicht	33
d	Untersicht	33
3.3	Mikroskopaufnahme der Platten	34
3.4	Plattenausschnitte im Detail	35
3.5	Digitales 3D-Modell des Kofferfischskeletts	36
3.6	Innenansicht der Skelettplatten	37
3.7	Innenansicht einer Platte im Detail	38
3.8	Verlauf und Struktur der Diagonalrippen und Randbalken	39
a	Seitenansicht der Diagonalrippen	39
b	vollwandiger Randbalken	39
c	aufgelöster Randbalken	39
3.9	Skizze einer hexagonalen Skelettplatte	40
4.1	Modellannahmen der untersuchten hexagonalen Platte	42
a	Plattengeometrie	42
b	Lagerung und Belastung	42
4.2	Plattenprototypen	43
4.3	Schnittgrößen unter Flächenlast	44
4.4	Platte mit Spannstahl-Zugring	45
4.5	Schnittgrößen und Verformungen bei Variation von Plattendicke und Rippenhöhe	47
a	Durchbiegung	47
b	Normalspannung an der Plattenunterseite	47
c	Normalkraft	47
d	Biegemoment	47

4.6	Variation des Zugglieddurchmessers bei konstanter Plattendicke	49
a	Durchbiegung	49
b	Normalspannung	49
c	Normalkraft	49
d	Biegemoment	49
4.7	Systemverhalten unter Eigengewicht, Flächenlast und Vorspannung bei Variation der Größe der Vorspannkraft	51
a	Durchbiegung	51
b	Normalspannung	51
c	Normalkraft	51
d	Biegemoment	51
4.8	Vergleich der gerippten und der rippenlosen Plattenkonstruktion	54
a	Durchbiegung	54
b	Normalspannung	54
4.9	Vergleich der gerippten und der rippenlosen Plattenkonstruktion bei einer Vorspannung mit 10 kN	55
a	Durchbiegung	55
b	Normalspannung	55
4.10	3D-Druck einer Kofferfisch-Platte	57
4.11	Pavillion	58
4.12	Deckentragwerk aus zusammengesetzten Kofferfisch-Platten	59

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Ausgangslage und Problemstellung

Die Welt steht vor einer enormen Herausforderung. Der Klimawandel beschäftigt mittlerweile nicht mehr nur Klimaforscher und Wissenschaftler, sondern hat, unter anderem durch die Häufung von Extremwetterereignissen, bereits spürbaren Einfluss auf das Leben des Normalbürgers erlangt. Wissenschaft und Politik stehen vor der schwierigen Aufgabe Lösungen zu finden, um diese rasante Entwicklung zu bremsen. Im Rahmen des UN-Klimaschutzabkommens von Paris im Jahr 2015 wurde das Ziel gesetzt, die Erderwärmung auf maximal 2°C im Vergleich zu vorindustriellen Werten zu beschränken (*Paris Agreement 2022*). Um ihren Beitrag zum Erreichen dieses Ziels zu leisten, plant die EU bis zum Jahr 2050 klimaneutral zu werden. Konkret bedeutet das, dass keine Treibhausgas-Emissionen (netto – also unter Berücksichtigung natürlicher Senken und Speicher) mehr freigesetzt werden sollen (Anderl et al., 2021). Laut dem *Global Status Report for Buildings and Construction* (2021) sind der Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden im Jahr 2021 in Summe 36% des globalen Energieverbrauchs, sowie 37% des globalen Emissionsausstoßes zuzuschreiben. 20% des letztgenannten Wertes stammen von Tätigkeiten der Bauindustrie. Demnach ist die Bauindustrie im Jahr 2021 für 841 Megatonnen CO₂-Ausstoß verantwortlich. Zum Erreichen des Null-Emissionen-Ziels hat die Bauwirtschaft folglich einen beachtlichen Beitrag zu leisten. Dies kann nur durch ein radikales Umdenken und die Findung neuer, umweltfreundlicher Bauweisen geschehen.

Als Gründe, weshalb Energieeffizienz bislang nur von untergeordneter Bedeutung bei der Errichtung neuer Bauwerke geblieben ist, nennen Ryghaug und Sørensen (2009) den Mangel an politischen Steuerungsmaßnahmen, wie zum Beispiel die Förderung von energieeffizienten Projekten und die strengere Regulierung der Mindestanforderungen durch Normen, sowie eine konservative Grundhaltung in der Bauindustrie selbst. Die Bauindustrie hat im Speziellen mit dem „Investor-Nutzer-Problem¹“, zu kämpfen, welches von Kovacic (2005) auch als „Investor-Architektur-Problem“ bezeichnet wird. Im Interesse des Bauherren liegt an oberster Stelle die Kostenersparnis bei der Errichtung des Objektes, sodass dieses möglichst gewinnbringend weiterverkauft werden kann. Maßnahmen zur Erhöhung der Energieeffizienz sind in der Regel teurer und zeigen erst langfristig bei der Einsparung von Energiekosten im laufenden Betrieb wirtschaftliche Vorteile (Ryghaug und Sørensen, 2009). Einer Studie des *World Economic Forum* (Nesler, 2020) zufolge, führt jeder in Maßnahmen zur Steigerung der Energieeffizienz investierte Dollar langfristig zur Ersparnis von 3 Dollar an Energiekosten (*Global Status Report for Buildings and Construction*, 2021). Den positiven Effekt würde im späteren Verlauf erst der Nutzer des Objektes spüren. Da die Entwicklung von Energiepreisen aber starken Schwankungen unterliegt, sind die tatsächlichen langfristigen Ersparnisse a priori sehr schwierig einzuschätzen und lassen sich schlecht vermarkten (Ryghaug und Sørensen, 2009). Hinzu kommt die Problematik, dass Architekten, die maßgeblich für die Gestaltung des zu realisierenden Gebäudes verantwortlich sind, laut einer Studie von

¹„tenant-owner dilemma“ nach Lovell (2005)

Ryghaug und Sørensen (2009) die Planung von Energieeffizienz-Maßnahmen nicht als Teil ihres Aufgabenbereichs zu sehen scheinen, beziehungsweise zumeist optische Schönheit technischen und energetischen Vorteilen vorziehen. Unter Berücksichtigung des hohen Kosten- und Zeitdrucks bei der Realisierung von Bauprojekten führt dies häufig zur Wahl bereits erprobter Lösungen. In der Forschung und Entwicklung innovativer Lösungen wird von Seiten der Baukonzerne nur selten investiert und auch an der Kommunikation mit Forschungseinrichtungen, die derartige Lösungen liefern könnten, scheitert es oft, da es keine Zuständigen dafür gibt (Ryghaug und Sørensen, 2009).

Die oben genannten Schwierigkeiten müssen auf dem Weg zu einer klimaneutralen Bauindustrie bis 2050 überwunden werden. Ohne Anspruch darauf zu erheben, eine Komplettlösung für das Klimaproblem zu liefern, soll die vorliegende Arbeit einen Beitrag zur Erforschung innovativer, umweltfreundlicherer Bauweisen leisten. Als „Meisterin der Baukunst“ (Nachtigall, 2010) mit einem über Jahrtausende geprägten Erfahrungsschatz, liefert die Natur viele Beispiele für leistungsstarke, ressourcenschonende und energetisch günstige Konstruktionen. Im Rahmen der Bionik wird aus dem Ideenreichtum der Natur geschöpft. Durch Abstraktion natürlicher Prinzipien und deren Übersetzung in ein für den Menschen technisch herstell- und nutzbares System werden innovative Lösungen für technische Problemstellungen erarbeitet. Insbesondere auf der Suche nach Nachhaltigkeitsstrategien im Sinne der Umweltfreundlichkeit kann es ein lohnenswerter Ansatz sein, die Natur als Inspirationsquelle heranzuziehen. Auf die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit und die diesbezügliche Vorbildfunktion der Natur wird im weiteren Verlauf der Arbeit eingegangen.

1.2 Die Rolle von Beton bezüglich der globalen Treibhausgasemissionen

Laut einer Studie des UN Department of Economic and Social Affairs (2022) wird für das Jahr 2060 eine Bevölkerungszahl von weltweit über zehn Milliarden Menschen prognostiziert. Das entspricht einem Zuwachs von mehr als zwei Milliarden Menschen im Vergleich zum Jahr 2021, welche Raum zum Wohnen, Arbeiten und Leben benötigen. Dieser Raum muss erst geschaffen werden, wobei die Errichtung neuer Gebäude und Infrastrukturelemente unumgänglich ist. Aktuell ist Beton das am meisten verwendete Baumaterial weltweit (Huang et al., 2020). Seine Beliebtheit ist der hohen Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit des Baustoffs zuzuschreiben, weshalb er auch von zukünftigen Bautätigkeiten schwer wegzudenken ist. Jedoch darf dabei nicht auf die enorm hohen ökologischen Auswirkungen, die die Betonproduktion mit sich bringt, vergessen werden. Der weltweite Materialverbrauch wird sich laut einer Studie der OECD bis 2060 im Vergleich zum Jahr 2019 mehr als verdoppeln und der Anteil des Betons an den globalen Treibhausgasemissionen, wenn keine Maßnahmen getroffen werden, von 9 auf 12% steigen.

Der mit Abstand größte Anteil der Treibhausgasemissionen bei der Produktion von Beton ist auf die Zementherstellung zurückzuführen. Laut der Umweltproduktdeklaration für Beton der Klasse C30/37 (2018) beträgt der Anteil der Zementproduktion am gesamten Treibhauspotenzial für einen m³ Beton über 80%. Der Grund dafür ist zum einen die prozessbedingte Freisetzung von CO₂ bei der chemischen Reaktion zur Herstellung von Klinker und zum anderen der hohe Energieaufwand, der erforderlich ist, um das Rohmaterial auf über 1000°C zu erhitzen (Andrew, 2018).

Es wird deshalb intensiv an Möglichkeiten zur Verbesserung der Umweltbilanz von Beton geforscht. Beispielsweise kann die Menge an Portlandzementklinker, dessen Herstellung besonders

energieaufwändig ist, in der Betonmischung reduziert und teilweise durch alternative Ausgangsstoffe wie Flugasche oder Hüttensand substituiert werden. Diese entstehen als Abfallprodukte aus anderen Industriezweigen und können auf diese Weise weiterverwertet werden. Flugasche zum Beispiel entsteht bei der Verbrennung in Kohlekraftwerken und Hüttensand wird durch Granulation von Hochofenschlacke aus der Stahlherstellung gewonnen (Mehta, 2002). Projekte von Malhotra (1986), Bisailon, Livest und Malhotra (1994) und Mehta und Langley (2000) zeigen, dass sogar mit 50-60% Volumensanteil an Flugasche leistungsstarke und dauerhafte Betone hergestellt werden können. Entgegen aber der Darlegung von Mehta (1999), dass Flugasche in großen Mengen, insbesondere in China und Indien, verfügbar sei, sind Proske et al. (2012) der Meinung, dass die verfügbare Menge an Flugasche und Hüttensand nicht ausreichend sei, um Portlandzementklinker in relevanten Größenordnungen zu ersetzen. Proske et al. (2012) sehen die Lösung des Problems deshalb vielmehr in der allgemeinen Reduktion des Zementanteils in der Betonrezeptur. Beim sogenannten „Ökobeton“ wird zunächst das Verhältnis von Wasser zu Zement (W/Z-Wert) einer konventionellen Betonrezeptur durch starke Reduktion des Wassergehalts gesenkt. Zur Gewährleistung der Verarbeitbarkeit und Fließfähigkeit des Betons wird das fehlende Leimvolumen durch Betonzusatzstoffe ergänzt und in der Regel ein Hochleistungsfließmittel hinzugefügt. Mit fallendem W/Z-Wert steigt die Druckfestigkeit des Betons zunächst an, was eine Reduktion des Zementgehalts, der maßgebenden Einfluss auf die Druckfestigkeit hat, erlaubt. Auf diese Weise ist es möglich, Betone mit deutlich günstigerer CO₂-Bilanz, bei gleichbleibender Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit, im Vergleich zu herkömmlichen Beton herzustellen (Proske et al., 2012).

1.3 Faserverbundwerkstoffe zur Reduktion des Betonvolumens

Ein alternativer Zugang zur Reduktion der Treibhausgasemissionen ist die Minimierung des zu verbauenden Betonvolumens per se. Bei üblichen Betonkonstruktionen trägt das Eigengewicht mit einem verhältnismäßig großen Anteil zur Gesamtbelastung bei. Bei einer durchschnittlichen, 28 cm starken und 6 m weit gespannten Stahlbetondecke beträgt der Anteil des Eigengewichts laut Kromoser, Preinstorfer und Kollegger (2018) in etwa die Hälfte der Gesamtbelastung. Darüber hinaus steigt die Tragfähigkeit einer Konstruktion nicht direkt proportional mit ihrem Eigengewicht, welches mit der dritten Potenz (dem Volumen) wächst, sondern nur mit der zweiten Potenz (der Querschnittsfläche) (Schlaich, 2013). Durch den Einsatz von Hochleistungswerkstoffen ist es jedoch möglich, schlankere und leichtere Tragwerke herzustellen, die mit weniger Material die gleiche, beziehungsweise eine höhere Tragfestigkeit erbringen können.

Ein wesentliches Problem von herkömmlichen Stahlbetonkonstruktionen ist die Korrosionsanfälligkeit der Bewehrung. Zum Schutz der Bewehrungsstäbe vor korrosionsfördernden Umwelteinflüssen müssen diese in ausreichendem Maß mit Beton, dessen alkalisches Milieu den Korrosionsprozess unterbindet, überdeckt sein. Die Mindestbetondeckung beträgt nach *ÖNORM EN 1992-1-1:2021* je nach dem Aggressivitätsgrad der Umgebung zwischen 20 und 65 mm. Selbst bei Einhaltung dieser Grenzwerte kann der Korrosionsschutz aufgrund von Rissbildung im Beton nicht dauerhaft gewährleistet werden (Mehta, 2002). Kosten- und materialintensive Instandhaltungsmaßnahmen sind die Folge. Bauwerke, die stark aggressiven Umwelteinwirkungen ausgesetzt sind, wie solche in Meeresnähe oder Infrastrukturbauwerke unter Frost-Tausalz-Belastung, sind demnach besonders aufwendig in ihrer Erhaltung (Mehta, 2002).

Eine mögliche Lösung für das Korrosionsproblem stellt der Einsatz von Faserverbundwerkstoffen anstelle von Stahlbewehrung (FRP - fibre reinforced polymer) zur Aufnahme der Zugkräfte

dar. Diese besitzen eine deutlich geringere Dichte als Stahl, sind wesentlich korrosionsbeständiger und besitzen Zugfestigkeiten, die jene von üblichem Betonstahl weit übertreffen (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018). Diese Eigenschaften erlauben es, dünnere Bauteile herzustellen, die ein geringeres Gewicht aufweisen. Den Grundbaustein von Faserverbundwerkstoffen bilden in der Regel hochleistungsstarke Fasern. Im Bauwesen sind Carbonfasern und alkaliresistente (AR) Glasfasern am häufigsten in Gebrauch (Curbach und Jesse, 2009, Scheerer, 2015), aber auch Basaltfasern können zur Anwendung kommen. Am leistungsstärksten sind Elemente aus Carbonfasern, mit denen Zugfestigkeiten von über 3500 MPa erreicht werden (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018). Aufgrund der aufwendigen Herstellung sind Carbonfasern jedoch sehr teuer (Curbach und Jesse, 2009). Mit den deutlich kostengünstigeren AR-Glasfasern oder Basaltfasern können Zugfestigkeiten von bis zu 1600 MPa bzw. 2500 MPa erreicht werden, welche die Zugfestigkeiten von gewöhnlichem Baustahl ebenfalls weit übertreffen (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018). Aufgrund ihrer geringeren Steifigkeit führt der Einsatz von AR-Glas- oder Basaltfasern jedoch zu größeren Bauwerksverformungen, die negative Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit haben können (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020). Die Widerstandsfähigkeit von Basaltfasern gegenüber dem alkalischen Milieu des Betons ist ebenfalls noch ungeklärt (Preinstorfer et al., 2022).

Die Fasern werden zunächst zu sogenannten Rovings gebündelt. Ein Roving besteht je nach Anwendungsbedarf aus mehreren Hunderten bis Tausenden parallel angeordneten Elementarfasern (Filamenten; Curbach und Jesse, 2009, Scheerer, 2015). Die Rovings können beispielsweise durch das Strangziehverfahren (Pultrusion) zu Stäben und Litzen geformt werden. Beim Pultrusionsverfahren werden die Rovings in Matrixharz getränkt, in die gewünschte Form gebracht und anschließend erhärtet (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018). Die Stäbe und Litzen können vorgespannt werden und sind für die Übertragung besonders hoher, konzentrierter Lasten günstig. Abbildung 1.1a zeigt verschiedene faserverstärkte Bewehrungsstäbe aus Carbon-, Glas- bzw. Basaltfasern mit unterschiedlichen Oberflächenstrukturen. Die Oberflächenstruktur hat maßgeblichen Einfluss auf das Verbundverhalten mit dem umgebenden Beton (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018). Für flächenhafte Bauteile hingegen ist der Einsatz textiler Bewehrungselemente geeignet. Hierfür werden die Rovings mit Verfahren aus der Textilverarbeitung, wie zum Beispiel Stricken, Sticken oder Weben, zu ein- oder mehrlagigen Matten verbunden. Häufig werden biaxiale Gitterstrukturen erzeugt, jedoch sind auch mehraxiale Freiformen herstellbar (Younes et al., 2015). Die Matten werden mit einem Imprägniermittel getränkt, das die Formstabilität der Bewehrung sicherstellt und das Verbundverhalten beeinflusst. Das Imprägniermittel stellt zudem den Kraftschluss zwischen den einzelnen Filamenten her, der notwendig ist um das volle Lastabtragungspotenzial zu aktivieren, da nur die Randfilamente in direktem Verbund mit dem umgebenden Beton liegen (Younes et al., 2015). Abbildung 1.1b zeigt einige zwei-, bzw. dreidimensionale textile Bewehrungsgitter.

1.4 Eigenschaften und ökologische Aspekte von Textilbeton

Werden textile Faserverbundelemente im Beton als Bewehrung eingesetzt, so spricht man von Textilbeton. Nicht zu verwechseln ist der Textilbeton mit Faserbeton, bei welchem kürzere Fasern mit üblichen Längen zwischen 10 und 100 mm (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018) der Betonmischung beigefügt werden. Die Fasern sind in diesem Fall zufällig in beliebige Richtungen ausgerichtet. Sie sind weniger zur gezielten Lastabtragung geeignet, sondern können zur allgemeinen Verbesserung der Biegezugfestigkeit (Scheerer, 2015) und des Duktilitätsverhaltens des Betons, also zur Vermeidung spröden Versagens, eingesetzt werden (Kromoser, Preinstorfer

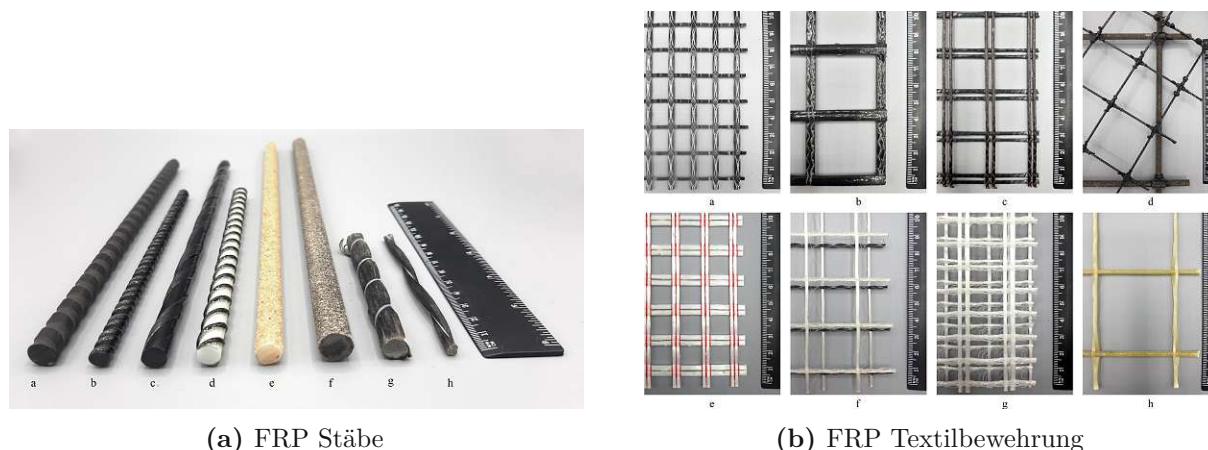


Abb. 1.1: Verschiedene Arten von faserverstärkten Bewehrungselementen, Fotos: Reichenbach et al. (2021), Copyright © 1969, Elsevier

und Kollegger, 2018). Textilbewehrungselemente hingegen werden in einer dem Kraftfluss im Bauteil entsprechenden Form gezielt an Stellen mit Zugbeanspruchung angeordnet (Curbach und Jesse, 2009). Die Herstellung von Bauteilen aus Textilbeton erfolgt üblicherweise entweder durch schichtweises Laminieren des Betons und Einlegen der einzelnen Bewehrungslagen oder durch Vergießen eines a priori in Form gebrachten Bewehrungskorbes (Scheerer, 2015).

Prinzipiell funktionieren Konstruktionen aus Textilbeton ähnlich wie jene aus Stahlbeton: Der Beton übernimmt die Druck- und die Bewehrung die Zugspannungen. Der wesentliche Unterschied liegt in der Größenordnung. Laut Curbach und Jesse (2009, S. 10) sind „beim Textilbeton [...] alle Größenordnungen des Stahlbetons – vereinfacht ausgedrückt – eine Größenordnung kleiner.“ Übliche Bauteildicken betragen nur etwa 30-50 mm, die zur Gewährleistung der Verbundwirkung erforderliche Betondeckung liegt im Bereich weniger Millimeter und die üblichen Querschnittsflächen der textilen Bewehrung betragen in etwa 0,0025 - 0,02 cm² (Curbach und Jesse, 2009). Auch die Betonmischung muss den kleineren Randbedingungen angepasst werden. Das Größtkorn liegt im Bereich von 1-4 mm (Curbach und Jesse, 2009), bzw. 1-7 mm (Scheerer, 2015). Aufgrund der verhältnismäßig engen Bewehrungsführung – übliche Gitteröffnungsweiten betragen etwa 20-70 mm (solidian GmbH, 2022) – ist eine besonders feine und fließfähige Betonmischung erforderlich, die keiner, beziehungsweise wenig manueller Nachverdichtung bedarf. Die Betonrezepturen beinhalten neben Gesteinskörnung, Zement und Wasser oftmals zusätzlich Silikastaub, Flugasche und ein Fließmittel. Der auf diese Weise produzierte Beton zählt aufgrund seiner hohen Druckfestigkeit von etwa 65 - 90 MPa zu den Hochleistungsbetonen (Scheerer, 2015). Auch Anwendungen mit noch höherwertigem Beton, wie zum Beispiel Ultrahochleistungsbeton (UHPC), mit welchem Druckfestigkeiten von weit über 120 MPa (Perry, 2018) erzielt werden können, sind möglich (Kromoser, Preinstorfer und Kollegger, 2018).

Wesentlich für die Beurteilung des ökologischen Fußabdrucks von Textilbeton im Vergleich zu Stahlbeton ist die Erhebung umweltschädlicher Auswirkungen im Zuge der Herstellung. Das globale Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, GWP) zählt neben dem Ozonabbaupotenzial, Eutrophierungspotenzial und Versauerungspotenzial zu den wesentlichen Indikatoren, die bei der Ökobilanzierung von Produkten zu berücksichtigen sind. Das GWP ist ein Maß für die Menge an Treibhausgasen, die bei Prozessen wie der Gewinnung von Rohmaterial, dem Transport und der Herstellung eines Produktes, freigesetzt werden. Es wird in kgCO₂-Äquivalent gemessen, wobei

Kohlendioxid als Referenzgas herangezogen wird und andere Treibhausgase, wie beispielsweise Methan oder Lachgas, über festgelegte Gewichtungsfaktoren in eine wirkungsäquivalente Menge CO₂ umgerechnet werden (Haist und Müller, 2012).

Laut den *Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen für Beton* (Becke, Reiners und Tuan Phan, 2020), die von der InformationsZentrum Beton GmbH herausgegeben wurden, steigt das GWP mit zunehmender Druckfestigkeit des Betons. Beton der Festigkeitsklasse C50/60 hat bei üblichen Mischrezepturen demnach in etwa ein 1,5-faches GWP im Vergleich zu Beton der Klasse C25/30 (vgl. Tabelle 1.1). Dies ist in der Regel auf den höheren Zementanteil, der zum Erreichen höherer Betondruckfestigkeiten erforderlich ist, zurückzuführen. Durch Anpassung der Mischrezeptur kann das GWP jedoch maßgeblich beeinflusst werden, wie die bereits erwähnte Versuchsreihe zu Betonen mit reduziertem Zementgehalt von Proske et al. (2012) zeigt. Der Rückschluss, dass die Wahl eines Betons höherer Festigkeit automatisch eine schlechtere Umweltbilanz für das damit hergestellte Bauteil bedeutet, wird aber durch eine Studie von Purnell und Black (2012) zur CO₂-Bilanz von Betonen verschiedener Druckfestigkeitsklassen mit unterschiedlichen Mischverhältnissen dementiert. Diese berücksichtigt, dass zur Abtragung einer festgelegten Last, bei Verwendung eines Betons höherer Festigkeit in Summe weniger Material erforderlich ist als beim Einsatz eines niederfesten Betons. Bei Betrachtung der CO₂-Bilanz in Relation zur Druckfestigkeit weisen laut dieser Studie hochfeste Betone mit Druckfestigkeiten im Bereich von 50-70 MPa gegenüber normal- und ultrahochfesten Betonen günstigere Bilanzen auf. Unter diesem Gesichtspunkt erweist sich die Anwendung von Textilbeton als vorteilhaft, da der hierfür erforderliche Feinbeton üblicherweise in Druckfestigkeitsklassen derselben Größenordnung liegt (Scheerer, 2015).

Purnell und Black (2012) untersuchten darüber hinaus den Einfluss der partiellen Substitution von Zement durch Flugasche und der Verwendung eines Hochleistungsfließmittels auf die CO₂-Bilanz des Betons und kamen zu dem Ergebnis, dass beides positive Auswirkungen auf die Bilanz hat. Die Zugabe von 1 M-% Hochleistungsfließmittel ermöglicht eine Einsparung von etwa 26% eCO₂², die Substitution von 40% Zement durch Flugasche etwa 35%. Unter Berücksichtigung der inerten Eigenschaften der Textilbewehrung, die eine umfänglichere Substitution von Zement durch andere Zusatzmittel erlauben, ist demnach von weiteren positiven Aspekten auf die Ökobilanz auszugehen.

Der direkte Vergleich des Treibhauspotenzials der unterschiedlichen Baustoffe in Tabelle 1.1 zeigt aber auch, dass die Produktion von Textilbewehrung wesentlich höhere Umweltauswirkungen als jene von Stahlbewehrung hat. Carbonfaserverstärkte Bewehrungselemente (CFRP - Carbon Fibre Reinforced Polymer) sind dabei im Vergleich zu Elementen aus Glas (GFRP) oder Basalt (BFRP) am umweltschädlichsten. Übliche Textilbewehrungselemente bestehen zu etwa 55% aus Fasern und 45% aus Matrixmaterial (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020) wie etwa Epoxidharz, Acrylat-Dispersion, Styrol-Butadien-Kautschuk oder Vinylesterharz (Reichenbach et al., 2021). Das hohe GWP der CFRP-Elemente ist in der energieintensiven Produktion der Carbonfasern selbst begründet. Carbonfasern werden in der Regel aus Polyacrylnitril-Fasern (PAN) hergestellt, welche aus Rohöl gewonnen und unter sehr hohen Temperaturen zu Carbonfasern weiterverarbeitet werden (Hohmann, 2018). Die finale Verarbeitung zu Textilbewehrung durch weben, stricken oder sticken, ebenso wie die Verarbeitung zu Bewehrungsstäben durch Pultrusion trägt vernachlässigbar wenig zum Treibhauspotenzial des fertigen Produkts bei (Stoiber, Kromoser und

²Embodied carbon dioxide: CO₂, das während des Herstellungs- und Entsorgungsprozesses anfällt (Purnell und Black, 2012)

Hammerl, 2020). Zur Umweltbilanz von Textilbewehrungselementen aus Glasfasern sind in der Literatur keine fundierten Werte zu finden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die Produktion von Glasfasern weniger energieaufwändig ist. Nach Hill und Norton (2018) beträgt das GWP, das bei der Produktion von Glasfasern anfällt in etwa ein Zehntel des GWPs zur Produktion von Carbonfasern. Preinstorfer et al. (2022) geben an, dass das GWP von GFRP-Bewehrungsstäben in etwa ein Sechstel des GWPs von CFRP-Stäben beträgt. Aufgrund ihrer höheren Steifigkeit und der damit verbundenen Reduktion von Bauwerksverformungen, sowie den generell besseren mechanischen Eigenschaften und der höheren Dauerhaftigkeit werden jedoch Carbonfasern sehr häufig eingesetzt (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020).

Baustoff	Einheit	GWP [kgCO ₂ -Äq.]	Quelle
Beton C25/30	m ³	197	Becke, Reiners und Tuan Phan, 2020
Beton C50/60	m ³	300	Becke, Reiners und Tuan Phan, 2020
CFRP-Textil	kg	18.4	Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020
CFRP-Stab	kg	19.7	Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020
GFRP-Stab	kg	3.1	Preinstorfer et al., 2022
Bewehrungsstahl	kg	2.03	ARC - The Australian Reinforcing Company, 2016

Tab. 1.1: Vergleich des Treibhauspotenzials (GWP) von Beton, faserverstärkten Bewehrungselementen und Bewehrungsstahl

Bewehrungsstahl wird durch zwei verschiedene Verfahren hergestellt. Beim Sauerstoffverfahren (BOS³) wird zunächst Roheisen im Hochofen gebrannt und in einem weiteren Schritt unter Zugabe von Schrott zu Stahl geschmolzen. Im Elektrolichtbogenofen (EAF⁴) hingegen wird ausschließlich Schrott zu Stahl geschmolzen (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020). Zweites Verfahren hat eine entsprechend günstigere Umweltbilanz. Im Jahr 2021 wurden 70.8% des weltweit produzierten Stahls über das Sauerstoffverfahren hergestellt, in Österreich waren es über 90% (*World Steel in Figures 2021*). Trotzdem sind mehr Umweltbilanzdaten zu Stahl aus EAF-Produktion in der Literatur zu finden (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020). Der mit einem GWP von 2.03 kgCO₂/kg bilanzierte Stahl der Australian Reinforcing Company (ARC) (2016) repräsentiert einen Mix aus BOS- und EAF-produzierten Stählen. Die exakten Mengenverhältnisse, die der Bilanzierung zugrundegelegt wurden, sind jedoch nicht bekannt. Es ist anzunehmen, dass das GWP für reinen BOS-Stahl höher ist (vgl. Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020).

Bei reiner Betrachtung des GWPs von Stahl und FRP-Bewehrung erscheint der Einsatz von Textilbewehrung keinen ökologischen Vorteil zu bieten. Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die in Tabelle 1.1 angeführten Werte sich auf 1 kg des jeweiligen Baustoffes beziehen und Textilbewehrung eine deutlich geringere Dichte als Stahlbewehrung aufweist⁵. Darüber hinaus wird aufgrund der hohen Leistungsfähigkeit in Summe weniger Masse an Textilbewehrung benötigt. Von großer Bedeutung ist zudem das Potenzial zur Einsparung von Beton bei der Verwendung textiler Bewehrungselemente. Zur Bewertung, ob für ein gegebenes Projekt der Einsatz von Textilbe-

³Basic oxygen steelmaking (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020)

⁴Electric air furnace (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020)

⁵CFRP: 1500 kg/m³ (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020), Stahl: 7850 kg/m³

ton in Summe ökologisch günstiger ist, ist daher eine Betrachtung des Gesamtsystems erforderlich.

Preinstorfer et al. (2022) vergleichen die Anwendung verschiedener FRP-Bewehrungselemente mit Stahlbewehrung für eine Bahnsteigkante, eine Stützmauer und eine Brücke in Bezug auf deren Kosten und Treibhauspotenzial und folgern, dass bei einer „Cradle-to-gate⁶“-Betrachtung, FRP-bewehrte Strukturen ähnliche bis leicht günstigere GWP-Ergebnisse erzielen als die stahlbewehrten Varianten. Der ökologische Vorteil wird in den untersuchten Anwendungsfällen jedoch von höheren Produktionskosten begleitet. In Summe hat die Größe des Bauwerks starken Einfluss auf die ökologische und ökonomische Konkurrenzfähigkeit FRP-bewehrter Elemente bei Errichtung des Tragwerks. In der „Cradle-to-gate“-Bewertung wird jedoch die Dauerhaftigkeit der Konstruktionen nicht berücksichtigt. Aufgrund der guten Korrosionsbeständigkeit von FRP-Bewehrungen wird davon ausgegangen, dass für FRP-bewehrte Betonbauwerke in der Regel deutlich geringere Erhaltungskosten anfallen, was über den gesamten Lebenszyklus betrachtet auch einen ökonomischen und ökologischen Vorteil gegenüber konventionellen Stahlbetonbauwerken bedeutet. Cadenazzi et al. (2020) zum Beispiel unternahmen eine Lebenszykluskostenanalyse von Brücken und berichten von günstigen Ergebnissen bezüglich Umweltauswirkungen und ökonomischen Aspekten bei der Verwendung von CFRP-Bewehrung im Vergleich zu Stahlbewehrung. Auch Grace et al. (2012) kommen zu dem Ergebnis, dass CFRP-bewehrte Autobahnbrücken bei einer gesamtheitlichen Lebenszyklusbetrachtung kosteneffektiver als jene mit Stahlbewehrung sind (Stoiber, Kromoser und Hammerl, 2020).

Fest steht, dass Textilbeton Stahlbeton nicht in allen Bereichen restlos ersetzen kann. Eine reine Übersetzung von Stahlbetonquerschnitten in textilbewehrte Querschnitte ist zudem nicht zielführend (Curbach und Jesse, 2009), da ansonsten die guten Materialeigenschaften in der Regel nicht ausgenutzt werden können. Beim Entwurf und der Bemessung von Textilbetonbauteilen sollte daher ein anderer, strukturoptimierter Ansatz verfolgt werden, der von den altbekannten Designs abweicht. Im Infrastrukturbereich weisen FRP-Bewehrungselemente ein sehr großes Anwendungspotenzial aufgrund ihrer hohen Dauerhaftigkeit auf.

1.5 Aufgabenstellung und Ziel

Mit dem Ziel, die positiven Aspekte von Textilbewehrungen in einem strukturoptimierten Tragwerk zu nutzen, wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit das Skelett eines Kofferfisches als bionisches Vorbild herangezogen. Zu diesem Zweck wurde das Skelett eines solchen Fisches präpariert und mittels Micro-CT-Scan ein digitales 3D-Modell erstellt. Die Analyse des Skelettaufbaus erfolgt zunächst visuell anhand des Präparats und anschließend detaillierter anhand des digitalen 3D-Modells, das einen tieferen Einblick in die Struktur des Skeletts ermöglicht. Das Skelett des Kofferfisches besteht in seiner Zusammensetzung aus vorwiegend hexagonalen Platten, die an der Unterseite durch jeweils vom Plattenzentrum zu den Ecken verlaufende Rippen verstärkt sind. Ziel ist es, den belastungsoptimierten Aufbau des Skeletts in eine möglichst schlanke Tragstruktur zu übersetzen, sodass die Menge an erforderlichem Material, insbesondere an Beton, zu dessen Herstellung eine besonders große Menge an Energie und Treibhausgasemissionen benötigt wird, im Vergleich zu herkömmlichen Konstruktionen aus Stahlbeton reduziert werden kann. Der Einsatz textiler Bewehrungselemente ermöglicht dabei die Reduktion der Betonquerschnittsabmessungen, da Textilbewehrung eine hohe Korrosionsbeständigkeit aufweist und somit die erforderliche

⁶„Von der Wiege bis zum Werkstor.“ Bei diesem Bilanzierungsverfahren werden alle Prozesse, die zur Herstellung eines fertigen Produktes erforderlich sind, wie zum Beispiel der Abbau von Rohstoffen, Transportketten und Produktionsverfahren, berücksichtigt.

1.5 Aufgabenstellung und Ziel

Betondeckung auf wenige Millimeter beschränkt werden kann. Die einzelnen Platten-Module können gegebenenfalls im 3D-Druckverfahren hergestellt werden. Die vorgefertigten hexagonalen Platten sollen später auf der Baustelle zu einem vollständigen Tragwerk zusammengesetzt werden können und im Idealfall auch wieder leicht rückzubauen sein. Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die Modellfindung einer einzelnen solchen Platte. Im Rahmen einer statischen Berechnung werden unterschiedliche Einflussparameter auf die Schnittgrößen- und Spannungsverteilung, sowie das Steifigkeitsverhalten der Platte untersucht.

Kapitel 2

Bionik

2.1 Begriffsklärung

Der Begriff „Bionik“ leitet sich aus dem englischen „bionics¹“ ab. Auch wenn der Begriff fälschlicherweise häufig als Kompositum aus den Wörtern *BIOlogie* und *TechNIK* verstanden wird, so trifft diese Beschreibung die Essenz der Bionik recht gut (Nachtigall und Pohl, 2013). Im Allgemeinen handelt es sich bei der Bionik um eine Methode, bei der anhand von natürlichen Vorbildern Lösungen für technische Fragestellungen abgeleitet werden. Dabei soll die Natur jedoch keinesfalls blind kopiert werden. Im Vordergrund der bionischen Herangehensweise steht vielmehr das Verständnis gewisser Funktionsprinzipien, die in der Natur vorzufinden sind, und im weiteren Schritt deren Abstraktion und Anwendung auf eine technisch realisierbare Weise (Nachtigall, 2010).

Verschiedene Bioniker haben versucht, mehr oder minder eindeutige Definitionen für den Begriff der Bionik zu formulieren. Der Zoologe Werner Nachtigall, einer der bedeutendsten Bioniker im deutschsprachigen Raum, beschreibt die Bionik kurzgefasst als „*Lernen von der Natur für eigenständiges ingenieurmäßiges Gestalten*“ (Nachtigall, 2010, S. 144). Diese Formulierung ist recht vage gehalten. Hansen (1999, zit. n. Nachtigall, 2010, S. 146) geht einen Schritt weiter und definiert die Bionik poetisch als „*die Entschlüsselung von ‚Erfindungen der belebten Natur‘ und ihre technische Umsetzung*“. In dieser Formulierung sind bereits zwei Schritte angedeutet, welche für die Realisierung eines bionischen Produktes erforderlich sind: die „Entschlüsselung“, bzw. anders gesagt die Erkenntnis und das Verständnis gewisser natürlicher Prinzipien, sowie deren anschließende Umsetzung in die Technik.

Eine weitere, aber sehr eng gefasste Definition liefert der Verein Deutscher Ingenieure (VDI), dessen Mitglieder (zu welchen auch Nachtigall zählt) sich bei einer Tagung 1993 auf folgende Formulierung einigten: „*Bionik als Wissenschaftsdisziplin befasst sich systematisch mit der technischen Umsetzung und der Anwendung von Konstruktionen, Verfahren und Entwicklungsprinzipien biologischer Systeme.*“ (Neumann, 1993, zit. n. Nachtigall und Pohl, 2013, S. 5)

Die letztgenannte Definition ist Teil der vom VDI im Jahr 2021 herausgegebenen Richtlinie 6220 mit dem Titel „*Bionik – Grundlagen, Konzeption und Strategie*“, in welcher neben der Begriffsdefinition auch der bionische Entwicklungsprozess detailliert festgelegt wird. Mit dieser Richtlinie ist ein erstes Regelwerk für bionisches Arbeiten vorhanden, das es ermöglichen soll, bionische Entwicklungen klar von konventionellen abzugrenzen. Denn, so Nachtigall (2010, S.144f): „*Man braucht eine allgemein akzeptierte Definition [...] zur sinnvollen Abgrenzung einer*

¹Wissenschaft, die sich mit der Entwicklung künstlicher mechanischer Systeme beschäftigt, deren Funktionsweise jener von lebenden Organismen nachempfunden ist und die als Teile lebender Organismen (Prothesen) eingesetzt werden können

Wissenschaftsdisziplin ebenso wie zur Abwehr unsachlicher Trittbrettfahrer, für die der Bionikzug ganz besonders anfällig ist.“

2.2 Technische Biologie versus Bionik – Wo liegt der Unterschied?

Zur klareren Unterscheidung der einzelnen Aufgabenschritte bei der Entwicklung eines bionischen Produkts führt Nachtigall (2010) den Begriff der „technischen Biologie“ ein. Im Großen und Ganzen müssen bei der Entwicklung eines bionischen Produkts drei Phasen durchlaufen werden (vgl. Abb. 2.1): An oberster Stelle steht dabei die Naturforschung, welche laut Nachtigall (2010) Aufgabe der technischen Biologie ist. Hierbei werden natürlich vorkommende Systeme, Konstruktionen und Verfahren aus technischer Sicht untersucht und die daraus gezogenen Erkenntnisse in der Sprache der Physik und Ingenieurwissenschaften festgehalten. Die Naturforschung kann bereits mit dem Gedanken einer späteren Umsetzung der erforschten Prinzipien erfolgen, dies ist aber nicht zwangsweise notwendig.

Im zweiten Schritt wird ein aus der biologischen Analyse gewonnenes Grundprinzip, welches für die Lösung einer technischen Aufgabenstellung nützlich sein könnte, aufgegriffen und **abstrahiert** (Nachtigall, 2010). Wie bereits eingangs erwähnt sind reine Kopien der oft hoch komplexen natürlichen Konstruktionen technisch meist nicht oder nur schwer umsetzbar und definitiv nicht zielführend. Nachtigall und Pohl (2013, S. 4) formulierten den treffenden Satz: *„Die Natur liefert keine Blaupausen für die Technik“*. Es ist nicht das Ziel natürlich vorkommende Systeme eins zu eins nachzubauen. Der Schlüssel zum Erfolg liegt im Verständnis der grundlegenden Prinzipien natürlicher Vorbilder und der Entwicklung von Lösungen, die diese Prinzipien aufgreifen und auf eine technisch sinnvolle Art nutzen. Die Abstraktion ist ein wesentlicher Bestandteil des Weges zu einem gelungenen bionischen Produkt. Hilfreich ist dabei die Erstellung eines Modells als Brücke zwischen biologischem System und technischem Konstrukt. Das Modell erfüllt gleich zwei Aufgabenstellungen: Es ist das durch Abstraktion generierte **Abbild** der Natur und gleichzeitig **Vorbild** für die im Anschluss konkretisierte, technische Entwicklung (Nachtigall, 2010). Wichtig für die zielorientierte Modellfindung ist eine konkrete Fragestellung. Diese könnte beispielsweise lauten: Welche Spannungen entstehen in der Schale des Kofferfisches bei Belastung durch eine einheitliche Flächenlast? Nach welchem Prinzip verteilt sich die Spannung? Wie kann man das Prinzip für ein Plattentragwerk aus Beton anwenden? (Nachtigall, 2010, S. 80)

Im dritten Schritt erfolgt die technische Umsetzung durch den Ingenieur, welche Nachtigall (2010), S. vii als *„Bionik im eigentlichen Sinn“* bezeichnet. An dieser Stelle muss bereits ein konkretes Ziel formuliert sein, das es zu erfüllen gilt. Der Ingenieur hat ein Produkt im Kopf, welches er durch geeignete Kombination der im vorangegangenen Schritt abstrahierten Strukturen zum Funktionieren bringen möchte. Im Unterschied zum Biologen, welcher rein zum Zweck des Wissensgewinns forscht, betreibt der Ingenieur folglich praxisbezogene Wissenschaft (Nachtigall, 2010).

Als Zoologe, dessen Fachgebiet näher an der Biologie als an der Technik angesiedelt ist, unterstreicht Nachtigall (2010) immer wieder die Bedeutung der Vorarbeit, welche die technische Biologie zu liefern hat, bevor überhaupt mit Bionik im engeren Sinne begonnen werden kann. Er bezeichnet die technische Biologie dabei als eigenständige Forschungsdisziplin, die durchaus auch alleine stehen kann. Denn: *„Wo nichts erforscht wird, gibt es nichts zu übertragen.“* (Nachtigall, 2010, S. 198)

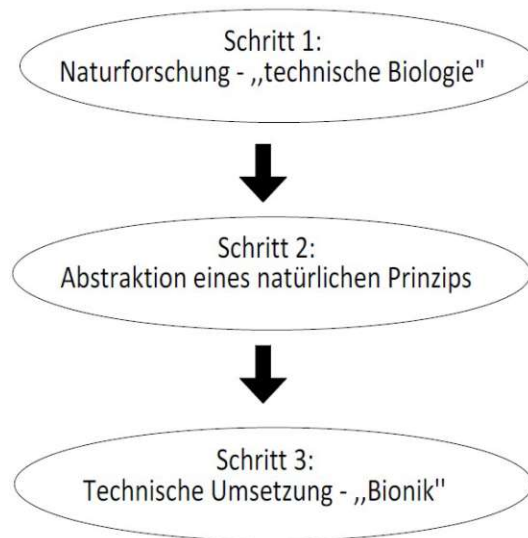


Abb. 2.1: Drei Schritte zur Entwicklung eines bionischen Produkts (nach Nachtigall, 2010, S. viii)

2.3 Methoden der Bionik

Im Wesentlichen werden zwei grundlegende Vorgangsweisen unterschieden, nach welchen ein bionisches Produkt entwickelt werden kann. Entweder man geht von einem bestimmten natürlich vorkommenden System aus und sucht in späterer Folge nach technischen Anwendungsmöglichkeiten dafür oder man startet mit einer konkreten technischen Problemstellung (beispielsweise der Suche nach einer möglichst materialsparenden Deckenkonstruktion aus Beton), für welche dann nach Vorbildern in der Natur gesucht wird (Knippers und T. Speck, 2019; Nachtigall und Pohl, 2013; Hashemi Farzaneh et al., 2016).

Die erstgenannte Methode wird als „Biology Push“, „Bottom-up“ (Knippers und T. Speck, 2019; Nachtigall und Pohl, 2013) oder „solution driven“ (Goel, Vattam, Helms et al., 2011) bezeichnet. Sie ist „lösungsorientiert“, in dem Sinne, dass die Natur bereits Lösungen für eine unendliche Vielzahl möglicher Anforderungen entwickelt hat. Im ersten Schritt geht es bei der Biology Push Methode darum, diese Lösungen zu erkennen und zu entschlüsseln. In diesem Fall arbeiten zunächst BiologInnen daran, die Funktionsweise einer natürlichen Erscheinung, bzw. das dahinter steckende Grundprinzip und die dafür notwendigen Strukturen zu verstehen. Anschließend wird in Kollaboration zwischen Biologen und Ingenieuren an einer Übersetzung dieses Systems in ein technisch herstellbares Produkt gearbeitet. Der entscheidende Punkt hierbei ist, wie bereits erwähnt, die Abstraktion. Es wird nicht nach einer naturgetreuen Kopie gesucht, – denn diese wäre in den meisten Fällen technisch und wirtschaftlich nicht sinnvoll herstellbar – sondern nach einem vom biologischen Vorbild losgelösten System. Zur Konzeptfindung werden oftmals computergestützte Simulationen heran gezogen, ehe im nächsten Schritt Prototypen hergestellt und tatsächlichen Versuchen unterzogen werden. Der Prozess kann langwierig sein und vieler Wiederholungen, Fehlerbehebungen und Optimierungen bedürfen bis ein fertiges, marktreifes Produkt entsteht (Knippers und T. Speck, 2019).

Geht hingegen eine konkrete technische Fragestellung der Suche nach Vorbildern aus der Natur voraus, so spricht man vom „Top-down“-Prozess oder „Technology Pull“ (Knippers und

T. Speck, 2019; Nachtigall und Pohl, 2013). Goel, Vattam, Helms et al. (2011) bezeichnen diese Vorgangsweise als „problem driven“. Das technische Problem steht im Vordergrund. Hierbei ist im ersten Schritt eine konkrete Fragestellung zu formulieren und es sind Anforderungen zu definieren, welche das gesuchte System zu erfüllen hat. Erst dann kann mit der Suche von Vorbildern in der Natur begonnen werden (Knippers und T. Speck, 2019). Wichtig ist, sich nicht auf eine fertige Komplettlösung zu versteifen. Goel, Vattam, Helms et al. (2011) bezeichnen die Zerlegung des Gesamtproblems in mehrere kleinere Teilprobleme als essentiellen Bestandteil bionischen Arbeitens. Auf diese Weise können auch mehrere unterschiedliche natürliche Vorbilder zur Erfüllung der einzelnen Teilaspekte herangezogen werden (Hashemi Farzaneh et al., 2016). Die Aufgabe des Ingenieurs besteht letztendlich darin, diese Strukturen in geeigneter Weise zu kombinieren, sodass das gesuchte technische System erzielt wird (Nachtigall, 2010). Sobald mögliche natürliche Vorbilder gefunden sind, erfolgt die weitere Vorgehensweise analog zu jener bei der Biology Push Methode. Es gilt auch hier wieder der Pfad: Verständnis des Systems, Abstraktion und anschließende Konzeptfindung für die technische Lösung (Knippers und T. Speck, 2019).

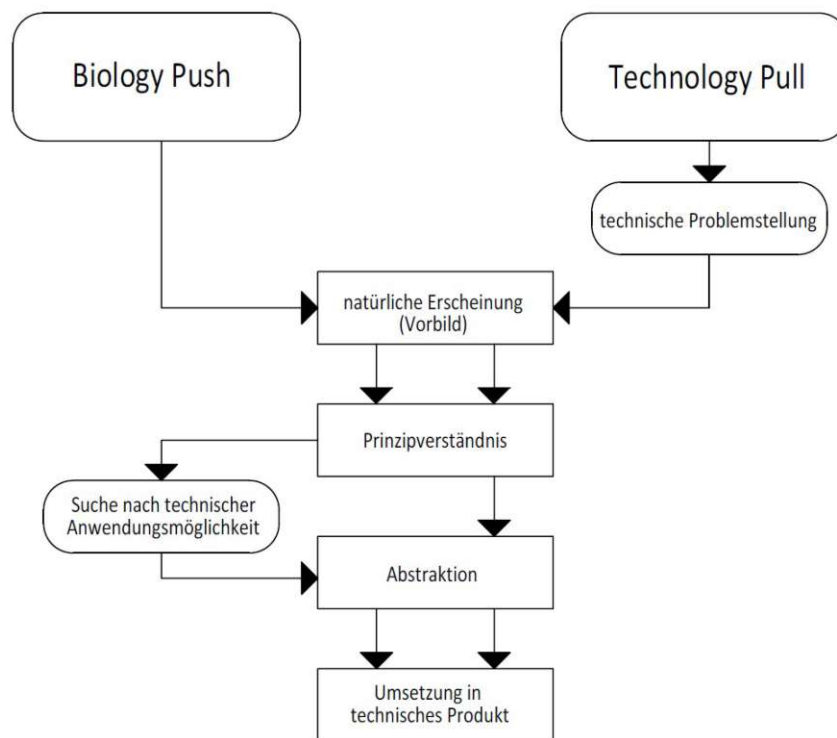


Abb. 2.2: Vorgangsweise bei der Erstellung eines bionischen Produkts: Biology Push (linker Pfad) und Technology Pull (rechter Pfad)

Die Vorgangsweise bei den beiden unterschiedlichen Methoden ist in Abbildung 2.2 illustriert. Die beiden Methoden besitzen unterschiedliche Vor- und Nachteile. Der Technology Pull Methode wird nachgesagt, sie sei tendenziell eher zur Optimierung bestehender technischer Systeme geeignet (Pohl et al., 2010) als zur Entwicklung komplett neuer Technologien. Eine Studie von Hashemi Farzaneh et al. (2016), bei welcher zwei Teams bestehend aus je zwei Biologie- und zwei MaschinenbaustudentInnen mit der Entwicklung eines bionischen Produkts betraut wurden, bestätigt dies. Das Team, welches nach der Technology Pull Methode arbeitete, formulierte zur Beschreibung der technischen Anforderungen eine Hand voll „KO-Kriterien“,

welche lt. Hashemi Farzaneh et al. zu sehr technischer Natur und zu konkret formuliert waren und folglich eher zur Auswahl annähernd fertiger Prototypen als zur Findung von biologischen Vorbildern geeignet wären. Die große Schwierigkeit liegt nicht zuletzt in der Interdisziplinarität der Aufgabe. Biologen und Techniker müssen es schaffen, ihre Fachgebiete zu verknüpfen und einander die Augen zu öffnen, um auf neue, innovative Ideen zu kommen. Ein nicht unwesentliches Hindernis ist dabei die Fachsprache, die im Fall von Biologie und Technik deutlich voneinander abweichen kann. Es wurden bereits einige Software-Programme entwickelt, die dabei helfen sollen, das interdisziplinäre Arbeiten zu erleichtern. Das Programm „KoMBi - communication model for bio-inspired design“ versucht beispielsweise, die eingegebenen Informationen auf eine Weise aufzubereiten, sodass sie für BiologInnen sowie TechnikerInnen gleichermaßen verständlich sind (Hashemi Farzaneh et al., 2016). Hier besteht jedoch zweifelsfrei noch Verbesserungspotenzial.

Die Biology Push Methode bietet lt. VDI (2012; zit. n. Hashemi Farzaneh et al., 2016) mehr Potenzial zur Entwicklung neuartiger Systeme, da die Natur nahezu unerschöpfliche Ideen liefern kann. Auch sind lt. Goel, Vattam, Wiltgen et al. (2014) bislang mehr erfolgreiche bionische Projekte nach der Biology Push Methode realisiert worden. Die Gefahr hierbei liegt jedoch in der frühzeitigen Versteifung auf ein einziges biologisches Vorbild, wodurch keine weiteren natürlichen Systeme als Inspirationsquelle genutzt werden (Helms, Vattam und Goel, 2009). Zudem nimmt die Biology Push Methode in den meisten Fällen wesentlich mehr Zeit in Anspruch als die Technology Pull Methode, da oft sehr viel Zeit vergeht, bis eine technische Anwendungsmöglichkeit für ein bereits erforschtes natürliches Prinzip gefunden wird (Pohl et al., 2010).

Eine große Herausforderung stellt in beiden Fällen die Kommunikation zwischen den Disziplinen dar. Dem Biologen fehlt es oftmals an technischem Hintergrundwissen, um überhaupt Ideen für die Anwendbarkeit der von ihm erforschten Naturphänomene zu haben, während der Techniker in der Regel nicht ausreichend Biologiekenntnisse besitzt um zielgerichtet nach einer Lösung für sein technisches Problem in der Natur zu suchen (Kooistra und Pohl, 2015). Um dieser Schwierigkeit Abhilfe zu verschaffen, haben Pohl et al. (2010) den Begriff „Pool Research“ etabliert. Er beschreibt die Sammlung von Wissen über biologische Prinzipien, sowie gegebenenfalls eine Gegenüberstellung (z.B. in tabellarischer Form) von technischen und biologischen Funktionen (Nachtigall und Pohl, 2013). Basis ist dabei die biologische Grundlagenforschung per se. Diese steht als Disziplin für sich alleine und bedarf a priori keines direkten Umsetzungsziels in ein technisches System (Nachtigall, 2010). Auf diese Weise kann eine Art „Baukasten“ (Nachtigall und Pohl, 2013) zusammengetragen werden, aus dem sowohl Techniker auf der Suche nach natürlichen Vorbildern im Technology Pull Prozess als auch Biologen auf der Suche nach technischen Anwendungsmöglichkeiten für ihre Forschungsergebnisse schöpfen können (Pohl et al., 2010).

In den meisten Fällen ist die Entwicklung eines bionischen Produkts ein hoch iterativer Prozess, in dem Problemstellung und Lösungsansatz einander gegenseitig beeinflussen. Goel, Vattam, Helms et al. (2011) verwenden den Begriff der „Co-Evolution“ von Problem und Lösung: Im Rahmen der Untersuchungen werden laufend neue Erkenntnisse gewonnen, die eine Anpassung der Fragestellung und somit auch der Lösung erfordern. Ein anschauliches Beispiel lieferte eine Gruppe StudentInnen, die sich den Mechanismus der Knallerzeugung des Pistolenkrebses zum Vorbild für die Entwicklung eines Systems zur Vermeidung von Haiangriffen in Küstengebieten nahm. Die ursprüngliche Idee lag darin, die Haie durch ein Geräusch-erzeugendes Gerät anzulocken und so vom Menschen fern zu halten. Es stellte sich jedoch heraus, dass die Dauerhaftigkeit eines derartigen Konstrukts eher begrenzt ist, denn „[...] *one must prevent shark attacks with a design that doesn't get eaten by sharks*“ (Goel, Vattam, Helms et al., 2011, S. 73). Somit schwenkte die Gruppe um zur Suche nach einem Hai-abweisenden anstatt eines Hai-anziehenden

Systems. Das Beispiel verdeutlicht, dass die bionische Vorgehensweise nicht linear erfolgt, wie die Darstellung in Abbildung 2.2 nahelegt, sondern von zahlreichen Iterationen geprägt sein kann und auch nicht immer zum Erfolg führen muss. Es existiert kein eindeutiges „Kochrezept“, keine „Blaupausen“ (Nachtigall und Pohl, 2013) in der Natur, die einfach zu kopieren wären. Vieles muss über Versuch und Irrtum erforscht werden. Früher geschah dies mit aufwendigen, (aber dafür anschaulichen), händisch erstellten Versuchsmodellen. Heute erlaubt der technisch Fortschritt viel Zeitersparnis durch digitale Simulationen (Schäfer, Briegert und Menzel, 2005).

Da die Bionik eine verhältnismäßig junge Wissenschaft ist, existieren bislang nur wenige Anhaltspunkte, wie die bionische Arbeitsweise möglichst effizient gestaltet werden kann. Viele Entscheidungen werden ad hoc ohne systematischen Zugang getroffen (Goel, Vattam, Helms et al., 2011). Studien wie jene von Goel, Vattam, Helms et al. (2011, 2014), Hashemi Farzaneh et al. (2016) und Helms, Vattam und Goel (2009) tragen aber zum Verständnis des bionischen Arbeitsprozesses und in weiterer Folge zu dessen Systematisierung bei.

2.4 Bionische Disziplinen

Die Bionik umfasst ein weites Gebiet von Anwendungsbereichen, das sich nicht allein auf die Entwicklung von Bauelementen beschränkt. Wie in Abbildung 2.3 ersichtlich ist, sind die einzelnen Teilgebiete drei Grunddisziplinen zuzuordnen: Der Konstruktionsbionik, welche sich mit der Erforschung von neuartigen Materialien, Werkstoffen, sowie Prothetik und Robotik beschäftigt, der Verfahrensbionik, zu welcher neben Klima, Energie, Sensorik, Kinematik und Dynamik auch das Bauwesen (als Überbegriff für Architektur und Bauingenieurwesen) gehört, und an dritter Stelle der Entwicklungsbionik (Nachtigall, 2008), welche von Küppers (2001) auch als „Informationsbionik“ bezeichnet wird. Letztere umfasst die Gebiete der Neuro-, Evolutions-, Prozess- und Organisationsbionik.

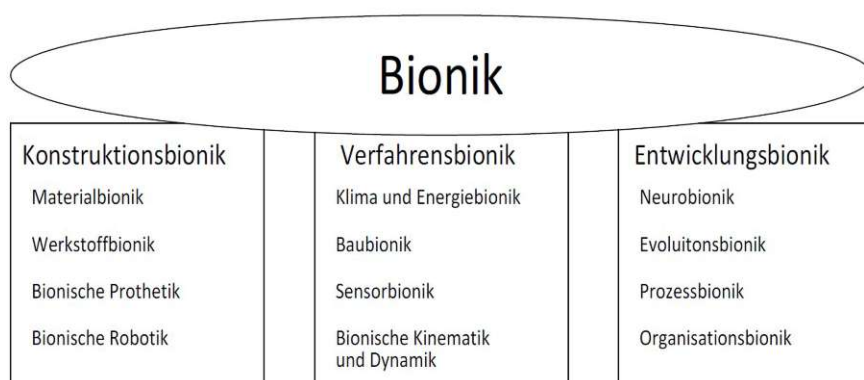


Abb. 2.3: Bionische Grunddisziplinen und deren Teilgebiete (nach Nachtigall, 2008)

Auch wenn die Baubionik damit eindeutig in die Wissenschaft der Bionik eingeordnet ist, ist anzumerken, dass Bauwerke stets hoch komplex in ihrer Entwicklung und Herstellung sind. Folgt man der Definition des VDI, laut der ein Produkt erst dann als „bionisch“ bezeichnet werden kann, wenn bei seiner Entwicklung die Schritte (Nachtigall und Pohl, 2013, S. 29):

1. Biologisches Vorbild,
2. Abstraktion vom biologischen Vorbild,

3. Anwendung der Abstraktion,

eingehalten wurden, so gilt vermutlich kein Bauwerk als „vollständig bionisch“. Nachtigall und Pohl (2013) beschreiben Bauwerke nach dem Grad der Natur-Inspiration, Abstraktion und technischen Umsetzung als „Natur-ähnlich“, „Natur-analog“ oder „Natur-integrativ“. Bei „natur-ähnlichen“ Bauwerken beschränkt sich die Inspiration aus der Natur meist lediglich auf optische Ähnlichkeiten. Derartige Bauten sind oft auffallend in ihrer Form, wirken skulpturartig und „anders“ als das übliche rechteckige Haus mit Flachdach. Dementsprechend sind sie ein beliebtes Stilmittel in der Architektur.

Die Bezeichnung „natur-analog“ beruht auf dem Gedanken des Architekten Frei Otto, dass Analogien zwischen Bauwerken und der Natur auch ohne die direkte Beabsichtigung die Natur als Vorbild für die Konstruktion heranzuziehen, auftreten können (Nachtigall und Pohl, 2013). Frei Otto beschäftigte sich intensiv mit dem Studium von Leichtbauten und natürlicher Formgebung. Zu seinen berühmtesten Schöpfungen zählen das Olympiastadion in München sowie der deutsche Pavillon auf der Weltausstellung in Montreal. Beide bestehen aus filigranen, spinnennetzartigen Seilkonstruktionen. Frei Otto bestand jedoch darauf, nicht Bionik betrieben zu haben, sondern zuerst das Netztragwerk entwickelt und aufbauend darauf das Spinnennetz verstehen gelernt zu haben (Küppers, 2001). Demnach ist es wohl möglich, gewisse Gesetzgebungen, die für die belebte Natur gelten, auch in Baukonstruktionen wieder zu finden, ohne dass diese explizit aus der Natur übertragen wurden (Nachtigall und Pohl, 2013).

Die dritte Gruppe, die „natur-integrativen“ Bauwerke, kommt der bionischen Herangehensweise am nächsten. Hierbei werden natürliche Grundprinzipien als wesentliche Bestandteile in die Architektur integriert. Häufig ist dabei der reale Kraftfluss im Tragwerk durch die architektonische Gestaltung direkt erkennbar (Nachtigall und Pohl, 2013). Derartige Strukturen finden besonders guten Anklang beim menschlichen Auge, weil sie „Sinn ergeben“. Der Biologe Bernd Löttsch, formulierte die Sehnsucht des Menschen nach „sinnhaften“ Konstruktionen in folgendem treffenden Satz:

„Gestalten, welche die Wirkung formender Kräfte und Gesetze verraten, erzeugen in ihm [dem Menschen] höchstes Wohlgefallen — sei es die ablesbare Statik von Pflanzenkörpern, eleganten Brücken oder Kathedralen, die ablesbaren Stromlinien von Fischen und Schiffen, Vögeln und Flugzeugen, seien es die Erosionsformen von Gebirgen, sei es — als Extremfall — auch das ablesbare Gesetz streng symmetrischer und geometrischer Gebilde.“ (Löttsch, 1998, S. 370)

2.5 Bionik und Nachhaltigkeit

Die Bionik wird von von Gleich (2007) als Wissenschaft mit besonderem, emotionalem Gehalt beschrieben, was nicht unwesentlich zu ihrer Verbreitung beiträgt. Der Mensch ist vielfach fasziniert von den vielfältigen, sehr individuellen natürlichen Systemen, die durch Jahrtausende der Evolution erprobt und angepasst wurden (Wienecke-Janz et al., 2008). Unter dem Gesichtspunkt der evolutiven Optimierung wird biologischen Lösungen häufig besonders hohe Qualität, nicht zuletzt bezüglich ihrer Nachhaltigkeit, zugeschrieben (von Gleich, 2007). Zu voreilig wird diese Erwartungshaltung auch auf bionische Entwicklungen unter dem Begriff des „bionischen Versprechens“ übertragen. Die Annahme, ein Produkt sei automatisch nachhaltig, wenn es einem natürlichen Vorbild entstammt, ist jedoch ein grober Irrtum. Der entscheidende Schritt der Abstraktion, der die technische Lösung vom natürlichen Vorbild trennt, hat maßgeblichen Einfluss darauf, in welchem Grad Eigenschaften, wie beispielsweise die ökologische Nachhaltigkeit, vom natürlichen

Vorbild übernommen werden können. Ein besonders anschauliches Beispiel ist die Entwicklung des Flugzeuges, dessen für den Auftrieb notwendige Form von jener des Vogelflügels abgeleitet wurde. Anders als beim Vogel, welcher sich mit eigener Muskelkraft in die Lüfte schwingen kann, werden zum Antrieb des Flugzeugs große Mengen umweltschädlichen Treibstoffs benötigt. Als nachhaltig kann diese Lösung zweifelsfrei nicht bezeichnet werden (Wienecke-Janz et al., 2008).

Die Beurteilung ob ein bionisches Produkt auch nachhaltig ist, hat demnach für jedes Produkt individuell zu erfolgen. Hierbei stellt sich zunächst die Frage, wie Nachhaltigkeit überhaupt zu definieren ist. Im Brundtland-Bericht 1987 wurde folgende international anerkannte Definition festgelegt: „*Nachhaltige Entwicklung ist Entwicklung, die die Bedürfnisse der Gegenwart befriedigt, ohne zu riskieren, dass künftige Generationen ihre eigenen Bedürfnisse nicht befriedigen können.*“ (deutsche Übersetzung zit. n. O. Speck et al., 2019, S. 182) Nachhaltige Entwicklungen sind folglich zukunftsorientiert, wobei das menschliche Überleben von zentraler Bedeutung ist. Die Evolution agiert hingegen „zukunftsblind“. Tier- und Pflanzenarten, die sich nicht ausreichend an die wechselnden Umgebungsbedingungen anpassen, sterben aus (Bertling, 2020). In diesem Sinne können biologische Systeme nicht a priori als nachhaltig bezeichnet werden, ebenso wenig wie deren abgewandelte bionische Nachfahren (O. Speck et al., 2019).

Ein ebenso weit verbreiteter Irrtum ist die Gleichsetzung der Begriffe „Nachhaltigkeit“ und „Umweltfreundlichkeit“. Eine vollständig nachhaltige Lösung darf sich nicht allein auf ökologische Verträglichkeit beschränken, sondern hat weiters neben wirtschaftlichen auch soziale Faktoren zu berücksichtigen. O. Speck et al. (2019) nennen Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt als die drei Dimensionen der Nachhaltigkeit. Im Rahmen von Nachhaltigkeitsanalysen (beispielsweise Lebenszyklusanalysen) werden die Auswirkungen eines Produkts auf diese drei Bereiche abgewogen. Eine große Herausforderung ist dabei die Bewertung gesellschaftlicher Kriterien, da diese in den meisten Fällen schwer quantifizierbar sind (O. Speck et al., 2019). Im Rahmen der Förderungsmaßnahme „*BIONA*“ – *Bionische Innovationen für nachhaltige Produkte und Technologien* wurden 34 bionische Projekte in einem vierstufigen Prozess bezüglich deren Nachhaltigkeitsaspekten analysiert. Dabei wurden unter anderem Kriterien wie die nachhaltige Entwicklung des Sach-, Human- und Wissenskapitals und die Erhaltung des kulturellen Erbes und der kulturellen Vielfalt neben der nachhaltigen Nutzung erneuerbarer sowie nicht erneuerbarer Ressourcen betrachtet. Die Projektakteure vermerkten vermehrt Schwierigkeiten bei der Beurteilung kultureller und gesellschaftlicher Fragestellungen aus biologischer und technischer Sicht (Bertling, 2020). Um umfassende Nachhaltigkeitskriterien zukünftig in wirtschaftliche und politische Entscheidungen einfließen lassen zu können, bedarf es einer besseren Strategie zur Bewertung dieser Kriterien, die letztlich eine Vergleichbarkeit unterschiedlicher Lösungen ermöglicht (O. Speck et al., 2019).

O. Speck et al. (2019) beschreiben in weiterer Folge drei wesentliche Strategien für nachhaltige Entwicklungen:

1. **Effizienz:** Ziel ist die Verbesserung der Ressourcennutzung. Material- und Energieaufwände sind bestmöglich einzusetzen, sodass Verschwendungen vermieden werden. Die Menschheit hat sich bis dato an eine verschwenderische Nutzung von Ressourcen aller Art gewöhnt. Stahlbewehrungen werden einzig zum Zweck des Korrosionsschutzes zentimeterdick in Betonüberdeckungen gebettet, die statisch nicht erforderlich wären, Gebäude werden unter hohem Energieaufwand künstlich gekühlt und geheizt, wobei wesentlich effizientere Bauweisen wie beispielsweise nach dem Vorbild des Termitenhügels eine nahezu gänzlich passive Raumklimatisierung ermöglichen würden. Eine effizientere Nutzung dieser Ressourcen würde keine Verschlechterung des Ergebnisses bedeuten, sondern einen geringeren Verbrauch bei

gleichbleibender Qualität. Eine Gefahr besteht jedoch im sogenannten „Rebound“-Effekt. Die effizientere Nutzung einer Sache führt gegebenenfalls zu noch intensiverer Nutzung und damit wiederum zu erhöhtem Verbrauch der dafür benötigten Ressourcen. Dies gilt es bewusst zu vermeiden durch Anwendung der anderen beiden Nachhaltigkeitsstrategien (O. Speck et al., 2019).

2. **Konsistenz:** Hiermit bezeichnen O. Speck et al. (2019) die Umstellung von umweltschädlichen auf alternative Lösungen wie beispielsweise die Nutzung von Solarenergie anstelle fossiler Energieträger. Auch in diesem Fall bleibt die Qualität des Endresultats erhalten. Derartige Strategien werden daher gesellschaftlich schnell akzeptiert. Anders verhält es sich mit der dritten Strategie:
3. **Suffizienz:** Die freiwillige Reduktion des Verbrauchs erfordert persönliche Umstellungen im privaten Umfeld, die mitunter eine empfundene Verschlechterung des ursprünglichen Zustands bewirken. Beispielsweise ist mit geringerem Wohnkomfort zu rechnen, wenn im Winter weniger geheizt wird. Maßnahmen der Suffizienz werden daher schwerer akzeptiert.

Auch wenn sie keine direkten Kopievorlagen für nach dem menschlichen Sinne „nachhaltige“ Lösungen bieten (O. Speck et al., 2019), so können natürliche Systeme trotzdem hilfreiche Anregungen für nachhaltiges Produktdesign, insbesondere bezüglich Effizienz und Konsistenz, liefern. Folgende häufig auftretenden, natürlichen Prinzipien besitzen Vorbildcharakter für nachhaltige technische Lösungen (Nachtigall, 2010; Bertling, 2020; Wienecke-Janž et al., 2008; O. Speck et al., 2019; von Gleich, 2007):

- **Solare Energienutzung:** Sonnenenergie ist nahezu überall verfügbar und ihre Nutzung ist deutlich umweltfreundlicher als die Verbrennung fossiler Rohstoffe zur Energiegewinnung.
- **Opportunismus:** Nutzung lokal vorhandener Ressourcen. Durch die globale Wirtschaft und internationale Handelsrouten werden vielfach Rohstoffe unter hohem Energieaufwand über weite Strecken transportiert, bis sie beim Endverbraucher ankommen. In der Natur gibt es keinen Lieferanten, der kilometerweit entfernte Ressourcen greifbar macht. Stattdessen wird genutzt, was in Reichweite ist: Termiten bauen ihre Hügel aus dem umliegenden Lehm und Speichel, Vögel bauen ihre Nester aus Ästen des umgebungsnahen Waldes, Clownfische nutzen die im Korallenriff beheimateten Seeanemonen als Kinderstube.
- **Kreislaufwirtschaft:** Ein hervorstechendes ökologisches Problem ist die übermäßige Abfallproduktion. Berge von Schrott sowie ganze schwimmende Inseln aus Plastik sind Zeugen der katastrophalen menschlichen Abfallwirtschaft. In der Natur entsteht kein Abfall in dem Sinne. Alles wird wiederverwertet, totale Rezyklierung ist das Stichwort (Nachtigall, 2010).
- **Mehrdimensionale Optimierung:** In technischen Entwicklungsprozessen wird zumeist ein einzelnes Element auf eine einzelne Funktion optimiert. Sinnvoller ist jedoch die Optimierung ganzheitlicher Systeme, wie dies in der Natur geschieht, gegebenenfalls unter Verzicht der Optimierung von Einzelelementen. (Nachtigall, 2010).
- **Modularität und Multifunktionalität:** Bienenwabe, Kofferfischskelett, Seeigel – Die modulare Anordnung ähnlicher (in den hier genannten Beispielen polygonaler) Elemente erlaubt eine individuelle Formgebung des Gesamtsystems. Der Panzer des Kofferfisches bietet diesem nicht nur Schutz vor Fressfeinden, sondern sorgt durch seine spezielle, aerodynamische Form zusätzlich für eine erhöhte Manövrierfähigkeit des Tieres (Van Wassenbergh et al., 2014).

- Adaptivität, Resilienz und Selbstheilung: Zumeist wird versucht die äußeren Randbedingungen technischer Systeme konstant zu halten, um deren störungsfreie Funktion sicher zu stellen. Dies ist jedoch in den meisten Fällen schwierig und fehleranfällig. Natürliche Systeme besitzen die Fähigkeit, sich an wechselnde Umgebungsbedingungen anzupassen und im Fall geringfügiger Störungen ohne große Folgeschäden weiter zu funktionieren (Bertling, 2020). Wienecke-Janzen et al. (2008) sprechen in diesem Fall von dynamischer Stabilität.

Nachtigall (2010, S. 174) beschreibt diese und weitere Prinzipien überspitzt als „zehn Gebote bionisch-funktionellen Designs“. Gewiss liefern diese kein Kochrezept für ein nachhaltiges, bionisches Produkt. Doch die Berücksichtigung der genannten natürlichen Erfolgsstrategien kann einen wertvollen Beitrag zur Findung von nachhaltigen technischen Lösungen leisten.

2.6 Bionik in der Architektur

Natur-Ähnlichkeit ist in der Architektur keine Neuheit. Einen großen Boom erlebte die organische Gestaltung in der Architektur im 20. Jahrhundert. „Die Gläserne Kette“, eine Gruppe aus Architekten und Künstlern versuchte mit zahlreichen experimentellen Entwürfen die Architektur des 20. Jahrhunderts zu revolutionieren. Ein immer wieder hervorstechendes Motiv in der Entwurfsammlung der „Gläsernen Kette“ war die Organik, das Natur-nahe (Rooch und Syring, 2001). Insbesondere der Architekt Hermann Finsterlin lehnte sich bei seinen zum Teil sehr extravaganten Entwürfen stark an Vorbilder aus der Natur an, ohne diese jedoch (laut eigener Aussage) eins zu eins zu kopieren. Seine meist durch viele Rundungen geprägten Gebäudeentwürfe (im Gegensatz zu den sonst üblichen geraden, kantigen Konstruktionen) erinnern dabei stark an die Form von Schnecken, Pilzen und Korallen (Denk, 2001).

Der Trend des Runden griff im 20. Jahrhundert auch in andere Gebiete des Designs über. Plötzlich gab es runde Kühlschränke (Rooch und Syring, 2001), Nautiluschalen-ähnliche Telefone (Nachtigall, 2010) und dergleichen. Dabei stand keinesfalls die Funktion im Vordergrund, sondern lediglich das äußere Erscheinungsbild. Der Architekt und Kritiker Adolf Behne formulierte folgenden provokanten Satz: *„Sie fragen: warum muß alles gerade sein? — Es muß nicht alles gerade sein — wenn das Ungerade begründet ist — aber wir müssen vom Geraden ausgehen — sinnlos, ohne zwingenden Grund krumm, schweifend [zu] sein, halte ich für etwas genauso peinliches [sic] wie sinnlose Betrunkenheit.“* (Adolf Behne, 1923, zit. n. Rooch und Syring, 2001, S. 28)

Ebendiese Nachahmung der Natur, welche sich bloß auf das äußere Erscheinungsbild reduziert, ohne ein tieferes Verständnis für die eigentliche Funktion des biologischen Vorbildes zu erlangen, ist es, vor der Nachtigall und Pohl (2013) warnen. Diese hat nichts mit Bionik im eigentlichen Sinn zu tun, sondern dient nur der Ästhetik des Objekts. Es lässt sich darüber streiten, ob die von Nicht-Bionikern geforderte Berücksichtigung von „Ästhetik“ im bionischen Entwicklungsprozess sinnvoll ist (Nachtigall, 2010). Unbestreitbar liefert die Natur vielfach beeindruckende Formen und Strukturen, die der Mensch zu gerne nachahmen möchte, um sie im großen Maßstab bewundern zu können. Ein in der Literatur vielfach genanntes Beispiel ist das geometrische Erscheinungsbild der Diatomeen (Kieselalgen), deren teils hoch komplexe Baustruktur unter dem Mikroskop zum Vorschein kommt (Nachtigall und Pohl, 2013; Becker, 2001; Lötsch, 1998). Der Zoologe Ernst Haeckel war von der Schönheit der Diatomeen so begeistert, dass er einen bedeutsamen Lebensabschnitt dem Studium und der Erforschung verschiedener Diatomeenarten widmete und dabei zahlreiche beeindruckende Bildtafeln anfertigte, auf denen er die extravagantesten Strukturen skizzierte (Lötsch, 1998). Doch es ist nicht zu vergessen, dass die Natur keine „zwecklose“ Schönheit produziert. Alles Natürliche besitzt eine, beziehungsweise in den

meisten Fällen sogar vielfache Funktionen, die der Optimierung der zugrundeliegenden Struktur dienen (Nachtigall, 2010). „*Denn in der Natur ist auch Ornamentales funktional.*“ (Becker, 2001, S. 23) Ebenso sollte der Mensch danach streben, seine Strukturen ganzheitlich zu optimieren, um beispielsweise Ressourcen wie Energie und Baumaterialien zu sparen und nachhaltigere Konstruktionen zu erhalten. Genau dafür eignet sich die bionische Vorgehensweise. Als Baumeisterin mit Jahrmillionen langem Erfahrungsschatz liefert die Natur Beispiele für ressourceneffizientes und nachhaltiges Bauen (Nachtigall, 2010; Küppers, 2001). Man muss sich nur etwas – und zwar das *Richtige* – von ihr abschauen. Die Ästhetik darf dabei nicht allein im Vordergrund stehen.

Zu den berühmtesten Architekten, die sich in ihrem Schaffen von der Natur inspirieren ließen, zählt der Spanier Santiago Calatrava (Denk, 2001). In der „Stadt der Künste und Wissenschaften“ in Valencia sind gleich mehrere seiner bedeutendsten Schöpfungen zu besichtigen. Die gläserne Kuppel des Planetariums „L’Hemisfèric“, welche in Abbildung 2.4 zu sehen ist, soll beispielsweise ein sich öffnendes und schließendes Auge imitieren (Brück und Kuhn, 2008). Calatrava hat sich auch intensiv mit der Analyse tierischer und menschlicher Knochensysteme beschäftigt (Denk, 2001). Die filigrane Rippenstruktur von „L’Umbracle“ (vgl. Abb. 2.4) soll der Knochenstruktur des Menschen nachempfunden sein (Brück und Kuhn, 2008).

Ebenfalls an der Struktur von Knochen, Gelenken und Skeletten interessiert ist der britische Architekt Nicholas Grimshaw, der bereits eine Reihe beeindruckender Stahl-Glasbauten realisierte. Zu seinen bekanntesten Werken zählen das wurmartige Bahnhofsgebäude der Waterloo International Station in London, sowie das Ludwig-Erhard-Haus in Berlin. Letzteres ist der Rückenform eines Gürteltieres nachempfunden (Brück und Kuhn, 2008).



Abb. 2.4: Zwei berühmte Gebäude des Architekten Santiago Calatrava in der Stadt der Künste und der Wissenschaften in Valencia – im Vordergrund: L’Umbracle, im Hintergrund: L’Hemisfèric (Foto: Javier Yaya Tur, CAC, S. A.)²

Dass Knochenstrukturen derart häufig in der Architektur aufgegriffen werden, hat nicht nur rein ästhetische Hintergründe. Der Ingenieur Karl Culmann entdeckte bereits in der Mitte des 19. Jahrhunderts den belastungsoptimierten Aufbau von Knochen (Brück und Kuhn, 2008). Bei der Untersuchung des menschlichen Oberschenkelknochens, stellte er fest, dass dieser von zahlreichen dünnen Bälkchen durchzogen ist, die entlang der Zug- und Druckspannungstrajektorien verlaufen. Stark belastete Bereiche werden durch eine dichte Bälkchenführung verstärkt, wohingegen in Bereichen mit geringerer Belastung vermehrt Hohlstellen vorzufinden sind. Auf diese Weise kann eine bedeutsame Menge an Knochenmasse eingespart werden (Nachtigall und Pohl, 2013). Im menschlichen Körper macht das Gewicht des Skeletts nur zwölf Prozent seines Gesamtgewichts aus (Brück und Kuhn, 2008).

Das Prinzip der Gewichtsersparnis durch die auf die Belastung optimal abgestimmte Anordnung isostatischer Zug- und Druckrippen setzte der Italiener Pier Luigi Nervi zum Beginn des 20. Jahrhunderts vermutlich als erster (Hecker, 1969) in einer Deckenkonstruktion aus Beton um (Nachtigall, 2010). Die runde „Knochendecke“ des ehemaligen Zoologie-Hörsaals der Universität Freiburg, ein Konstrukt des Architekten Hans-Dieter Hecker aus den 1960er-Jahren, folgt dem selben Konstruktionsprinzip (Antony et al., 2014). Die Decke wurde von Antony et al. (2014) später nach der offiziellen Regelung des VDI (*VDI 6220: Bionik – Grundlagen, Konzeption und Strategie* 2021) als „echtes“ bionisches Produkt klassifiziert.

Nicht nur in Beton, sondern auch bei Stahlbauten lässt sich das Prinzip des belastungsorientierten Materialeinsatzes anwenden. Der aus 10.000 Tonnen Stahl zusammengesetzte, 300 m hohe Eiffelturm ist eine ingenieurmäßige Meisterleistung, die ohne die Entdeckung Culmanns vermutlich nicht in dieser Form realisiert werden können hätte (Brück und Kuhn, 2008). Der Turm besitzt ein löchriges Erscheinungsbild – seine Streben sind ideal dem Kraftverlauf angepasst. Wo keine Kräfte auftreten, wurde an Material gespart.

In einer Aufzählung von naturinspirierten Architekten darf ein Mann niemals fehlen: Frei Otto (1925-2015) war ein Architekt, dessen Arbeitsweise absolut untypisch für die Architektur war (Kanstinger, 2020) und vermutlich gerade deswegen zu ebenso beeindruckenden wie sinnvollen Konstruktionen führte. Sein Interesse galt der Erforschung natürlicher Formgebungsprinzipien, mit speziellem Fokus auf leichte Tragkonstruktionen (Kanstinger, 2020). Wie bereits erwähnt sind seine netzartigen Zeltkonstruktionen, wie der deutsche Pavillon in Montreal oder das Olympiastadion in München, welches in Abbildung 2.5 zu sehen ist, keinesfalls Reproduktionen von Spinnennetzen, auch wenn dies für den Laien auf den ersten Blick so wirken mag (Denk, 2001). Otto selbst meinte: *„Der Weg ist in Wahrheit umgekehrt: Erst als wir diese extremen Leichtbauten der Technik entworfen, konstruiert, geprüft, statisch berechnet hatten, [...] lernten wir die Spinnennetze kennen. Erst dann konnten wir sie mit geschulten Augen sehen, konnten sie ‚erkennen‘.“* (Otto, 1984, S. 171f, zit. n. Denk, 2001, S. 80)

Frei Otto verfolgte nicht die klassische bionische Herangehensweise, sondern experimentierte mit Seifenhaut, Magneten, Stoffen, Schnüren und dergleichen, um Gesetzmäßigkeiten der Natur zu erforschen: Oberflächenspannung, Adhäsion, Magnetismus, Schwerkraft, Druckdifferenzen, Reibung und weitere natürliche Phänomene untersuchte er in zumeist aufwendigen, aber anschaulichen Experimenten (Kanstinger, 2020), um sie sich in seinen Konstruktionen zu Nutzen zu machen. Sein Ziel war es dabei stets, nachhaltige Konstruktionen, u.a. bezüglich Energie-

²<https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/deed.en>

und Materialverbrauch, zu entwickeln. So führte er den „Bic“³, welcher das Verhältnis von Eigengewicht zu Traglast angibt, als neue Einheit ein. Eine Minimierung des „Bic“, also eine möglichst leichte Konstruktion mit möglichst hoher Tragfähigkeit, ist nur durch Formoptimierung erzielbar (Kanstinger, 2020).



Abb. 2.5: Frei Ottos Netzkonstruktion für das Olympiastadion in München (Foto: Tiia Monto)⁴

2.7 Formgebung natürlicher Tragkonstruktionen

Der Mensch ist ein Freund rechter Winkel und ebener Flächen, nicht zuletzt weil diese eine Reihe von Vorteilen aufweisen: Quaderförmige Gegenstände sind einfach und nahezu beliebig hoch stapelbar sowie zwischenraumlos – und damit platzsparend – anordenbar (Vogel, 2000). Wenngleich die Anordnung rechteckiger Bauteile zu einem eckigen Gesamttragwerk verhältnismäßig einfach erscheint, so ist sie aus Sicht des Kräfteverlaufs zumeist nicht die günstigste Wahl. Traditionell wird beim Entwurf eines Tragwerks zunächst die geometrische Form vorgegeben. Die dadurch entstehenden Kräfte und Spannungen müssen dann unter teilweise großem Materialaufwand abgetragen werden (Ramm, 1996). „Man baute das, was man berechnen konnte [...]. Mit aufwendigen Konstruktionselementen wie massiven Randträgern (‘Prothesen‘) und Vorspannung wird das Tragwerk wieder lebensfähig und sicher gemacht. Der Charakter einer leichten, schlanken, natürlichen Konstruktion geht verloren.“ (Ramm, 1996, S.72)

³benannt nach Ottos Statikprofessor Bickenbach (Kanstinger, 2020)

⁴<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>

Einen derart verschwenderischen Umgang mit Ressourcen kann sich die Natur nicht leisten. Sie baut anders. Strukturoptimierung unter möglichst geringem Materialeinsatz ist das Ziel natürlicher Konstruktionen. Um den Werkstoff bestmöglich auszunutzen zu können, wird eine möglichst gleichmäßige Spannungsverteilung angestrebt. Reine Normalkraftbeanspruchungen gelten als optimal, denn diese bewirken Zustände reiner Dehnung, bei welcher die Spannungen konstant über den gesamten Querschnitt verlaufen (Ramm, 1996). Biegung wird in natürlichen Konstruktionen weitgehend vermieden. Biegemomente führen zu einer Konzentration der Spannungen in den Randfasern des Querschnitts. Sie sind somit für eine gleichmäßige Ausnutzung ungünstig (Ramm, 1996).

Als natürliche Idealform, um reine Normalspannungsbeanspruchung in einem Tragwerk zu erzielen, ist die Seillinie bekannt. Ein an zwei Punkten gehaltenes Seil hängt unter gleichmäßiger Belastung durch sein Eigengewicht zwischen den Halterungen bogenförmig durch. Für solch eine konstante Gleichlast besitzt der ideale Bogen, unter welchem keine Biegemomente auftreten, die Form einer quadratischen Parabel. Für druckbeanspruchte Tragwerke gilt das selbe Prinzip, der Bogen ist bloß um 180° gedreht. Dies machte man sich bereits früh bei der Errichtung steinerner Bogenbrücken zunutze (Ramm, 1996).

Verfolgt man den Vorgang der Tragwerksentwicklung in die umgekehrte Richtung, versucht also unter dem Aspekt bestmöglicher Lastabtragung, nach dem Prinzip „Form Follows Force“ anstatt „Force Follows Form“ (Ramm, 1996), die optimale Form des Tragwerks zu finden, so gelangt man zu leichteren Tragwerken mit deutlich geringerem Materialaufwand.

2.7.1 Polygonale Schalenkonstruktionen

Bei Betrachtung natürlicher Platten- und Schalentragerwerke fällt auf, dass diese in den seltensten Fällen rechteckig sind. Häufig sind Schalenkonstruktionen aus Polygonen höherer Ordnung zusammengesetzt, welche mosaikartig angeordnet sind. Im Tierreich sind derartige Strukturen beispielsweise im Panzer von Schildkröten, in Seeigelschalen oder auch im Skelett des Kofferrfischs zu finden. Auch die Schalen von Früchten wie der Jackfrucht oder der Lychee weisen polygonale Segmente auf. Diese Muster lassen sich (wenn auch nicht exakt, sondern nur genähert) mathematisch durch „Voronoi“-Diagramme beschreiben (Chaidee und Sugihara, 2017). Die Bildung eines Voronoi-Diagramms erfolgt folgendermaßen: Auf einer Ebene wird eine beliebige Anordnung von Punkten (Zentren) definiert. Anschließend werden alle Punkte der Ebene ihrem jeweils nächsten Zentrum zugewiesen und bilden so polygonale Regionen. Die Trennlinien zwischen den Regionen, also die Summe jener Punkte, die mehreren Zentren zugeordnet sind, werden als „Voronoi“-Diagramm bezeichnet (Bükki, 2005). Abbildung 2.6 zeigt ein einfaches Beispiel. Die Ermittlung des „Voronoi“-Diagramms kann in analoger Weise auch auf gekrümmten Flächen erfolgen (Bükki, 2005).

Charakteristisch für natürliche Plattenanordnungen ist das jeweils Y-förmige Zusammentreffen dreier Plattenränder in einem Punkt. Diese wird von Kresling und Nachtigall (1992) als Bedingung für die räumliche Stabilität der Plattenkonstruktion bezeichnet. Das selbe Prinzip ist bei den drei platonischen Körpern Tetraeder, Hexaeder (Würfel) und Dodekaeder wieder zu finden, welche aus vier, sechs, bzw. zwölf gleich großen dreieckigen, quadratischen, bzw. pentagonalen Flächen zusammengesetzt sind. Um räumliche Stabilität zu gewähren, müssen die Platten dabei an den Rändern keineswegs starr verbunden sein. Über eine gelenkige Verbindung, welche beispielsweise beim Skelett von Seeigeln sowie auch beim Kofferrfisch in Form von Verzahnungen vorzufinden

ist, können Scherkräfte aufgenommen werden, welche die Platten ansonsten gegeneinander verschieben würden (Nachtigall und Pohl, 2013).

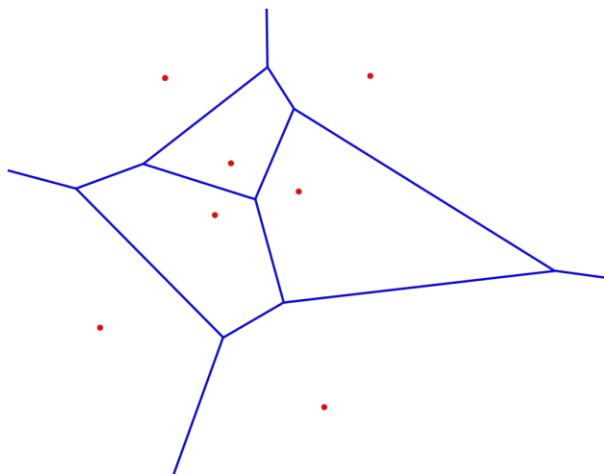


Abb. 2.6: einfaches Voronoi-Diagramm (Bild: Markus Matern)⁵

Treffen hingegen mehr als drei Platten in Form eines X zusammen, ist die Konstruktion instabil. Diese Art der Plattenanordnung wird bei faltwerken angewendet (Kresling und Nachtigall, 1992). Die Falze, in denen zwei Flächen aneinanderstoßen, wirken dabei als lineare Gelenke. Zur Gewährleistung der Stabilität solcher Konstruktionen wird sichergestellt, dass die Flächen entlang der Falte nicht weiter gekrümmt werden können (Kresling und Nachtigall, 1992). Gegebenenfalls kann die Formstabilität der Falten durch zusätzliche Versteifungsträger sichergestellt werden. An den Kanten werden die Kräfte in Form von Membrankräften übertragen, welche in der Plattenebene wirken (Marti, 2014).

Besonders häufig treten hexagonale Polygone auf. Im konkreten Fall des Kofferfisch-Skeletts besitzt die klare Mehrheit mit etwa 50-80% aller Platten eine hexagonale Form (Yang, Naleway et al., 2015; Eigen et al., 2022). Eine Besonderheit des Hexagons ist, dass sich damit eine größtmögliche Fläche bei kleinstmöglichem Umfang beschreiben lässt (Vogel, 2000). Hexagonale Strukturen können somit besonders platzeffizient angeordnet werden. Das vermutlich bekannteste Beispiel hierfür ist die Struktur von Bienenwaben, die Subjekt zahlreicher Studien ist (Nachtigall und Pohl, 2013).

2.8 Einige Beispiele aus der Bionik

Im folgenden Abschnitt wird ein kleiner Ausschnitt über bereits realisierte – und in den meisten Fällen auch erfolgreiche – bionische Projekte dargelegt. Zunächst werden einige Beispiele aus den Materialwissenschaften sowie aus dem Fahrzeugbau vorgestellt, welche dem Gebiet der Konstruktionsbionik zugeschrieben werden können. Im Anschluss wird der Fokus auf Projekte mit Bezug auf das Bauwesen gelegt. Hier werden zwei Beispiele aus der Verfahrensbionik erläutert.

⁵https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Voronoi_diagram.svg

2.8.1 Die Sache mit dem Haken

Als eine der bekanntesten – wenn nicht sogar *die bekannteste* – bionische Erfindung ist der Klettverschluss zu nennen. Entwickelt wurde dieser in der Mitte des 20. Jahrhunderts vom Schweizer Ingenieur Georges de Mestral. Dieser soll von den zahlreichen kleinen Kletten, welche sich beim Spazierengehen im Fell seines Hundes verfangen hatten, so fasziniert gewesen sein, dass er sie genauer untersuchte. Bei Betrachtung unter dem Mikroskop erkannte Mestral, dass die Kletten aus vielen kleinen Häkchen (in etwa 200 pro Frucht) bestehen, welche sich leicht im Fell von Tieren verhaken und so den Transport und die Verbreitung der Samen ermöglichen (Brück und Kuhn, 2008). Dieses simple Prinzip übersetzte Mestral in ein ebenso einfaches wie geniales Verschlusssystem: Viele kleine, auf einem Nylonband befindliche, Kunststoffhäkchen verfangen sich in einem Gewebe aus schlaufenartigen Fasern auf einem Gegenband (Brück und Kuhn, 2008; Wawers, 2020). Die Verbindung kann durch einfaches Wegreißen ohne großen Kraftaufwand wieder gelöst werden (Wawers, 2020). Ein Nachteil ist jedoch der Verschleiß des Systems. Die Haken können brechen und die Fasern reißen, wodurch der Klettverschluss nur eine begrenzte Lebensdauer besitzt (Brück und Kuhn, 2008).

Mestral ließ seine Entwicklung 1955 unter dem Namen „Velcro“ patentieren (Brück und Kuhn, 2008), welcher aus den französischen Wörtern für Wollstoff („velour“) und Haken („crochet“) zusammengesetzt ist (Nachtigall und Pohl, 2013). Einige Jahre später wurde die gleichnamige Firma gegründet (Brück und Kuhn, 2008).

Auch wenn die Literatur gespickt von den Erfolgsgeschichten einzelner bionischer Entwicklungen ist und der Klettverschluss zweifelsohne ganz oben auf der Erfolgsliste steht – ist er doch heute in Industrie und Textilwirtschaft kaum mehr wegzudenken – ist der Weg dorthin oftmals ein schwieriger und langwieriger Prozess. Das Beispiel des Klettverschlusses verdeutlicht die Schwierigkeit aus einer noch so einfachen Idee ein produzierbares und fertig einsetzbares Produkt zu entwickeln. Von der Idee bis zum marktreifen Klettverschluss vergingen in diesem Fall mehr als zehn Jahre (Nachtigall und Pohl, 2013).

2.8.2 Was Haifische mit dem Fliegen zu tun haben

Schnelle Fortbewegung bei minimalem Energieaufwand – wie funktioniert das? Während der Mensch sich nur eher schwerfällig durch das Wasser zu bewegen gelernt hat, scheinen Fische beinahe mühelos hindurch zu gleiten. Zu einem großen Teil liegt dies am stromlinienförmigen Körperbau der Fische, welcher einen entscheidenden Vorteil bei der Fortbewegung durchs Wasser liefert. Doch in manchen Fällen steckt noch etwas mehr dahinter. Der Paläontologe Wolf-Ernst Reif wurde als erster auf die ungewöhnliche Hautschuppenstruktur von Haien aufmerksam. Er erkannte, dass deren Haut von etlichen schmalen Rillen durchzogen ist, die stromlinienförmig über den gesamten Körper des Tieres verlaufen (Brück und Kuhn, 2008). Ein tieferer Blick in den Aufbau verrät, dass die Hautschuppen von winzigen Zähnchen überzogen sind, welche jenen im Gebiss des Hais ähneln. Diese Zähnchen sind kammartig angeordnet, wodurch eine Rillenstruktur entsteht (Wienecke-Janz et al., 2008). Reif stellte zudem fest, dass besagte Rillen bei schnell schwimmenden Haiarten stärker ausgeprägt sind, was die bis zu diesem Zeitpunkt allgemein vertretene Meinung, jegliche Art von Struktur, die von einer glatten Oberfläche abweicht, würde durch Reibung zu erhöhtem Strömungswiderstand führen, widerlegte (Benett und Tanaka, 2016). In Kooperation mit dem Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) wurden in der Folge Strömungsmessungen an Plexiglasscheiben mit der 100-fach vergrößerten Struktur der Haifischhaut durchgeführt (Benett und Tanaka, 2016), wobei eine Reduktion des Strömungswi-

derstands durch die Rillen um etwa 10% ermittelt wurde (Brück und Kuhn, 2008).

Das Potenzial für eine technische Umsetzung des Haifischhaut-Prinzips war rasch erkannt. Zunächst wurden transparente, selbstklebende Folien mit der Struktur der Haifischschuppen auf den Rumpf von Segelbooten aufgebracht, was bei den Olympischen Spielen 1984 bereits zum Erfolg führte (Wienecke-Janž et al., 2008). Wenig später erprobtem Forscher des DLR auch die Anwendung auf Flugzeugen. Berechnungen zufolge könnten durch die dadurch erzielte Reduktion des Strömungswiderstands um etwa 6%, jährlich bis zu 200 Tonnen Kerosin pro Flieger eingespart werden (Brück und Kuhn, 2008). Eine beachtliche Summe bei Betrachtung der aktuellen Entwicklung der Treibstoffpreise, sowie der Umweltbelastung.

Trotz dieses deutlichen Vorteils hat sich die „Ribletfolie“⁶ für die Anwendung im Flugzeugbau nicht durchgesetzt, da ihre Handhabung etliche Komplikationen mit sich bringt (Benett und Tanaka, 2016). Zum einen muss die Folie für die wunschgemäße Erzielung des Strömungseffekts perfekt an der Flugzeugoberfläche anliegen. Wer schon einmal versucht hat eine selbstklebende Schutzfolie auf sein Handy aufzubringen, weiß wie schwierig ein solches Unterfangen ist. Die Bildung winziger Luftbläschen ist nahezu unvermeidbar. Diese müssen anschließend unter hohem Aufwand einzeln aufgestochen werden, um nicht den gegenteiligen Effekt, nämlich das erhöhte Auftreten von Turbulenzen und damit einen erhöhten Strömungswiderstand zu bewirken (Wienecke-Janž et al., 2008). Hinzu kommt eine geringe Dauerhaftigkeit des Materials. Zwischen Höhenflug und Landbahn herrschen Temperaturdifferenzen von über 100°C, welchen die Folie nicht lange standhalten kann (Wienecke-Janž et al., 2008). Des weiteren müsste die Folie für die vorschriftsmäßige Inspektion der Maschine jedes Mal abgenommen werden. Der damit verbundene Aufwand, die Personalkosten sowie die Verzögerungen sind für Fluggesellschaften nicht tragbar (Brück und Kuhn, 2008).

Als Alternative wurde vom Institut Fraunhofer eine Lackiertechnik entwickelt, die den strömungsoptimierenden Effekt der Haifischhaut zusätzlich mit der selbstreinigenden Funktion des Lotuseffekts kombiniert und den extremen Temperaturverhältnissen bei der Luftfahrt standhält. Auf diese Weise können 2% des Treibstoffverbrauchs eingespart werden (Benett und Tanaka, 2016).

Eine weitere Sparte, in der sich der Haifisch-Effekt bewährt hat, ist der Schwimmsport. Zahlreiche erfolgreiche Schwimmpromis wie Thomas Rupprath, Ian Thorpe (Brück und Kuhn, 2008), Liam Tancock und Michael Phelps (Wienecke-Janž et al., 2008) tragen die auf diesem Prinzip entwickelten „Fastskin“-Anzüge der Firma „Speedo“. Auch wenn manche Stimmen einen realen Vorteil der Schwimmanzüge für unwahrscheinlich halten und eher Placebo-Effekte dahinter vermuten, spricht der Erfolg der Sportler für sich (Wienecke-Janž et al., 2008).

2.8.3 Der Kofferfisch auf Rädern

Wie das Beispiel der Haifischhaut-Folie für Flugzeuge verdeutlicht, gibt es keinerlei Garantie, dass die vollständige Entwicklung eines bionischen Produkts jedes Mal zu wirtschaftlichem Erfolg führt. Das im Folgenden vorgestellte bionische Produkt entwickelte sich ebenso wenig zum „Kassenschlager“.

Der in vorliegender Arbeit behandelte Kofferfisch diente tatsächlich bereits einmal als bionisches Vorbild. Im Jahr 2005 stellte Mercedes Benz auf dem DaimlerCrysler Innovation Symposium

⁶ riblet [engl.] = Rippchen (Benett und Tanaka, 2016)

unter dem Titel „Bionic Car“ ein Auto vor, welches durch seine spezielle Formgebung die aerodynamischen Vorteile des Kofferrfischs übernehmen sollte (Mercedes-Benz Group AG, 2011). Abbildung 2.7a zeigt ein fertiges Modell des Wagens. Durch seine geschwungene, schnabelähnliche Form erreicht das „Bionic Car“ einen vergleichsweise geringen Strömungswiderstand und damit auch einen geringeren Treibstoffverbrauch als vergleichbare, herkömmliche Autos (Ruszaj, 2015).

Zur Entwicklung des Fahrzeugs verfolgte Mercedes-Benz den klassischen „Top-down“-Prozess. Auf der Suche nach tierischen Vorbildern wurden unter anderem Pinguine und Mehlschwalben untersucht, bis man sich schließlich für den Kofferrfisch als Formgeber entschied (Nachtigall, 2010). Der Pinguin besitzt zwar eine natürliche Idealform, die ihm einen unschlagbar geringen Strömungswiderstand verleiht, die etwas plumpere, schachtelartige Form des Kofferrfischs hat jedoch am ehesten Ähnlichkeiten mit einem Fahrzeug, wie wir es kennen (Wienecke-Janz et al., 2008). Schließlich muss das Auto am Ende des Tages genügend Platz im Inneren besitzen, sodass ein Mensch darin komfortabel sitzen kann. Trotz seiner plumpen Form werden dem Kofferrfisch erstaunlich gute strömungsmechanische Eigenschaften zugeschrieben. Durch die gezielte Steuerung von Wirbeln um seinen Körper ist er in der Lage sich verhältnismäßig flink und wendig zu bewegen (Wienecke-Janz et al., 2008; Van Wassenbergh et al., 2014; Brück und Kuhn, 2008). Anhand von Versuchen im Strömungskanal entwickelte Mercedes Benz, ausgehend von der Anatomie des Kofferrfischs und unter Berücksichtigung des Platzbedarfs im Inneren für Personen und Gepäck, ein Wagenmodell, dessen Strömungswiderstandskoeffizient lediglich einen Wert von 0,19 beträgt (Wienecke-Janz et al., 2008). Dieser liegt deutlich unter dem durchschnittlichen Wert üblicher PKWs von 0,24 (Ruszaj, 2015).

Zusätzlich zur aerodynamischen Kofferrfisch-Form wurden noch weitere Maßnahmen getroffen, um den Strömungswiderstand des Fahrzeugs zu senken: Anstelle von nach außen abstehenden Seitenspiegeln besitzt das „Bionic Car“ Rückblickkameras im Inneren, die Türgriffe sind in die Karosserie eingebettet und fahren erst bei Berührung aus (Benett und Tanaka, 2016) und die Räder sind mit Kunststoffscheiben abgedeckt (Brück und Kuhn, 2008). Zu guter Letzt wurde auch noch am Gewicht gespart, um den Treibstoffverbrauch zu senken. Nach dem bereits in Abschnitt 2.6 beschriebenen Prinzip des belastungsoptimierten Skelettaufbaus und mithilfe computergesteuerter Rechenmethoden (Soft Kill Method), wurde die Rohbaustruktur des Wagens auf ein Minimum an erforderlichlichem Material reduziert (Wienecke-Janz et al., 2008). Über die Soft Kill Method können gering beanspruchte Bereiche identifiziert werden, an denen Material gespart werden kann, sowie umgekehrt auch hochbelastete Bereiche, die zusätzliche Verstärkung benötigen. Das Ergebnis ist eine 30%-ige Gewichtsreduktion gegenüber herkömmlichen Karosserien (Benett und Tanaka, 2016). Abbildung 2.7b zeigt ein Modell der aufgelösten Karosserie in belastungsoptimierter Leichtbauweise.

Als Konzeptfahrzeug ging das „Bionic Car“ nie in serielle Produktion. Vermeintlich ist es „zu innovativ“ um von der breiten Masse der Konsumenten akzeptiert zu werden (Wienecke-Janz et al., 2008). Benett und Tanaka (2016, S.138) bezeichnen den Prototypen aber als „zukunftssträchtige Innovationsquelle“, von dem eventuell einzelne Teilaspekte in die zukünftige Entwicklung weiterer, massentauglicher Fahrzeuge mit einfließen werden (Wienecke-Janz et al., 2008). Schlussendlich ist anzumerken, dass entgegen ursprünglicher Annahmen Van Wassenbergh et al. (2014) herausfanden, dass der boxförmige Umriss des Kofferrfisches diesem keineswegs besondere Stabilität verleiht, sondern ihn im Gegenteil hoch empfindlich gegenüber quer angreifende Strömung macht. Der Fisch gewinnt dadurch an Wendigkeit, was in seiner natürlichen Umgebung unter Wasser von entscheidendem Vorteil ist, sich für ein Fahrzeug, das sich auf einer Straße bewegen soll, allerdings eher als ungünstig erweist (Van Wassenbergh et al., 2014). Dass das Kofferrfischauto es



(a) Kompletmodell des Wagens



(b) Rohbaustruktur in Leichtbauweise

Abb. 2.7: Modelle des „Bionic Car“ in der Bionik-Ausstellung des LWL Naturkundemuseums in Münster, 2012 (Fotos: NatiSythen⁷)

letztendlich nicht auf den Markt schaffte, bleibt ein anschauliches Beispiel dafür, dass der bionische Ansatz zur innovativen Produktentwicklung nicht immer ein 100%-iges Erfolgsrezept liefert.

2.8.4 Lüften wie die Termiten

Ein in der Literatur häufig genanntes Beispiel für eine besonders effiziente bionische Entwicklung ist das Einkaufszentrum und Bürogebäude der East-Gate-Hall in Harare, der Hauptstadt von Simbabwe, deren Belüftungssystem jenem von Termitenhügeln nachempfunden wurde (Nachtigall und Pohl, 2013; Clagett et al., 2018; Bajcinovci, 2019; Wienecke-Janz et al., 2008; Brück und Kuhn, 2008; Benett und Tanaka, 2016). Termiten errichten im Vergleich zu ihrer Körpergröße gigantische Bauten (Clagett et al., 2018), in denen Millionen Individuen beheimatet sind (Benett und Tanaka, 2016). Die Stabilität der meterhohen Türme ist bereits beeindruckend, doch noch bedeutsamer ist die Frage, wie die Tiere für eine ausreichende Belüftung der auf den ersten Blick geschlossen erscheinenden Bauten sorgen, um nicht darin zu ersticken. Neben der durch den eigenen Stoffwechsel bedingten CO₂-Produktion kultivieren Termiten Pilzgärten im Inneren ihrer Bauten, die den Kohlendioxidgehalt zusätzlich erhöhen (Brück und Kuhn, 2008). Zum Gedeihen benötigen die Pilze eine konstante Temperatur von 30,5°C (Benett und Tanaka, 2016). Eine große gebäudetechnische Herausforderung in Anbetracht der um mehr als 30°C schwankenden Außentemperaturen, die in den wüstenartigen Heimatgebieten der Termiten herrschen (Benett und Tanaka, 2016).

Um den schwierigen Balanceakt zwischen ausreichendem Gasaustausch und konstant bleibenden Temperaturen (Brück und Kuhn, 2008) zu meistern, wenden die Termiten gleich mehrere Tricks an. Die in Australien beheimateten Kompassstermiten errichten schmale, bis zu 4 m hohe, wandartige Bauten, deren Längsachse einer nord-südlichen Orientierung folgt. Auf diese Weise werden in den kühlen Morgen- und Abendstunden die östliche beziehungsweise westliche Breitseite der Bauten von der Sonne beschienen und erwärmt. In der brütend heißen Mittagszeit jedoch, wird lediglich die Schmalseite bestrahlt, wodurch eine Überhitzung der Bauten vermieden werden kann (Benett und Tanaka, 2016). Die Belüftung im Inneren erfolgt über ein weit verzweigtes Kaminsystem. In einem großen zentralen Kaminschacht steigt die von den im „Keller“

⁷<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/deed.en>

befindlichen Pilzgärten erwärmte Luft nach oben und zieht durch den dadurch entstehenden Unterdruck kühle Luft von unten nach (Brück und Kuhn, 2008). An der Spitze des Baus wird die warme, kohlenstoffreiche Luft in seitliche Belüftungsgänge abgeleitet. Hier erfolgt der Gasaustausch über Osmose: im Inneren des Baus herrscht ein CO₂-Überdruck, an der Außenluft ein Sauerstoff-Überdruck. Die Wände des Termitenhügels bestehen aus einem aus zerkaumtem Holz, Spucke und Lehm zusammengesetzten Mörtel, der eine äußerst poröse Struktur besitzt. Über diese Poren kann das überschüssige Kohlendioxid nach außen und gleichzeitig Sauerstoff nach innen gelangen (Wienecke-Janz et al., 2008). Sobald die Luft in den seitlichen Lüftungsschächten abkühlt, sinkt sie wieder nach unten, wo sie erneut über den „Keller“ geführt wird (Benett und Tanaka, 2016). In manchen Fällen reichen die Bauten ein Stück weit unter die Erde, wodurch ein weiterer Kühleffekt erzielt wird (Wienecke-Janz et al., 2008). Ein perfekt ausbalancierter Kreislauf, ganz ohne externe Energiezufuhr (Clagett et al., 2018).

Das von den Termiten übernommene Prinzip der konvektiven Belüftung wurde bereits in mehreren Bauprojekten umgesetzt. Eines der Berühmtesten ist die erwähnte East-Gate-Hall in Simbabwe. Das Herzstück des neunstöckigen Gebäudekomplexes ist ein zentrales Atrium, von welchem ausgehend der Luftaustausch erfolgt (Benett und Tanaka, 2016). Zahlreiche kleinere Luftschächte versorgen die einzelnen Stockwerke mit kühler Luft (Brück und Kuhn, 2008). Die tagsüber angestaute Wärme von Sonne, Menschen und Maschinen wird nachts über 48 große Ventilationskammine am Dach abgegeben. Auf diese Weise wird ohne künstliche Heizung oder Kühlung eine gleichbleibende Innenraumtemperatur von 23-25 Grad erzielt. Lediglich strombetriebene Ventilatoren werden zur Unterstützung des Luftaustauschs eingesetzt (Benett und Tanaka, 2016). Über die exakte Höhe des daraus resultierenden Energieeinsparungspotenzials ist man sich uneinig. Brück und Kuhn (2008) sprechen von einer 50%-igen Reduktion des Energieverbrauchs im Vergleich zu einem Gebäude ähnlicher Größe im selben Gebiet, Benett und Tanaka (2016) von 35-45% und Clagett et al. (2018) behaupten sogar der Energiebedarf der East-Gate-Hall betrage nur ein Zehntel von jenem vergleichbarer Gebäude. Sicher ist jedenfalls, dass ein derartiges passives Belüftungssystem in Anbetracht der Energieeffizienz und Umweltfreundlichkeit deutlich besser abschneidet als die sonst übliche künstliche Klimatisierung von Gebäuden.

2.8.5 Die Seeigelschale als Bauvorlage

Der Seeigel besitzt ein aus vielen polygonalen Platten zusammengesetztes Skelett, welches starke Ähnlichkeiten mit jenem des Kofferrfischs besitzt. Dieses Skelett diente bereits mehrmals als Inspirationsquelle für innovative Baukonstruktionen, wie zum Beispiel die Eissporthalle Erfurt (Nachtigall, 2010) und eine Reihe von Forschungspavillons der Universitäten Stuttgart und Tübingen (Schwinn et al., 2019).

Die Entwicklung von dünnen Schalenträgwerken ist an sich keine Neuheit. Die markante, palmenartige Form des Operndachs in Sydney oder die imposante, muschelartige Form von Calatravas „Oceanogràfic“ in Valencia beweisen, was möglich ist. Jedoch ist die Herstellung solcher doppelt gekrümmten Betonschalen äußerst aufwendig und teuer. Für die Bauindustrie wäre eine modulare Zusammensetzung von einzelnen, vorgefertigten Elementen zu einem zusammenwirkenden Schalenträgwerk daher von großem Interesse (Schwinn et al., 2019).

Von 2011-2019 realisierte ein Team aus Architekten, Paläontologen und Biologen der Universität Stuttgart und der Universität Tübingen eine Reihe von Projekten, in denen fünf verschiedene hölzerne Forschungspavillons nach dem Vorbild des Seeigelskeletts errichtet wurden (Schwinn et al.,

2019). Mit jedem Schritt wurde dabei versucht, eine im Vorgängerprojekt aufgetretene Fragestellung zu untersuchen und neue Optimierungsmöglichkeiten zu erproben. Der Erste in der Reihe war der ICD/ITKE-Forschungspavillon 2011. Neben dem ersten Versuch aus einer Y-förmigen Plattenanordnung mit gelenkiger Fugenverbindung nach dem Vorbild der „Sanddollar⁸“-Seeigel ein insgesamt steifes Schalentragswerk zu erstellen, lag der Fokus des Projekts zusätzlich auf einer „fertigungsintegrativen“ Planung und Ausführung. Das Ziel war ein durchgängiger Datenfluss von der Planung bis hin zur maschinellen Herstellung der einzelnen Platten (Schwinn et al., 2019).

Bei diesem ersten Prototypen wurde festgestellt, dass die manuelle Zusammensetzung der einzelnen Plattenelemente mit großem Aufwand verbunden ist. Beim 2014 errichteten Forstpavillon der Landesgartenschau in Schwäbisch Gmünd wurde daher an einer Reduktion der Plattenanzahl im Verhältnis zur überspannten Fläche gearbeitet. Die einzelnen Platten wurden dabei kreuzweise verschraubt, was aber eine gewisse Mindestdicke der Platten erfordert (Schwinn et al., 2019). Um Material und somit Gewicht einzusparen wurden im darauf folgenden Projekt, dem ICD/ITKE-Forschungspavillon 2015/16, alternative Verbindungsmöglichkeiten untersucht. Durch die Verarbeitung des Holzes mit Techniken aus der Textilindustrie, wie zum Beispiel Laminieren und robotisches Nähen, konnten die nur maximal 6 mm dünnen, elastisch gebogenen Holzfurnierelemente durch eine einfache Schnürtechnik miteinander verbunden werden. Das Ergebnis war eine besonders leichte Schalenkonstruktion, die gänzlich ohne traditionelle Verbindungsmittel zusammen hielt (Schwinn et al., 2019). Beim anschließend errichteten Rosenstein-Pavillon, wurde stattdessen versucht, die Masse des Tragwerks durch statische Optimierung der Fugenanordnung zu reduzieren. Daraus ergab sich ein aus 92 Furniersperrholzplatten zusammengesetzter Pavillon, der etwa 7 m überspannte. Die polygonalen, 20 mm dicken Platten besaßen individuell unterschiedliche Abmessungen, die an die optimale Fugenanordnung angepasst waren (Schwinn et al., 2019). 2019 wurde der fünfte Holzpavillon der Reihe für die Bundesgartenschau in Heilbronn fertiggestellt. Dieser besaß eine beachtliche Spannweite von 29 m und wurde aus 400 gänzlich robotisch hergestellten, individuellen Plattenelementen zusammengesetzt (Schwinn et al., 2019; Jan Knippers Ingenieure, 2019).

Auch wenn die nur für einen begrenzten Zeitraum errichteten Forschungspavillons noch nicht alle Anforderungen vollwertiger, langfristig bestehender Tragwerke erfüllen (Schwinn et al., 2019), zeigen sie auf, dass die modulare Zusammensetzung einzelner polygonaler Segmente zu einem Schalentragswerk anhand des natürlichen Vorbilds des Seeigels möglich ist und dass Entwicklungspotenzial in diese Richtung besteht. In analoger Weise ist es auch denkbar, ein ähnliches Tragwerk aus Beton nach dem Vorbild des Kofferfischskeletts zu entwickeln. Ein erster Schritt hierfür wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit bereits unternommen. Die Ergebnisse werden in den Kapiteln 3 und 4 eingehend beschrieben.

⁸Sanddollars gehören zur Gruppe der unregelmäßigen Seeigel. Sie zeichnen sich durch eine stark abgeflachte Schale aus, die an der Innenseite durch netzartige Verzweigungen gestützt wird (Grun et al., 2019).

Kapitel 3

Das Skelett des Kofferfischs

3.1 Grundsätzliches zum Kofferfisch

Der Kofferfisch gehört zur Ordnung der Kugelfischartigen (Tetraodontiformes) und existiert in einer großen Bandbreite an Farben und Formen (Santini et al., 2013). Er sticht durch seine eher ungewöhnliche, kantige Körperform aus der breiten Masse der Fische hervor. Diese spezielle Form war bereits Subjekt zahlreicher Studien, die sich mit dem strömungsmechanischen Verhalten des Fisches beschäftigen. Die Arbeiten legen dar, dass der Kofferfisch für einen im Gegensatz zu seinen stromlinienförmigen Artgenossen eher plumpen, kastenförmigen Fisch erstaunlich günstige hydrodynamische Eigenschaften aufweist (Van Wassenbergh et al., 2014; Kozlov et al., 2015; Bartol et al., 2002). Aufgrund seines geringen Strömungswiderstandes (Chowdhury et al., 2019) nahm sich Mercedes Benz die Form des Fischkörpers zum Vorbild für den Entwurf eines bionisch inspirierten PKWs (Mercedes-Benz Group AG, 2011). Zu diesem Zeitpunkt erkannten die Entwickler aber noch nicht, dass der Kofferfisch im Vergleich mit schmaleren, stromlinienförmigen Fischen weder ein besonders schneller, noch ein besonders stabiler Schwimmer ist. Seine Stärke liegt vielmehr in seiner Manövrierfähigkeit. Durch die gezielte Steuerung von Wirbeln rund um seinen Körper ist es dem Kofferfisch möglich sich in dicht bewachsenen Korallenriffen, in denen er vorwiegend lebt, fortzubewegen (Van Wassenbergh et al., 2014).

Das Geheimnis hinter der untypischen Körperform des Kofferfisches liegt in seinem panzerartigen Skelett. Im Gegensatz zum üblichen Fischskelett in Form einer aufgelösten Fischgräten-Struktur, besteht das Skelett des Kofferfisches aus einer Vielzahl vorwiegend hexagonaler, steifer Platten (Yang, Naleway et al., 2015), die den gesamten Fischkörper mit Ausnahme von ein paar wenigen Öffnungen für Flossen und Mund umschließen. Derartige Strukturen sind in der Natur häufig anzutreffen. Auch landbewohnende Lebewesen, wie beispielsweise Schildkröten und Gürteltiere haben einen ähnlichen Panzer zur Abwehr von Angreifern entwickelt. Durch geschickte geometrische Anordnung der einzelnen „Bauteile“ werden trotz des verhältnismäßig begrenzten Angebots an Baumaterialien (nämlich Mineralien als Feststoff und weiche, organische Substanzen zur Verbindung) die Anforderungen im Hinblick auf Steifigkeit, Stärke und Flexibilität erfüllt (Fratzl et al., 2016). Dabei erweist sich die mosaikartige Zusammensetzung von kleinformatigen Elementen zu einem großen Gesamtkörper als vorteilhaft. Die einzelnen Elemente bestehen meist aus einem starren, harten Mineral. Ihre Verbindung erfolgt durch weiche, organische Fasern, wodurch eine deutlich größere Flexibilität als bei monolithischen Konstruktionen gegeben ist (Yang, Chen et al., 2013).

Dem selben Konstruktionsprinzip folgt auch das Skelett des Kofferfischs. Seine starren, (größtenteils) hexagonalen Platten bestehen aus mineralischem Hydroxylapatit (Yang, Naleway et al., 2015), welches beispielsweise auch im menschlichen Zahnschmelz vorzufinden ist und als härtestes Material im menschlichen Körper gilt (Habibah, Amlani und Brizuela, 2021). Die außerordentliche Härte des Panzers bietet dem Kofferfisch effektiven Schutz vor Fressfeinden. An ihren Rändern

sind die einzelnen Platten über Verzahnungen und weiches Bindegewebe aus leiterartig angeordneten Collagenfasern miteinander verbunden. In Belastungsversuchen haben Yang et al. (2015) festgestellt, dass eben diese Verbindungen die Schwachstelle im System darstellen. Sowohl beim langsamen Spannungsaufbau als auch bei schlagartigen Belastungen versagten in den meisten Fällen zunächst die Bindegewebsfasern unter teilweise großen Deformationen, während die Platten selbst nahezu intakt blieben. Dies lässt vermuten, dass die Fasern vorwiegend zur Flexibilität des Skeletts beim Wachstum oder der Anpassung an unterschiedliche Drucksituationen dienen (Yang, Naleway et al., 2015).

3.2 Beschaffung und Aufbereitung des Untersuchungsobjektes

Im Rahmen dieser Arbeit wurde ein einzelnes Kofferfisch-Exemplar zur Untersuchung herangezogen. Dankenswerterweise wurde hierzu der Kadaver eines kürzlich verstorbenen Tieres vom Haus des Meeres in Wien gespendet. Abbildung 3.1a zeigt den untersuchten Fisch als Jungtier. Dieser gehört zur Art der Gelben Kofferfische (*Ostracion cubicus*) und stammt als Wildfang ursprünglich aus Südostasien. In Abbildung 3.1b ist der Kadaver des Tieres zu erkennen, welcher letztlich untersucht wurde. Das vorliegende Exemplar wurde im eingefrorenen Zustand vom Haus des Meeres übernommen und an das Naturhistorische Museum Wien übergeben, wo er aufgetaut, mittels MicroCT gescannt und anschließend skelettiert wurde. Die Analyse des Skeletts erfolgte zunächst visuell auf Basis des präparierten Skeletts. Einen detaillierteren Blick in die Skelettstruktur lieferte schließlich ein auf Basis des MicroCT-Scans erstelltes digitales 3D-Modell des gesamten Skelettkorpus. Die Untersuchungen erfolgten zerstörungsfrei und waren rein optischer Natur. Nach Abschluss der Begutachtung wurde das Skelett an das Naturhistorische Museum Wien retourniert und befindet sich nun in dessen Fischeskelettsammlung.



(a) als Jungtier (Foto: H. Goldammer) (b) Kadaver im gefrorenen Zustand (Foto: eigene Aufnahme)

Abb. 3.1: Untersuchtes Kofferfisch-Exemplar

3.3 Analyse des Skeletts

3.3.1 Gesamtbild und Plattenverteilung

Das im Rahmen dieser Arbeit untersuchte Tier ist verhältnismäßig klein. Die Abmessungen des reinen Skelettkorpus (exklusive Flossen) betragen 102 mm in der Länge, 44 mm in der

3.3 Analyse des Skeletts

Breite an der weitesten Stelle und 41 mm in der Höhe. Abb. 3.2 zeigt das präparierte Skelett in vier verschiedenen Perspektiven. Die größten Platten des Skeletts befinden sich jeweils im Zentrum an der Ober- und Unterseite mit einem maximalen Durchmesser von ca. 9 mm. Zum Schwanz und zum Kopf hin werden die Platten zunehmend kleiner. Der Großteil der Platten besitzt eine hexagonale Form, aber auch pentagonale und heptagonale Platten sind stellenweise zu verzeichnen. Eine exakte Zählung der Platten wurde nicht durchgeführt. Yang, Naleway et al. (2015) verzeichneten in einer Studie, in welcher vier Kofferfische der Gattung *Lactoria cornuta* untersucht wurden, durchschnittlich 78% hexagonale, 15% pentagonale, 4% quadratische und 3% heptagonale Platten. Die Untersuchungen von Eigen et al. (2022) ergaben eine nicht ganz so ausgeprägte Mehrheit hexagonaler Platten von 49-55% in einer Stichprobe von 13 Fischexemplaren.



(a) Seitenansicht



(b) Frontalansicht



(c) Draufsicht mit Hervorhebung der einzelnen Platten: Die Ziffer im Zentrum beschreibt die Anzahl der Eckpunkte der Platte



(d) Untersicht

Abb. 3.2: Das Skelett des untersuchten Kofferfisches in verschiedenen Perspektiven

In der Draufsicht des Skeletts in Abb. 3.2c sind einige Platten exemplarisch hervorgehoben. In ihrem Zentrum ist die jeweilige Eckanzahl mit schwarzer Ziffer angegeben. Demnach sind zwei hexagonale, drei pentagonale und zwei heptagonale Platten annähernd symmetrisch entlang der Mittellinie des Rückens angeordnet. Die Bauchseite, die in Abb. 3.2d abgebildet ist, weist keine so eindeutige Symmetrieachse auf, jedoch sind die Platten auch hier annähernd gleichmäßig verteilt. Die Geometrie der einzelnen Platten folgt ebenfalls nicht exakter Symmetrie. Die Platten besitzen unterschiedliche Kantenlängen, die an die Gesamtheit der Plattenanordnung angepasst sind. Bis auf wenige Ausnahmen treffen stets drei Platten an einem Eckpunkt Y-förmig aufeinander.

Diese Eigenschaft wird von Nachtigall und Pohl (2013) als „Charakteristikum einer stabilen Plattenkonstruktion“ beschrieben. Die drei platonischen Körper Tetraeder, Hexaeder (Würfel) und Dodekaeder werden als Beispiele hierfür genannt. Um räumliche Stabilität zu gewähren, müssen die Platten dabei an den Rändern keineswegs starr verbunden sein. Über eine gelenkige Verbindung, welche beispielsweise beim Skelett von Seeigeln in Form von Verzahnungen vorzufinden ist, können Scherkräfte aufgenommen werden, welche die Platten ansonsten gegeneinander verschieben würden. Auf diese Weise kann aus beliebig vielen Y-förmig angeordneten Scheiben ein stabiles Raumtragwerk in Schalenform konstruiert werden. (Nachtigall und Pohl, 2013)

3.3.2 Einzelne Platten im Detail

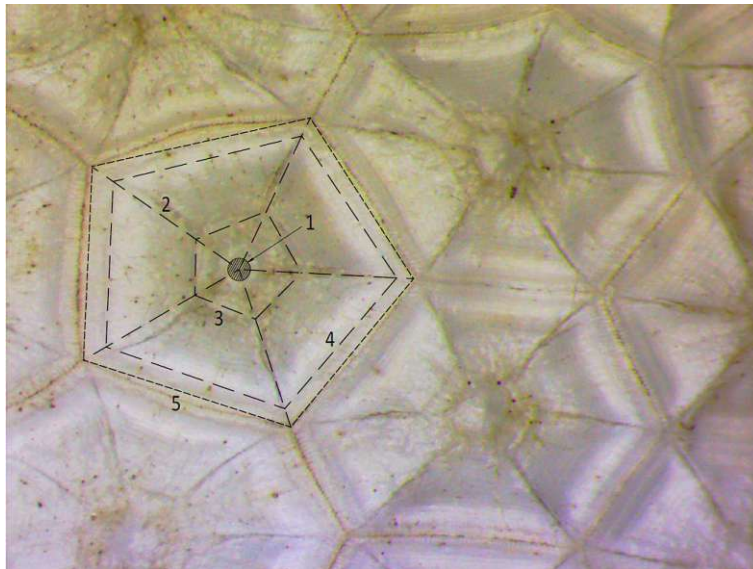


Abb. 3.3: Mikroskopisch vergrößerte Aufnahme der Platten: (1) zentraler Knoten nach außen hin zackenartig erhoben, (2) Diagonalelemente vom Kern zu den äußeren Eckpunkten, (3) innere polygonale Wandebene, (4) äußere polygonale Wandebene, (5) Plattenrand

Bei Betrachtung der einzelnen Platten im Detail fällt zunächst ein im Zentrum jeder Platte befindlicher Knotenpunkt auf, der sich nach außen hin zackenförmig abhebt. Die zackenartige Erhebung ist bei den unterschiedlichen Platten mehr oder weniger stark ausgeprägt – bei den bauchseitigen Platten ist eine sehr deutliche Spitze erkennbar, bei jenen auf der Rückenseite ist diese etwas flacher ausgebildet. Abbildung 3.3 zeigt drei Platten in vergrößerter Aufnahme unter dem Mikroskop. Die hier abgebildeten Platten befinden sich an der Oberseite des Fisches im Kopfbereich. Eine pentagonale, eine hexagonale und eine heptagonale Platte teilen an dieser Stelle einen gemeinsamen Eckpunkt. Rund um den verstärkten Knotenpunkt in der Mitte (1) verläuft ein innerer Ring (3), der in seiner Form der äußeren Plattenumrandung (5) gleicht – bei pentagonalen Platten ist dieser folglich ebenfalls fünfeckig, bei hexagonalen sechseckig, u.s.w. Bei den in Abbildung 3.3 abgebildeten Platten ist der Innenring relativ deutlich zu sehen. Bei anderen Platten wiederum ist er kaum bis gar nicht zu erkennen. In ähnlicher Weise beschreiben auch Besseau und Bouligand (1998) ein bis zwei konzentrisch verlaufende, parallel zu den Plattenrändern angeordnete polygonale Wandebenen, die senkrecht zur Plattenebene verlaufen.

Abgesehen von den dunkler gefärbten, hervorstechenden Elementen, sind über die gesamte Platte hinweg weitere dünne, konzentrische, polygonale Linien zu erkennen, welche auf einen schichtweisen Aufbau der Plattenebene hinweisen.

Vom Zentrum jeder Platte verlaufen linienförmige Diagonalelemente zu allen Eckpunkten. Diese sind räumlich nicht erhaben wie die Mittelknoten, sondern schließen annähernd eben mit der Plattenoberfläche ab. In dieser Hinsicht unterscheidet sich das vorliegende Skelettexemplar von jenen, welche von Yang, Naleway et al. (2015) untersucht wurden. Yang, Naleway et al. beschreiben nach außen erhöhte Diagonalstreben, welche sich vom zentralen Knoten zu den Eckpunkten erstrecken. Ob dieser Unterschied gattungsbedingt ist (Yang, Naleway et al. untersuchten Tiere der Gattung *Lactoria cornuta* im Gegensatz zum hier untersuchten *Ostracion cubicus*) oder andere Ursachen, wie etwa das Alter des Tieres oder dessen Umgebungsbedingungen, hat, ist an dieser Stelle nicht feststellbar.

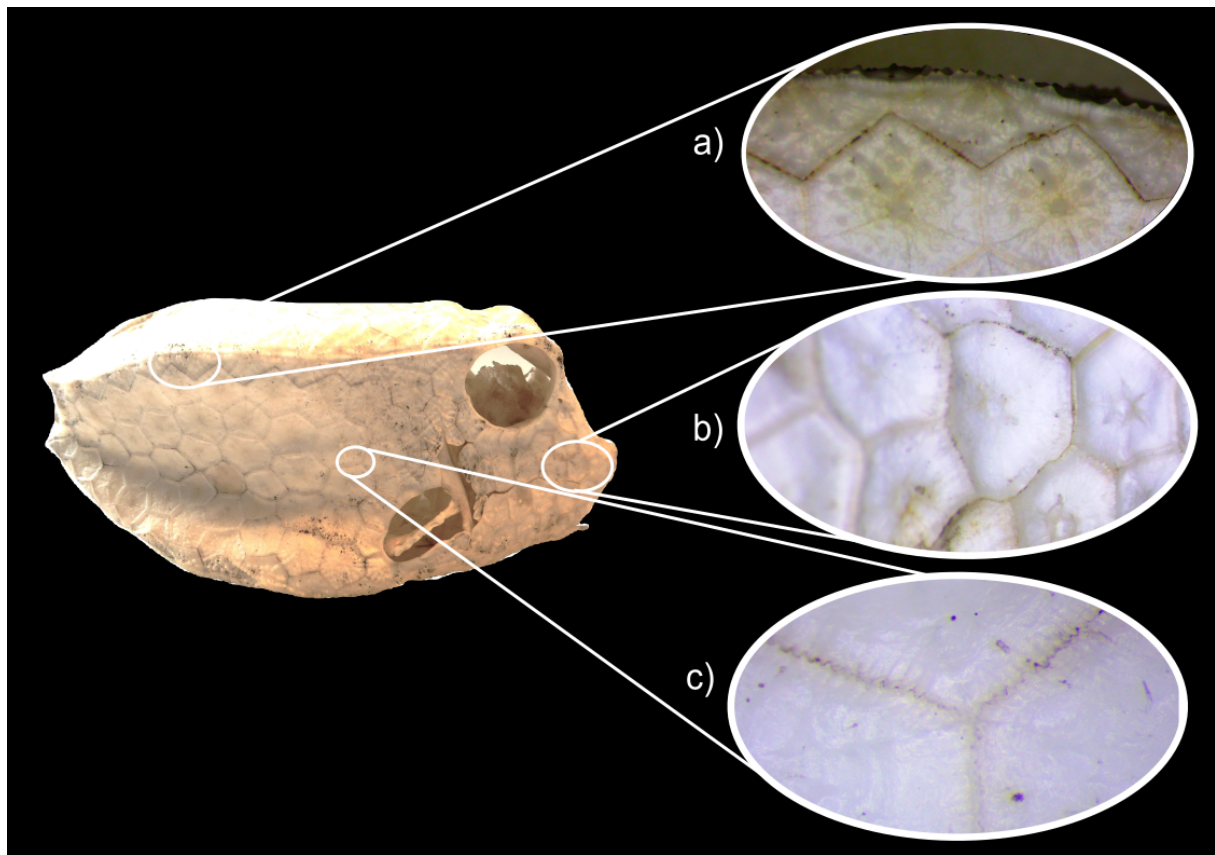


Abb. 3.4: Detailaufnahme ausgewählter Plattenausschnitte unter dem Mikroskop: a) stark gekrümmte Platten an der Kante des Skelettkörpers mit zackenartigen Erhebungen, b) nach außen erhabene Plattenränder, c) Y-förmige Verbindung von drei Platten in einem Punkt mit sichtbarer Verzahnung der Plattenränder

An ihren Rändern weisen die Platten Verzahnungen auf, wie in Abbildung 3.4c zu erkennen ist. Hier ist auch erneut der Y-förmige Zusammenstoß dreier Platten in einem Punkt verdeutlicht, welcher zusammen mit der gelenksartigen Verzahnung für die Stabilität des aus den einzelnen Platten zusammengesetzten, räumlichen Körpers sorgt.

Die Platten sind je nach Lage unterschiedlich stark gekrümmt. An Bauch und Rücken sind sie annähernd flach, wobei sie am Rücken eine leichte Wölbung nach außen aufweisen (konvex) und am Bauch tendenziell nach innen (konkav). In Abbildung 3.4b sind ebenfalls konkav gewölbte kleinere Platten im Bereich des Kopfes hervorgehoben. An dieser Stelle hebt sich die äußere Plattenumrandung entlang der Verzahnung stark nach außen hin ab. Die Diagonalstreben sind dabei nur schwach erkennbar. Im Kantenbereich des Fischkörpers sind die Platten teilweise sogar im spitzen Winkel geknickt. Entlang des Kamms ist hier eine Häufung von nach außen abstehenden Zacken zu erkennen (vgl. Abbildung 3.4a).

3.3.3 Analyse anhand des digitalen 3D-Modells

Mittels MicroCT-Scan wurde ein digitales 3D-Modell des gesamten Skelettkörpers erstellt, welches es ermöglicht, einen noch tieferen Einblick in die Skelettstruktur des Kofferfischs zu gewinnen. Abbildung 3.5 zeigt eine Aufnahme des Skelettmodells im Ganzen. Entlang der oberen Kante ist hier deutlich der gezackte Kamm (1) erkennbar, welcher auch in Abbildung 3.4a hervorgehoben ist. Die Diagonalrippen, welche sich von der Kante ausgehend zur Seiten- und Rückenebene erstrecken, stechen in diesem Bereich ebenfalls zackenartig hervor (2). Zumindest im Kantenbereich ist folglich doch eine Ähnlichkeit mit den von Yang, Naleway et al. (2015) beschriebenen Platten mit nach außen hin erhabenen Diagonalelementen zu erkennen. Der Grund, weshalb die Diagonalrippen lediglich an dieser Stelle nach außen erhaben ausgeprägt sind, ist nicht bekannt. Die Analyse des Skeletts aus statischer Sicht lässt jedoch auf folgende Vermutung schließen: Bei Betrachtung des Skelettquerschnitts als biegesteifer Rahmen treten negative Biegemomente in den Eckpunkten (also im Bereich des Kamms) auf. Diese bewirken Druckspannungen an der Innen- und Zugspannungen an der Außenseite des Skelettkorpus. Die hervorstehenden Diagonalelemente könnten folglich jeweils an der zugbeanspruchten Seite des Skeletts angeordnet sein um dort gezielt Zugkräfte abzutragen.

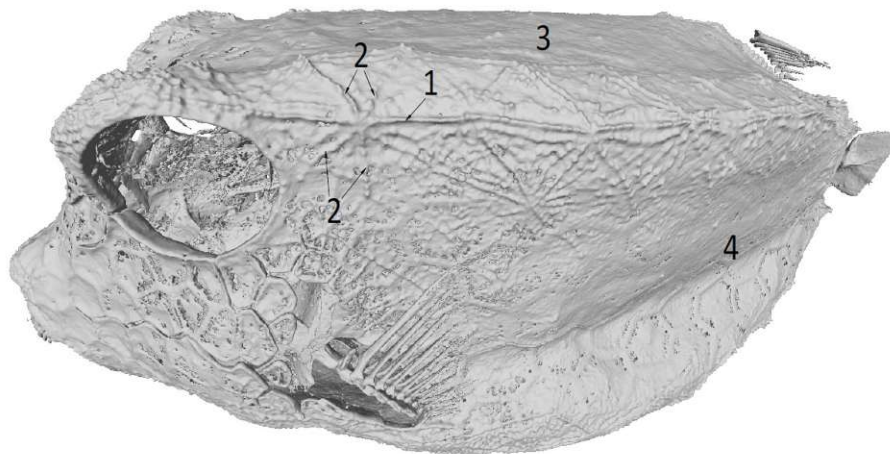


Abb. 3.5: Digitales 3D-Modell des Kofferfischskeletts: (1) zackenartiger Kamm im Kantenbereich, (2) Diagonalrippen nach außen zackenförmig erhaben, (3) Rückenbereich annähernd eben, (4) Seitenbereich annähernd eben

In den übrigen Bereichen am Rücken (3), sowie an der Seite (4) steht jedoch, wie bereits oben beschrieben, lediglich der zentrale Knotenpunkt nach außen hin hervor, wohingegen die restliche Platte annähernd eben erscheint. Hier sind nur noch die äußeren Plattenränder deutlich zu erkennen, der Verlauf der Diagonalrippen jedoch nicht.

Am aufschlussreichsten erscheint die Untersuchung des Skelettmodells von innen. Bei Betrachtung der bauchseitigen Innenansicht in Abbildung 3.6 fällt auf den ersten Blick auf, dass manche der Platten auf der Innenseite eine zweite Schale besitzen (1), die parallel zur äußeren Schale angeordnet ist und eine darunter befindliche Rippenstruktur verdeckt. Bei anderen Platten wiederum ist diese innere Schale teilweise aufgelöst (2) bis gar nicht vorhanden (3). Im letzteren Fall sind die Diagonalrippen, die sich vom Plattenzentrum zu den Eckpunkten erstrecken, am deutlichsten zu erkennen.

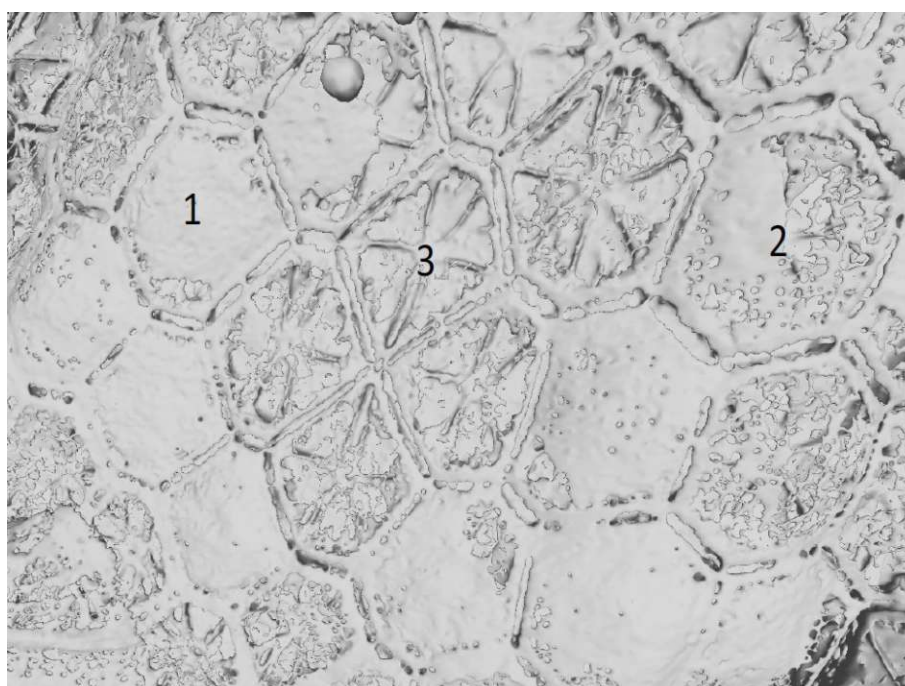


Abb. 3.6: Innenansicht der bauchseitigen Skelettplatten: (1) mit voller Innenschale, (2) Innenschale teilweise aufgelöst, (3) (annähernd) ohne Innenschale

Abbildung 3.7 zeigt die vergrößerte Aufnahme einer Platte ohne innere Schale. Einige der zentralen Elemente, welche bereits in der Mikroskopaufnahme von außen (vgl. Abbildung 3.3) sichtbar waren, sind hier wieder zu erkennen. Im Zentrum ist auch an der Innenseite ein verstärkter Knotenbereich (3) vorhanden, jedoch ist dieser hier deutlich flacher als an der Außenseite. Die Diagonalelemente (2), welche von außen größtenteils nur schemenhaft erkennbar sind, da sie dort eben mit der Platte abschließen, heben sich an der Innenseite rippenartig von der Schale ab. Der Höhenverlauf der Diagonalrippen ist in Abbildung 3.8a zu sehen. Die Rippen weisen folglich keinen konstanten Querschnitt auf, sondern steigen vom Zentrum zum Plattenrand in etwa parabelförmig an, wo sie schließlich mit ihrer maximalen Höhe an die äußeren Randelemente anschließen. Somit erweist sich die hier beobachtete Rippenstruktur als exakt gegenteilig zu jener, welche von Yang, Naleway et al. 2015 beschrieben wurde: Anstelle der Erhebung nach außen mit der maximalen Stärke im Plattenzentrum sind die Diagonalrippen hier innenseitig angeordnet

mit maximaler Höhe am Rand der Platte.

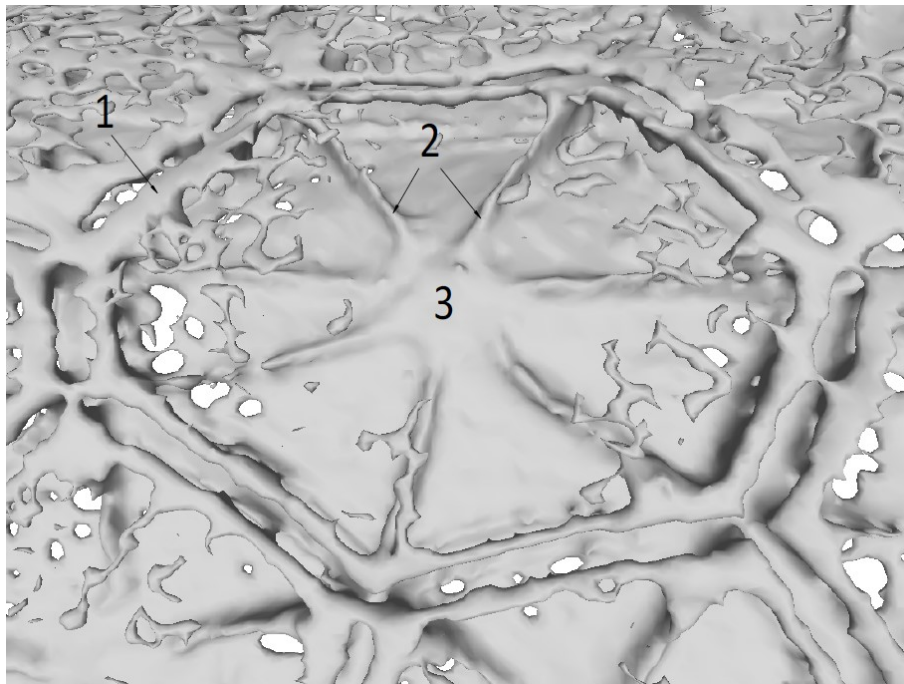
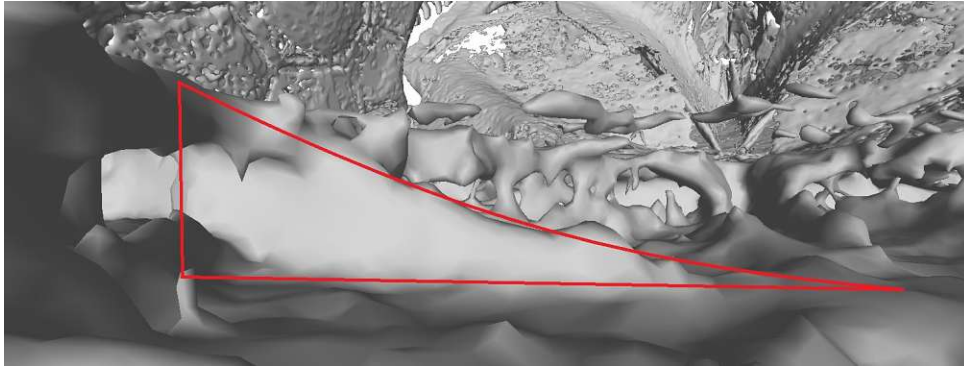


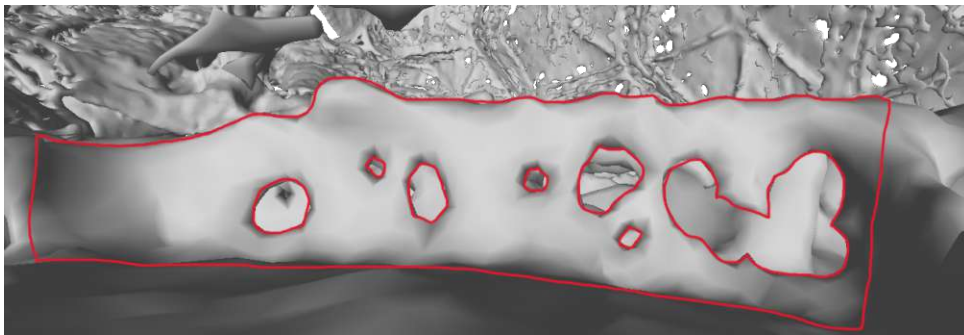
Abb. 3.7: Innenansicht einer Platte im Detail: (1) durchgehender Außenring, (2) Diagonalrippen, (3) zentraler Knoten

Ein Element, das alle Platten in jedem Fall gemeinsam haben, ungeachtet dessen ob eine innere Schale vorhanden ist oder nicht, ist ein durchgehender, polygonal geformter Außenring (Abb. 3.7 (1)), welcher sich in ähnlicher Weise wie die Diagonalrippen von der Platte abhebt. Die Außenringe benachbarter Platten sind stellenweise (vorwiegend in den Eckpunkten) miteinander verwachsen, ansonsten jedoch überwiegend durch einen Spalt voneinander getrennt. In den Ecken schließen sie an die Diagonalrippen an. In der Seitenansicht weisen die Elemente des Außenrings stark unterschiedliche Verläufe auf. Ebenso wie die Innenschale sind die von Besseau und Bouligand (1998) als „äußere Wandebene“ beschriebenen Randelemente nur stellenweise durchgehend als tatsächliche „Wand“ vorhanden. Andernorts sind diese mehr oder weniger stark durchlöchert, bis hin zu gänzlich aufgelösten Strukturen, bei denen lediglich ein schlanker Balken an der von der Außenplatte entferntesten Stelle übrig bleibt. Die Abbildungen 3.8b und 3.8c zeigen jeweils ein annähernd durchgängig wandartig ausgebildetes sowie ein stark aufgelöstes Randelement, das beinahe vollständig auf den soeben beschriebenen Balken reduziert ist. Es ist festzuhalten, dass dieser Balkenquerschnitt ausnahmslos bei allen Platten über die gesamte Länge des Außenrings durchgehend vorhanden ist, also keine einzige Unterbrechung in Längsrichtung aufweist. Dies deutet darauf hin, dass die durchgehende Verbindung im Außenring von höchster Priorität für den Kraftfluss im Skelett ist.

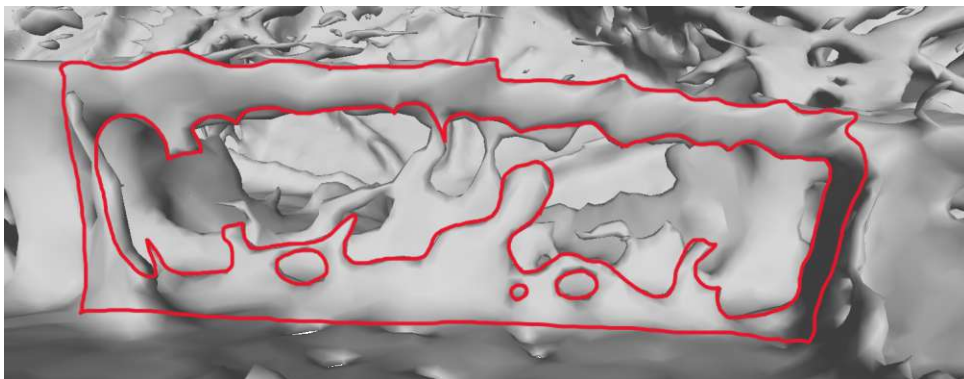
Eine innere Wandebene, wie in der Beschreibung von Besseau und Bouligand (1998) konnte bei keiner einzigen Platte gefunden werden. Das in Abbildung 3.3 (3) von außen sichtbare innere Polygon rund um den zentralen Kern deutet möglicherweise lediglich den Übergang der Diagonalrippen in die Außenschale, bzw. in die etwas dickere Kernzone, wie sie in Abbildung 3.7 (3) zu sehen ist, an.



(a) Seitenansicht der Diagonalrippe: vom Zentrum zum Randbalken hin parabelförmig ansteigend



(b) annähernd vollwandig ausgebildeter Randbalken mit wenigen Löchern im mittleren Bereich



(c) stark aufgelöster Randbalken: übrig bleibt ein durchgehender Balken am höchsten (und hier auch am tiefsten) Punkt

Abb. 3.8: Verlauf und Struktur der Diagonalrippen und Randbalken

3.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Skelettanalyse

Das Skelett des Kofferfisches besteht aus hunderten mineralischen Platten (Eigen et al., 2022), die miteinander über Verzahnungen und Collagenfasern verbunden sind (Yang, Naleway et al., 2015). Der Großteil der Platten besitzt eine hexagonale Form. Es stoßen jeweils drei Platten in einem Eckpunkt zusammen, wodurch die Konstruktion an räumlicher Stabilität gewinnt (Nachtigall und Pohl, 2013).

Die Platten sind durch drei wesentliche Elemente geprägt, welche in Abbildung 3.9 skizziert sind: eine äußere Schale (1), diagonal vom Zentrum zu den Eckpunkten verlaufende, annähernd dreiecksförmige Rippen (2), welche die Platte an der Innenseite unterstützen, sowie ein ebenfalls an der Innenseite angeordneter umlaufender Ring aus mehr oder weniger stark aufgelösten Randbalken (3a, 3b), welche in den Eckpunkten mit den Diagonalrippen verbunden sind. Weitere Elemente, die nur bei manchen Platten zu finden sind, sind ein nach außen erhobener Zacken (4) im Plattenzentrum, sowie eine innenliegende zweite Platte (5), die parallel zur äußeren Schale verläuft.

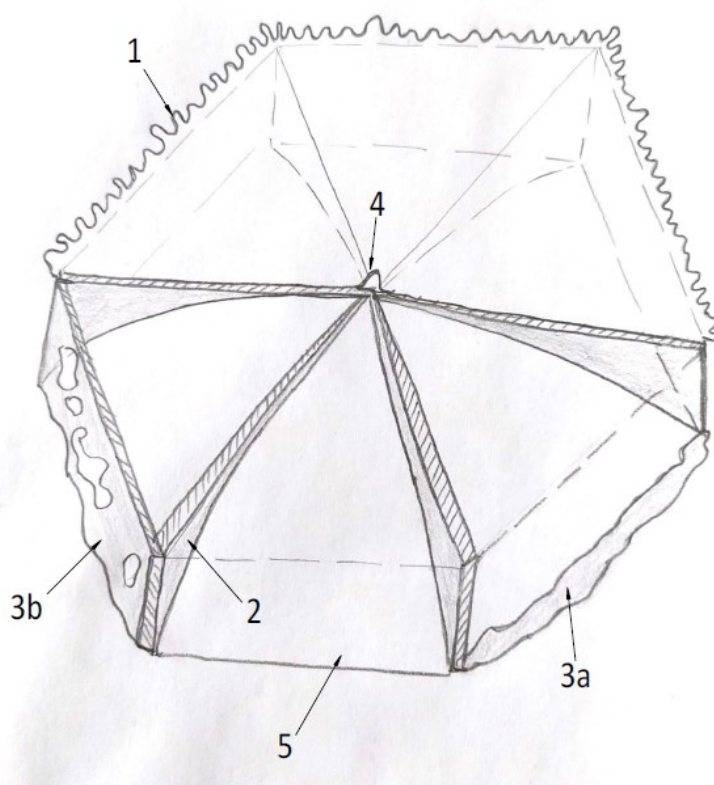


Abb. 3.9: Skizze einer hexagonalen Skelettplatte: (1) äußere Platte mit Verzahnungen an den Rändern, (2) parabelförmige Diagonalrippe, (3a) aufgelöster Randbalken, (3b) annähernd vollwandig ausgebildeter Randbalken, (4) Kern mit spitzer Erhebung nach außen, (5) innere Platte

Kapitel 4

Tragwerksfindung und statische Analyse einer gevouteten Platte in Anlehnung an das Skelett des Kofferfischs

4.1 Geometrische Randbedingungen und Belastung

Das Ziel vorliegender Untersuchungen ist es, anhand der Geometrie der Platten des Kofferfischs, ein Tragwerk aus Beton zu finden, dessen benötigte Betonkubatur, durch günstige Wege der Kraftableitung und optimale Ausnutzung der Querschnitte, auf ein Minimum reduziert werden kann. Es wird davon ausgegangen, dass dadurch die Umweltbelastung im Vergleich zu herkömmlichen Tragwerken aus Stahlbeton gesenkt werden kann. In Bereichen, in denen Zugkräfte auftreten, soll der Beton notwendigenfalls durch Textilbewehrung unterstützt werden. Dadurch ist es möglich, die Abmessungen der Betonelemente schlanker zu halten als dies beim Einsatz herkömmlicher Stahlbewehrung der Fall wäre.

Vereinfacht wird ein einzelnes hexagonales Plattenelement betrachtet. Ähnlich wie die Platten des Kofferfischs könnten die einzelnen Elemente in späterer Folge modular zu einem größeren Tragwerk zusammensetzbar sein. Details zum Anschluss der Elemente untereinander, sowie die Wirkung eines aus mehreren Platten zusammengesetzten Tragwerks sind nicht Teil dieser Arbeit. Die äußeren Abmessungen der Platte wurden so gewählt, dass ein Element im Fall einer werkseitigen Fertigteileproduktion noch per LKW transportabel ist. Dementsprechend wurde der Umkreisradius des Hexagons auf 2 m festgelegt. Dies ergibt einen maximalen Durchmesser der Platte von 4 m (von Ecke zu gegenüberliegender Ecke) und einen minimalen Durchmesser von 3,464 m (von Kante zu gegenüberliegender Kante). Die Geometrie der Platte ist in Abb. 4.1a ersichtlich.

Als mögliche Einsatzbereiche der Platte sind etwa Decken-, Dachkonstruktionen oder pavilionartige Konstruktionen denkbar. Die nachfolgenden Untersuchungen dienen dem Vergleich des Verhaltens verschiedener Plattengeometrien unter Einwirkung ihres Eigengewichts sowie einer Einheitsbelastung von 1 kN/m^2 und sind nicht als vollständige Bemessung eines Endprodukts zu betrachten.

Die Belastung sowie die Lagerungsbedingungen sind in Abb. 4.1b dargestellt. An allen sechs Eckpunkten wird die Platte in vertikaler Richtung durch gelenkige, horizontal verschiebliche Punktlager gehalten. Um das Objekt im Raum zu fixieren wurde ein einzelnes nur in vertikaler Richtung verschiebliches Punktlager eingefügt, welches die Verschiebung des Gesamttragwerks in horizontaler Richtung verhindert. Dieses wurde im Zentrum der Platte angeordnet um (annähernd) rotationssymmetrische Schnittgrößen in der gesamten Konstruktion zu erhalten. Das Lagerungssystem ist vergleichbar mit einer Lagerung auf sechs Einzelstützen an den Eckpunkten,

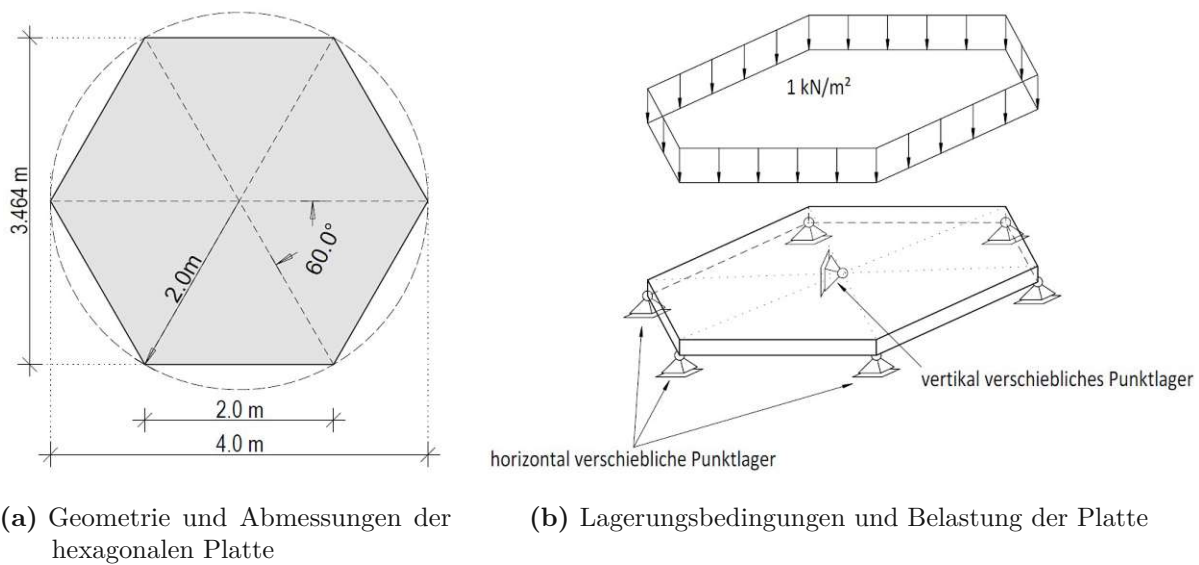


Abb. 4.1: Modellannahmen der untersuchten hexagonalen Platte

wobei anzumerken ist, dass deren tatsächliches Nachgiebigkeitsverhalten von den idealisierten Annahmen im Modell abweicht. Das Knotenlager im Zentrum dient lediglich der Berechnung im Modell und ist nicht als reales Lager anzusehen.

Die Dicke der Betonplatte wird im Zuge der statischen Berechnungen ausgehend von einer Minimalstärke von 3 cm variiert. Diese ergibt sich als minimale Dicke, bei der Textilbeton ohne Probleme im Gießverfahren hergestellt werden kann. Die Platte wird an der Unterseite von Betonrippen unterstützt, welche jeweils vom Zentrum zu den sechs Eckpunkten verlaufen. Die Breite der Diagonalrippen wird über deren gesamte Länge mit 3 cm konstant gehalten. Die Auswirkungen einer Verbreiterung der Rippen zum Rand hin werden nicht analysiert. Jedoch wird die Höhe des Diagonalrippenquerschnitts am Rand variiert (vgl. Abbildung 3.8a, wo sich die Diagonalrippen des Kofferfischs vom Rand zum Zentrum verzüngen).

Entlang des äußeren Rands der Platte verläuft beim Skelett des Kofferfischs ein balkenartiger Ring, welcher an den Eckpunkten mit den Diagonalrippen zusammen trifft. Dieser besitzt eine stark aufgelöste Struktur mit einigen Hohlstellen und ist nur an der am weitesten von der Platte entfernten Faser vollständig durchgehend ausgebildet (vgl. Abbildungen 3.8b und c). An dieser Stelle ist der Ring auch dicker als im dazwischenliegenden, löchrigen Wandbereich. In einem ersten Ansatz wurde dieser Ring stark vereinfacht als durchgehende Betonrippe modelliert und deren Höhe und Breite passend zu den Querschnittsabmessungen der Diagonalrippen am Rand variiert.

Die ersten Modellierungsversuche des gesamten Elements bestehend aus Platte und Rippen sind in Abb. 4.2 dargestellt. Am stärksten simplifiziert ist jene Platte in Abbildung 4.2a, bei der die Diagonalrippen einen konstanten Querschnitt über die gesamte Länge aufweisen. Abbildung 4.2b zeigt eine Variation, bei der die Diagonalrippen sich im Zentrum auf theoretisch infinitesimale Höhe verzüngen und in die Platte übergehen. Für die statische Berechnung wurde aber jener Prototyp aus Abb. 4.2c herangezogen, bei welchem die Diagonalrippen im Zentrum einen minimalen Querschnitt von 3 x 3 cm aufweisen.

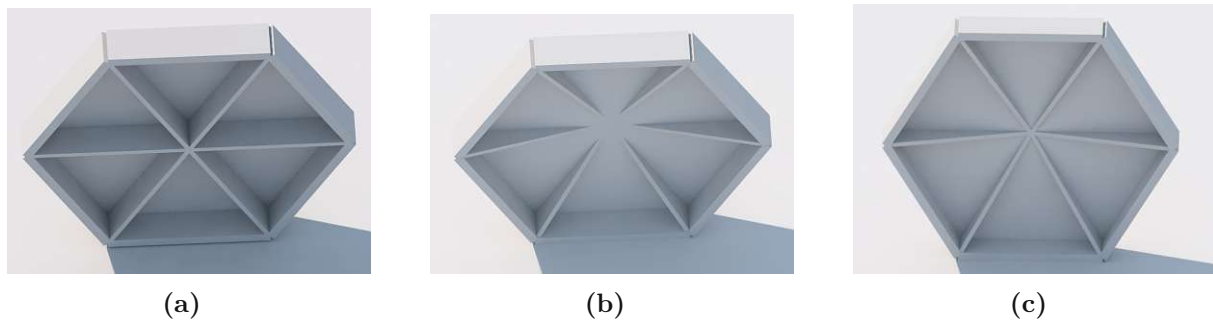


Abb. 4.2: Plattenuntersicht einiger Plattenprototypen mit unterschiedlicher Rippengeometrie (nicht maßstäblich): a) Rippen mit konstantem Querschnitt, b) Diagonalrippen zum Zentrum verjüngt, c) Diagonalrippen verjüngt mit Minimalquerschnitt im Zentrum

4.2 Analyse der Schnittgrößen in den Diagonal- und Randrippen und Anpassung des Modells für die Randrippen

Der Normalkraft- und Biegemomentenverlauf der Rippen ist für beliebige Rippenabmessungen qualitativ in Abb. 4.3 dargestellt, wobei exemplarisch jeweils eine Rand- und eine Diagonalrippe hervorgehoben sind. Die Schnittgrößen in den übrigen Rippen sind aufgrund der Axialsymmetrie des Systems ident. Es ist zu erkennen, dass in den Diagonalrippen sowohl Zug- als auch Drucknormalkräfte wirken. Die Druckkraft nimmt vom Rand zum Zentrum verlaufend ab und geht in eine Zugkraft über. Der Maximalwert der Zugkraft tritt direkt im Zentrum auf. Der konkrete Verlauf der Druck-, bzw. Zugkraft wird maßgeblich von der Steifigkeit des Außenrings beeinflusst. Ein steiferer Außenring führt zu höheren Druckkraftkomponenten am Rand und verringert die Zugkraft im Zentrum. Der äußere Rippenring ist hingegen ausschließlich durch Zugkräfte beansprucht, welche die nach außen drückenden Diagonalrippen über einen Ringschluss zusammen halten.

Die Randrippen als reinen Betonquerschnitt zu bemessen erscheint an dieser Stelle nicht sinnvoll, da selbst hochfester Beton sehr rasch an die Grenzen seiner Zugfestigkeit stößt. Zur Verstärkung des Querschnitts besteht die Möglichkeit Textilbewehrung in die Randrippen einzubetten, welche die Zugkräfte übernimmt. Auf diese Weise kann der Betonquerschnitt der Randrippen schlanker ausgeführt werden als bei der Verwendung einer Bewehrung aus Betonstahl.

Von nicht vernachlässigbarer Größenordnung ist auch das Biegemoment in den Rippen. In den Randrippen ergibt sich ein annähernd konstanter Biegemomentenverlauf mit geringer Zunahme in der Mitte. In den Diagonalrippen geht das im Randbereich negative Biegemoment zum Zentrum in ein positives über, wobei ein stark ausgeprägtes Maximum an den Eckpunkten zu erkennen ist. Dieses ergibt sich modellbedingt aus der Exzentrizität zwischen der Schwerachse des Zugstabes und der Diagonalrippe.

Der Grundgedanke in diesem Abschnitt ist es, eine möglichst schlanke Betonkonstruktion zu entwickeln, die bestmöglich die Stärken des Betons bei Beanspruchung auf Drucknormalkräfte ausnutzt. Solch filigrane Strukturen sind allerdings formbedingt nicht darauf ausgelegt großen Biegebeanspruchungen standzuhalten. Es ist daher zielführend, das Biegemoment durch eine günstige Wahl der Konstruktionselemente zu minimieren.

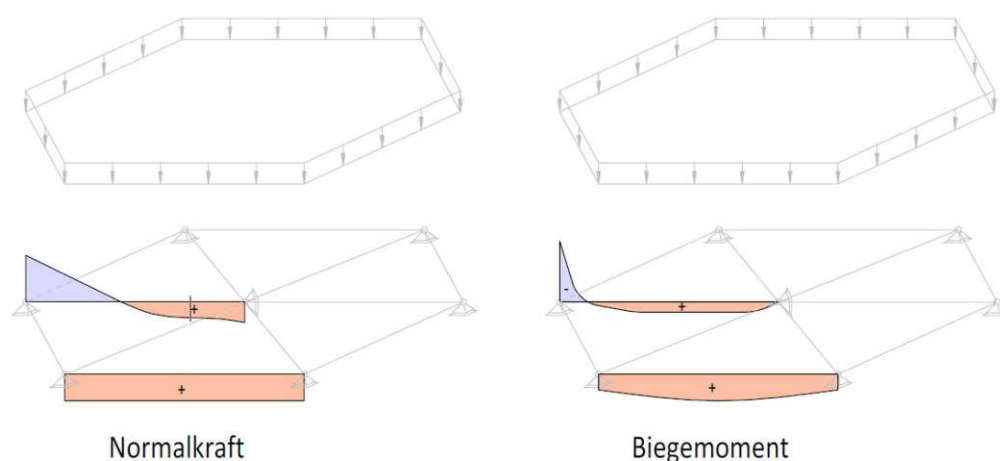


Abb. 4.3: Schematischer Schnittgrößenverlauf der Normalkraft und des Biegemoments einer Diagonal- und Randrippe unter konstanter Flächenlast (nicht maßstäblich)

Wie bereits erwähnt, hängt die Schnittgrößenverteilung im Allgemeinen von der Steifigkeit des außenliegenden Zugrings ab. Im Fall eines stark nachgiebigen Zugrings entstehen große Verformungen der Platte. Die Ableitung der Kräfte erfolgt vorwiegend über Biegetragwirkung, aus welcher unter anderem die Zugspannungen im Zentrum resultieren. Je steifer der Ring ist, desto weniger Durchbiegung erfährt die Platte und eine Druckbogenwirkung kann sich entfalten. Dadurch sinkt die Zugbelastung der Diagonalrippen im Zentrum, während die Druckkräfte ansteigen. Folglich ist es sinnvoll eine möglichst steife Struktur für den Zugring am Rand zu wählen. Eine einfache Vergrößerung des Betonquerschnitts der Randrippen, welche formal eine Erhöhung der Dehnsteifigkeit (EA) bewirkt, wäre an dieser Stelle jedoch ungenügend, da der Beton im gerissenen Zustand keinen maßgebenden Beitrag zur Dehnsteifigkeit leistet. Da Textilbewehrung wegen ihrer hohen Festigkeit üblicherweise nur in geringen Mengen, also mit einer geringen Querschnittsfläche, eingesetzt wird, weist diese trotz ihres vergleichsweise hohen Elastizitätsmoduls, ebenfalls keine übermäßig große Dehnsteifigkeit auf. Alternativ wird für die Verstärkung des Zugrings daher ein Spannglied aus Spannstahl gewählt. Dieses bringt den zusätzlichen Vorteil, dass es vorgespannt werden kann, was den Durchbiegungen der Platte entgegenwirkt und die Lastabtragung über Drucknormalkräfte begünstigt.

Stellvertretend für die Spannglieder werden im statischen Modell Stahl-Rundstäbe, deren Tragwirkung rein auf Normalkräfte beschränkt wird, implementiert. Deren Dehnsteifigkeit hängt dabei maßgeblich von ihrer Querschnittsfläche ab. Um den Einfluss unterschiedlich hoher Steifigkeiten auf die resultierende Schnittgrößenverteilung zu untersuchen, wird im späteren Verlauf der Arbeit (4.3.2) der Durchmesser der Stahl-Rundstäbe zwischen 6, 10 und 14 mm variiert. Mit einem Elastizitätsmodul des Spannstahls von 195.000 N/mm^2 (für Litzen lt. *ÖNORM-EN-1992-1-1:2015*) ergeben sich daraus Dehnsteifigkeiten von rund 5.500 bis 30.000 kN. Um eine Mitwirkung des Betons auszuschließen, wird der Betonquerschnitt der Randrippen nicht modelliert.

Wie in Abb. 3.8c ersichtlich ist der äußere Rippenring beim Skelett des Kofferfischs nicht durchgehend ausgebildet, sondern enthält einige Hohlstellen oder ist stellenweise sogar komplett aufgelöst. Einzig in der am weitesten von der Platte entfernten Faser ist der Zugring durchgängig vorhanden und weist hier einen dickeren Querschnitt auf. In Anlehnung daran werden die Stahlstäbe daher exzentrisch zum Plattenrand nach unten versetzt, sodass sie am unteren

Ende der Diagonalrippen anschließen. Zwischen Platte und Zugring befindet sich folglich ein Spalt. Es ist festzuhalten, dass der Abstand zwischen Zugring und Platte maßgeblichen Einfluss auf die Schnittgrößenverteilung hat. Die günstigsten Normalkraftverläufe resultieren eben aus der Maximierung des Abstands, also der Anordnung des Zugrings am unteren Diagonalrippenrand. Dies bestätigt die belastungsoptimierte Wandstruktur des Kofferfischskeletts. Die finale Geometrie der Platte mit Diagonalrippen aus Beton und dem Zugring aus Stahlstäben ist in Abb. 4.4 veranschaulicht. Es ist anzumerken, dass die Platte dadurch entlang ihrer Außenkante nicht mehr auf Rippen aufliegt und die daraus resultierende stützende Wirkung im Modell nicht berücksichtigt werden kann. Die Plattenschnittgrößen, die aus vorliegender Modellberechnung entstehen, weichen daher von den gegebenenfalls in einer realen Konstruktion mit durchgängigen, außenliegenden Betonrippen auftretenden Schnittgrößen ab.

Bei Verwendung von externen Spanngliedern mit geeignetem Korrosionsschutz ist es auch denkbar, gänzlich auf eine Betonummantelung des Zugrings zu verzichten. Auf diese Weise könnte eine bedeutende Menge an Betonkubatur eingespart, das Eigengewicht der Konstruktion reduziert und der CO₂-Ausstoß bei der Produktion verringert werden.

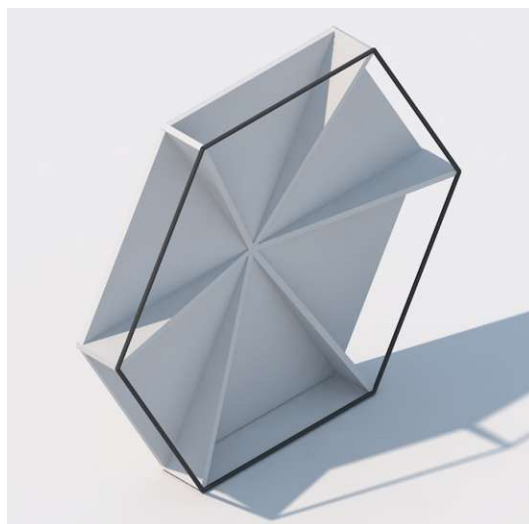


Abb. 4.4: Prototyp einer Platte mit Diagonalrippen aus Beton (weiß) und exzentrisch angeordneten Stahl-Rundstäben als äußere Zugelemente (grau)

4.3 Analyse des Systemverhaltens bei Variation der geometrischen Abmessungen

Im Folgenden werden die eingangs als variabel definierten geometrischen Abmessungen, also die Plattendicke, die Höhe der Diagonalrippen am Rand, sowie der Durchmesser des Zugglieds am Rand, variiert und deren Auswirkung auf das Systemverhalten analysiert. In Abbildung 4.5 sind sechs verschiedene Platten abgebildet: jeweils drei mit einer Dicke von 3 cm bzw. 5 cm, deren Rippenhöhe am Rand 10, 20 bzw. 30 cm beträgt. Die Zugglieder besitzen in diesem Abschnitt einen einheitlichen Durchmesser von 10 mm. Der vertikale Versatz der Zugglieder von der Platte ist dabei an die jeweilige Rippenhöhe angepasst, sodass die Zugglieder bündig mit der Rippenunterkante abschließen. Als Systemantwort werden die Durchbiegung, die Plattenspannungen sowie

die Normalkräfte und Biegemomente in den Rippen untersucht. Als Referenz-Plattenspannung wird die Hauptspannung σ_1 herangezogen, welche die Maximalwerte der Spannung in jedem Flächenelement darstellt.

Im Anschluss erfolgt eine analoge Analyse unter Variation des Zugglieddurchmessers zwischen 6, 10 und 14 mm bei ansonsten konstanten geometrischen Abmessungen mit einer Plattendicke von 3 cm und Rippenhöhen von 20 cm am Rand (siehe Abbildung 4.6). Die Schnittgrößen und Verformungen resultieren jeweils aus der Belastung durch das Eigengewicht sowie einer zusätzlichen Flächenlast von 1 kN/m².

4.3.1 Variation von Plattendicke und Rippenhöhe

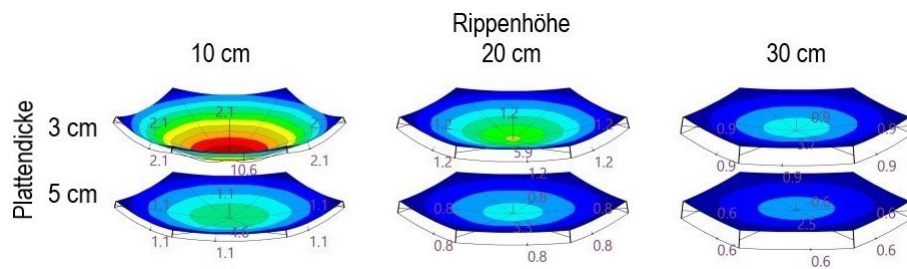
Anfängliche Überlegungen, dass über die Rippenhöhe der Tragmechanismus in den Rippen maßgeblich gesteuert werden kann, wobei höhere Rippen steilere Lastabtragungswinkel ermöglichen und somit die Lastabtragung über Drucknormalkräfte anstelle von Biegung begünstigen, konnten mit der durchgeführten Parametervariation nicht bestätigt werden. Wie in Abbildung 4.5c zu erkennen ist, wächst mit zunehmender Rippenhöhe zwar die Drucknormalkraft am Rand der Diagonalrippen, während die Zugkraft im Zentrum sinkt, doch im Allgemeinen überwiegt weiterhin die Zugbeanspruchung in den Diagonalen. Aufgrund der Gefahr des Ausbeulens schlanker, druckbeanspruchter Bauteile wurden höhere Rippen von der Modellierung ausgeschlossen. Darüber hinaus zeigt der Vergleich mit den Diagonalelementen im Skelett des Kofferfisches, dass die Rippen dort in der Regel ebenso verhältnismäßig flache Winkel mit der Plattenebene einschließen. Die Rippe in Abbildung 3.8a zum Beispiel verläuft in einem Winkel von rund 15° von der Platte zu den Randbalken. Es lässt sich daraus schließen, dass die Steifigkeit des Zugringes nicht ausreichend ist um die (vollständige) Ausbildung eines Druckbogens zu ermöglichen. Die Biegetragwirkung überwiegt bei weitem.

Zuletzt wird in Abbildung 4.5d gezeigt, dass mit zunehmender Rippenhöhe das Biegemoment in den Diagonalen, insbesondere im Randbereich, steigt. Dieses Moment ergibt sich modellbedingt aus der Exzentrizität zwischen der Schwerachse des Zugstabes und der Rippe, und erhöht sich sinngemäß mit größer werdender Exzentrizität bei höherer Rippenhöhe, aber auch durch höhere Normalkräfte in den Rippen.

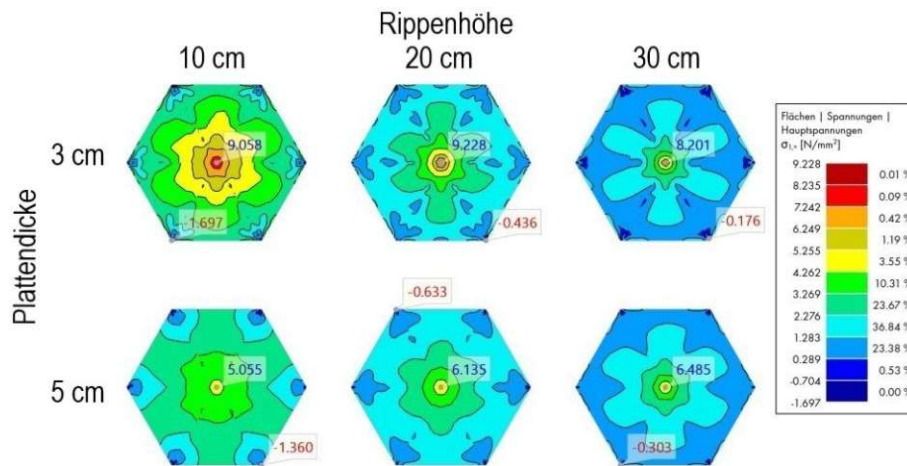
Bei Betrachtung der Verformungen, welche in Abbildung 4.5a dargestellt sind, ist zu erkennen, dass jene Platten mit höheren Diagonalrippen geringere Durchbiegungen aufweisen. Je höher der Rippenquerschnitt ist, umso größer ist die Steifigkeit des „Plattenbalkens“ und somit der Widerstand gegenüber Verformungen um die horizontale Achse, was die Durchbiegung des gesamten Systems reduziert.

Entgegen den Erwartungen bedeuten geringere Durchbiegungen jedoch nicht allgemein geringere Zugspannungen an der Plattenunterseite. Abbildung 4.5b zeigt, dass mit steigender Rippenhöhe eine Konzentration der Zugspannungen auf das Plattenzentrum statt findet. Der zugbeanspruchte Bereich ist in Summe zwar kleiner, jedoch steigen die Spannungsspitzen im zentralen Punkt an, wie in der unteren Zeile von Abbildung 4.5b, bei den 5 cm dicken Platten zu erkennen ist. Die Druckspannungen an der Plattenoberseite verlaufen analog zu den Zugspannungen an der Unterseite. Auch diese sind mit steigender Rippenhöhe zunehmend um das Plattenzentrum konzentriert, mit Spitzenwerten direkt in der Mitte. Diese Spannungsspitzen erklären möglicherweise die zackenförmige Ausbildung des Kofferfischeskeletts (vgl. Abbildungen 3.3 und 3.9). Dieses weist im jeweiligen Plattenzentrum eine nach außen erhabene Verstärkung auf, vermutlich, um die

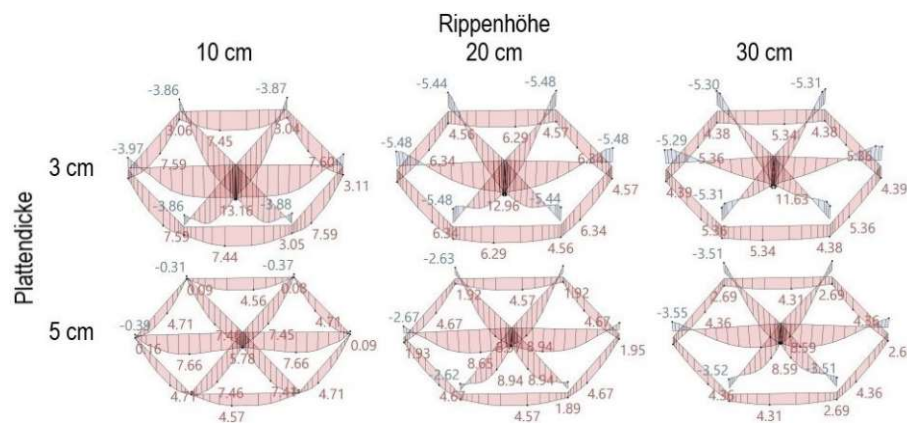
4.3 Analyse des Systemverhaltens bei Variation der geometrischen Abmessungen



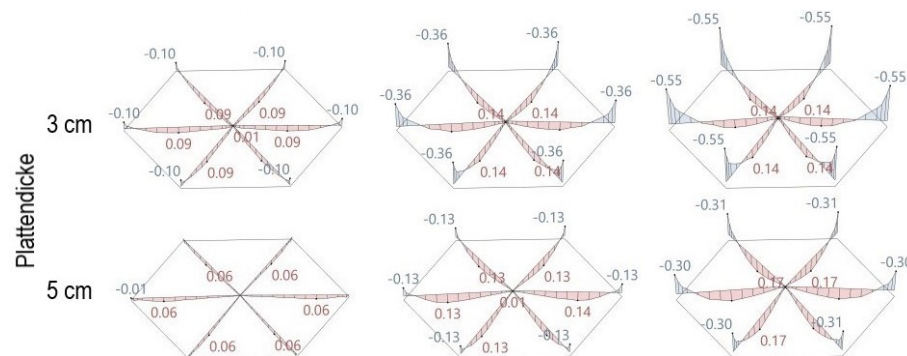
(a) Durchbiegung in mm



(b) Normalspannung an der Plattenunterseite in N/mm^2



(c) Normalkraft in kN



(d) Biegemoment in kNm

Abb. 4.5: Verformungen des Gesamtsystems (a), Plattenspannungen σ_1 (b) und Schnittgrößen in Rippen und Zugring (c,d) bei Variation von Plattendicke und Rippenhöhe

lokal auftretenden hohen Spannungen abtragen zu können.

Die im Modell auftretenden Spitzenwerte der Zugspannungen übersteigen rasch die vergleichsweise geringe Zugfestigkeit des Betons. Um dem gegenzusteuern, kann die Dicke der gesamten Platte erhöht werden. Durch die damit einhergehende Steifigkeitserhöhung werden wiederum geringere Durchbiegungen und geringere Spannungen, auch im Plattenzentrum, erzielt. Dieser Ansatz wird unter anderem in Kapitel 4.5 verfolgt, wo es um die Optimierung einer ausgewählten Plattenkonstruktion geht. Es ist aber anzumerken, dass auf diese Weise eine große Mehrmasse an Beton benötigt wird, die in den gering belasteten Randbereichen der Platte ansonsten nicht notwendig wäre. Alternativ könnte zur Aufnahme der Zugspannungen gezielt Textilbewehrung im hochbelasteten Bereich um das Zentrum der Platte eingesetzt werden. Jener Ansatz entspräche eher dem natürlichen Prinzip des belastungsoptimierten Materialeinsatzes. Eine detaillierte Bemessung textilbewehrter Betonplatten wird im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht durchgeführt und sei an dieser Stelle nur als Anregung für zukünftige Optimierungsstrategien angemerkt.

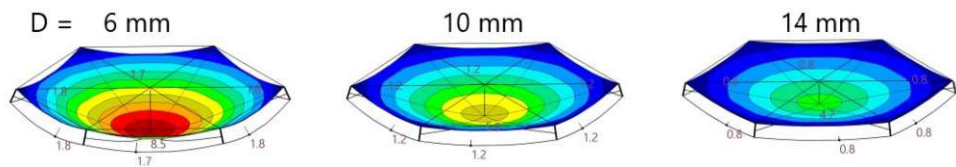
Die Erhöhung der Plattendicke führt weiters zu einer Reduktion aller in Abbildung 4.5c und d dargestellten Rippenschnittgrößen. Die Verringerung der Absolutwerte der Zug- und Drucknormalkräfte resultiert in einer noch deutlicheren Dominanz der Zugkräfte in den Diagonalen. Auch hier erweist sich die Verstärkung der Rippen durch textile Bewehrungselemente als sinnvoll. Eigene Vergleichsrechnungen zeigen, dass Maßnahmen zur Reduktion der Zugspannungen in den Rippen, zum Beispiel in Form einer Erhöhung des Betonvolumens der Konstruktion (Erhöhung der Plattendicke oder des Rippenquerschnitts am Rand), in Summe negative Auswirkungen auf das GWP der Gesamtkonstruktion haben. Es ist folglich umweltfreundlicher beim Beton zu sparen als bei der Textilbewehrung.

4.3.2 Variation des Spannglieddurchmessers

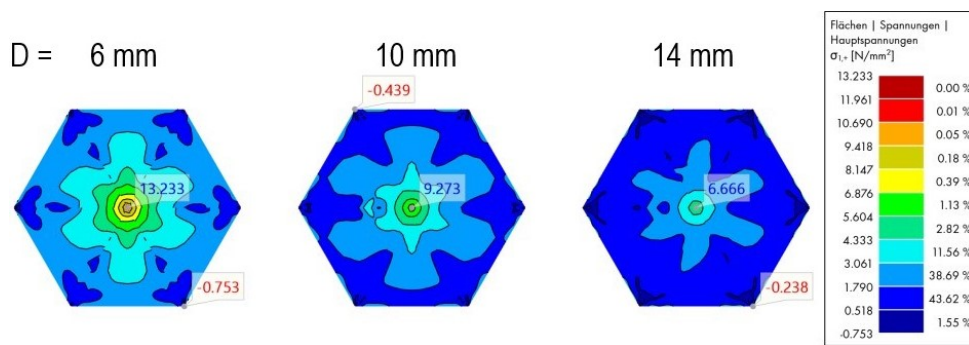
Eine Erhöhung der Systemsteifigkeit kann weiters durch eine Steifigkeitserhöhung des Spannglieds im Zugring erfolgen. Diese kann über den Spannglieddurchmesser gesteuert werden. Abbildung 4.6 zeigt die daraus resultierenden Auswirkungen auf die Schnittgrößen und Verformungen. Die drei abgebildeten Platten besitzen jeweils eine Dicke von 3 cm und eine Rippenhöhe von 20 cm. Der Durchmesser des Zugglieds variiert zwischen 6, 10 und 14 mm. Je steifer das Zugglied ist, desto geringer sind die Durchbiegungen sowie die Zugspannungen über die gesamte Platte. Im Unterschied zur Erhöhung der Steifigkeit durch eine Erhöhung des Rippenquerschnitts, sinken bei Vergrößerung des Spannglieddurchmessers auch die Spannungsspitzen im Zentrum der Platte. Für die Schnittgrößen in den Rippen bedeutet ein größerer Spannglieddurchmesser eine Verringerung der Zugnormalkräfte im Zentrum und eine Erhöhung der Druckkräfte am Rand. Mit höherer Zuggliedsteifigkeit kann sich demnach die Druckbogenwirkung zunehmend entfalten.

Das Biegemoment in den Diagonalen resultiert, wie bereits erwähnt, aus der modellbedingten Exzentrizität zwischen den Schwerlinien der Diagonalen und der Zugglieder. Je größer die Normalkraft in den Diagonalen ist, desto größer ist auch das Biegemoment bei gleich bleibender Exzentrizität.

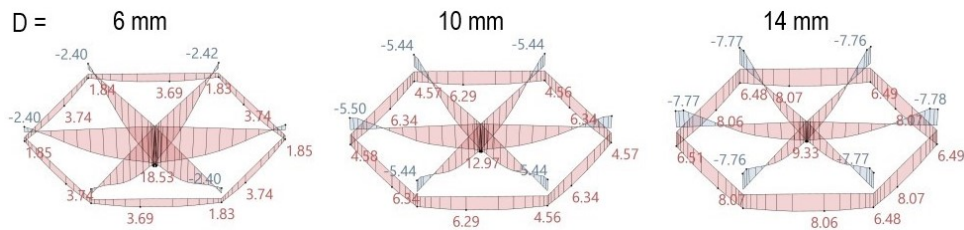
4.3 Analyse des Systemverhaltens bei Variation der geometrischen Abmessungen



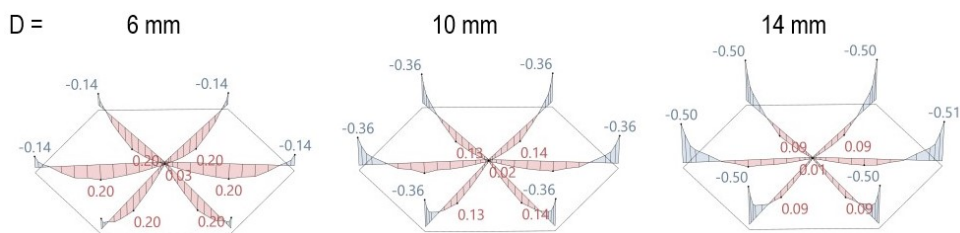
(a) Durchbiegung in mm



(b) Normalspannung σ_1 an der Plattenunterseite in N/mm²



(c) Normalkraft in kN



(d) Biegemoment in kNm

Abb. 4.6: Variation des Zugglieddurchmessers bei konstanter Plattendicke (3 cm) und Rippenhöhe (20 cm)

4.4 Aufbringen einer Vorspannkraft auf den äußeren Zugring aus Spannstahl und Variation der Größe der Vorspannkraft

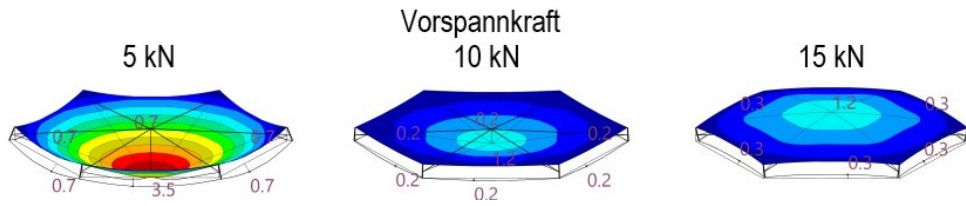
Eine materialsparende Alternative zur gezielten Steuerung der Schnittgrößen und Verformungen ist das Vorspannen der Spannglieder im äußeren Zugring. Über die Vorspannung kann der Druckbogen aktiviert werden, was die Durchbiegungen der Konstruktion unter Eigengewicht und Flächenlast verringert. Abbildung 4.7 gibt einen Überblick über das Systemverhalten unter der kombinierten Einwirkung von Eigengewicht, Flächenlast und Vorspannung bei drei unterschiedlich großen Vorspannkraften (5, 10 und 15 kN). Alle zuvor variierten geometrischen Abmessungen sind für den vorliegenden Vergleich konstant gehalten: die Plattendicke beträgt 3 cm, die Rippenhöhe am Rand 10 cm und der Durchmesser der Spannglieder 10 mm.

In Abbildung 4.7a sind die Durchbiegungen der Platten zu sehen. Im theoretischen Zustand reiner Vorspannung ohne Berücksichtigung von Eigengewicht und Flächenlast erfährt die Platte eine Wölbung nach oben, die sich proportional zur Größe der Vorspannkraft verhält. Bei Überlagerung der Systemantwort unter Vorspannung mit jener in Kapitel 4.3.1 beschriebenen unter Eigengewicht und Flächenlast, gleichen die vertikalen Durchbiegungen einander mehr oder weniger stark aus. Ist die Vorspannkraft zu groß gewählt, überwiegt die Aufwölbung selbst im überlagerten Zustand. Im angeführten Beispiel geschieht dies bereits bei einer Vorspannkraft von 15 kN. Derartige Zustände sind kritisch zu betrachten, da sie bedeuten, dass im Zuge des Vorspannens beim Herstellungsprozess, wenn die Konstruktion lediglich durch ihr Eigengewicht belastet ist, sehr ungünstige Spannungszustände in der Platte auftreten. In diesem Fall entstehen Zugspannungsspitzen an der Plattenoberseite, was gegebenenfalls bei der Bewehrungsführung zu berücksichtigen ist.

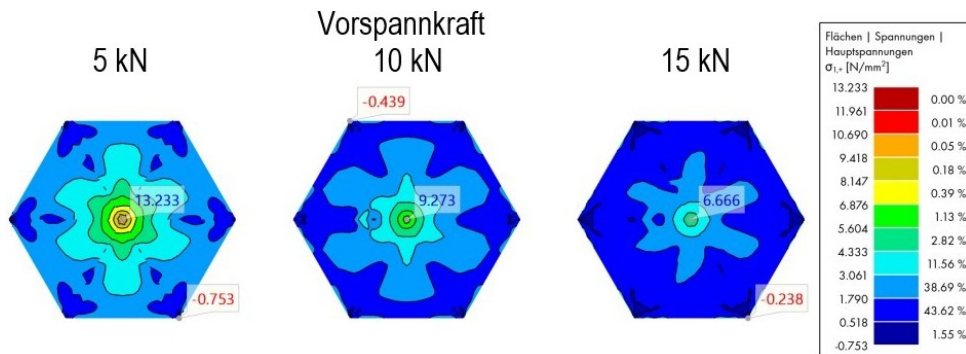
Abbildung 4.7b zeigt den Verlauf der Spannungen σ_1 an der Plattenunterseite. Beim Vergleich mit den Ergebnissen einer Platte mit der selben Geometrie, aber ohne Vorspannung, aus Abbildung 4.5b (Platte in der ersten Zeile, zweiten Spalte) ist zu erkennen, dass durch die Vorspannung die Zugspannungsspitzen im Kern reduziert werden können. Je nach Größe der Vorspannkraft konzentrieren sich die zugbeanspruchten Zonen tendenziell auf den Randbereich der Platte. Bei geeigneter Wahl der Vorspannkraft erscheint es demnach theoretisch möglich, selbst bei geringer Plattendicke, auf eine Textilbewehrung in der Platte zu verzichten.

Für die Schnittgrößen in den Diagonalrippen bedeutet eine Erhöhung der Vorspannkraft die Zunahme von Drucknormalkräften ausgehend vom Rand zum Zentrum, während die Zugkräfte im Kern schwinden. Bei genügend großer Vorspannkraft können die Diagonalen gänzlich überdrückt werden. Auch hier kann dadurch aus statischer Sicht auf eine textile Bewehrung in den Rippen verzichtet werden. Nicht außer Acht zu lassen ist das in Abbildung 4.7d dargestellte negative Biegemoment in den Eckpunkten, welches mit zunehmender Vorspannkraft ebenfalls ansteigt. Dieses bewirkt Zugspannungen an der Rippenoberseite, die unter Umständen von einem reinen Betonquerschnitt nicht mehr rissfrei aufgenommen werden können. Das bei einer Vorspannkraft von 15 kN hervorgerufene Moment von 1 kNm führt nach linearer Elastizitätstheorie im 20 cm hohen und 3 cm breiten Rippenquerschnitt beispielsweise zu Spannungen von 5 N/mm². Die an gleicher Stelle -16,4 kN große Normalkraft ruft Druckspannungen von -2,7 N/mm² hervor. Aus der Überlagerung der beiden Spannungsanteile resultiert eine Gesamtspannung von 2,3 N/mm². In dieser Größenordnung befindet sich auch die Zugfestigkeit normalfester Betone.

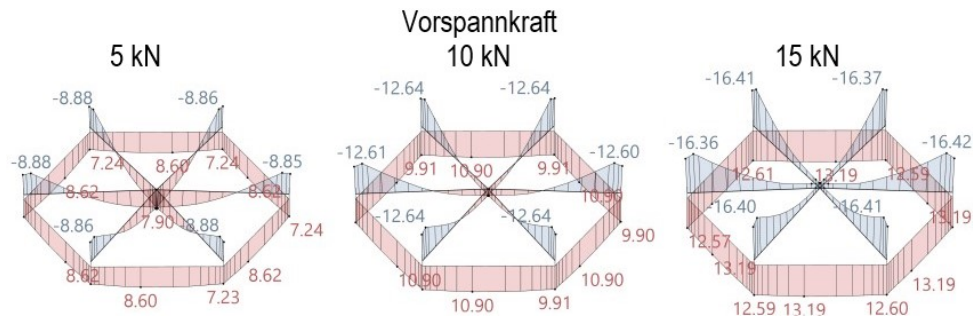
4.4 Aufbringen einer Vorspannkraft auf den äußeren Zugring aus Spannstahl und Variation der Größe der Vorspannkraft



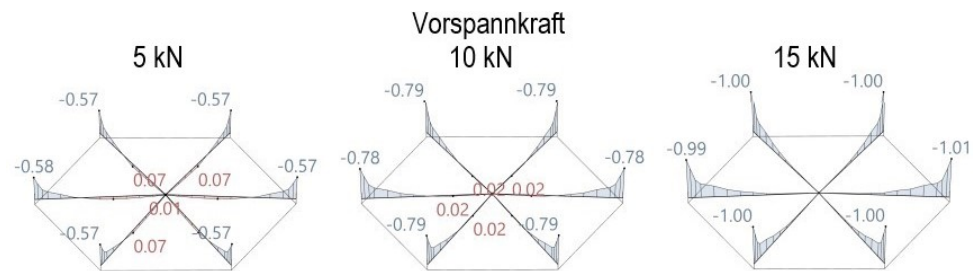
(a) Durchbiegung in mm



(b) Normalspannung σ_1 an der Plattenunterseite in N/mm^2



(c) Normalkraft in kN



(d) Biegemoment in kNm

Abb. 4.7: Systemverhalten unter Eigengewicht, Flächenlast und Vorspannung bei Variation der Größe der Vorspannkraft und konstanten geometrischen Abmessungen (Plattendicke 3 cm, Rippenhöhe 20 cm, Spannglieddurchmesser 10 mm)

4.5 Optimierung einer ausgewählten Plattenkonstruktion im Sinne der Einhaltung üblicher Verformungsgrenzwerte und Diskussion des Steifigkeitsunterschieds zu einer rippenlosen Platte

Ein wesentliches Kriterium für die Bemessung von Deckentragwerken ist die Einhaltung bestimmter Grenzwerte der Verformung. Der Eurocode 2 legt folgende Vorschrift für die Durchbiegung von Bauteilen fest:

„Die Verformung eines Bauteils oder eines Tragwerks sollte weder die ordnungsgemäße Funktion noch das Erscheinungsbild des Bauteils beeinträchtigen. [...] [Es] sollten Grenzwerte für vertikale Durchbiegungen [...] für jedes Bauvorhaben festgelegt und mit dem Auftraggeber vereinbart werden.“ (ON-EN-1992-1-1:2021, S. 173)

Übliche Grenzwertsetzungen liegen in der Größenordnung von $1/200$ bis $1/300$ der Spannweite des Bauteils. Im Folgenden wird exemplarisch eine Plattenkonstruktion dimensioniert, sodass ihre Durchbiegung einen Grenzwert von $L/300$, welcher sich bei der 4 m weit gespannten Platte zu 13,3 mm ergibt, nicht überschreitet. Vereinfacht wird zur Steuerung der Systemsteifigkeit die Plattendicke angepasst. Alle übrigen Bauteilabmessungen werden konstant gehalten. Die Diagonalrippen besitzen eine Höhe von 20 cm am Rand und die Zugglieder einen Durchmesser von 10 mm. Wie aus der Analyse in Kapitel 4.3.1 hervor geht, sinkt die Durchbiegung der Gesamtkonstruktion mit steigender Plattendicke. Es wird folglich nach der geringstmöglichen Plattenstärke gesucht, mit welcher eine maximale Verformung von 13,3 mm eingehalten werden kann. Für den Fall, dass die auftretenden Zugspannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten, wird zugrunde gelegt, dass diese von einer Textilbewehrung aufgenommen werden. Es werden jedoch keine konkreten Tragfähigkeitsnachweise geführt.

Die Durchbiegungsgrenzwerte beziehen sich im Allgemeinen auf das Erscheinungsbild, wobei die langzeitigen Verformungen des Bauteils von Interesse sind. Diese werden bei Betonkonstruktionen maßgeblich durch das Kriechen beeinflusst. Die durch die Statik-Software RFEM linear elastisch errechneten Durchbiegungen werden im Folgenden vereinfacht mittels Faktoren erhöht, um die Langzeitverformungen abzuschätzen. Hierbei muss zwischen gerissenen und ungerissenen Betonquerschnitten unterschieden werden. Im Allgemeinen können Kriechverformungen über einen effektiven E-Modul, der von der Kriechzahl φ abhängig ist, ausgedrückt werden. Im ungerissenen Zustand errechnet sich dieser nach der Formel 4.1 (Zilch und Zehetmaier, 2010, S. 368).

$$E_{c,eff} = \frac{E_c}{1 + \varphi}. \quad (4.1)$$

Für übliche Kriechzahlen von 2-2,5 ergibt sich daraus eine 3-3,5-fache Verformung. Im gerissenen Zustand ist ein geringerer Anteil des Betonquerschnitts überdrückt und damit kriechwirksam. Die Auswirkungen der Kriechverformung sind daher im gerissenen Zustand geringer. Nach der Formel 4.2 für den effektiven E-Modul für den Zustand II (Zilch und Zehetmaier, 2010),

$$E_{c,eff}^{II} = E_c \frac{2 + \varphi}{2(1 + \varphi)}, \quad (4.2)$$

ergibt sich grob geschätzt eine etwa 2-fache Verformung durch Kriechen. Hinzu kommt der Steifigkeitsverlust durch die Rissbildung des Betons, welcher in etwa eine Erhöhung der Verformungen um den Faktor 3 zur Folge hat. In Summe sind die Verformungen aus der statischen Berechnung daher approximativ mit dem Faktor 6 zu erhöhen, um die Langzeitverformungen

4.5 Optimierung einer ausgewählten Plattenkonstruktion im Sinne der Einhaltung üblicher Verformungsgrenzwerte und Diskussion des Steifigkeitsunterschieds zu einer rippenlosen Platte

infolge Rissbildung und Kriechen zu erhalten.

Die statische Analyse ergibt, dass die hexagonale Konstruktion mit 20 cm hohen Diagonalrippen und 10 mm dicken Zuggliedern unter Belastung durch ihr Eigengewicht und einer Flächenlast von 1 kN/m^2 eine minimale Plattendicke von 65 mm erfordert, um das Kriterium maximaler Durchbiegungen von 13,3 mm einzuhalten. Die dabei auftretenden maximalen Hauptzugspannungen σ_1 betragen $4,33 \text{ N/mm}^2$. Unter Zugrundelegung einer Betongüte von mindestens C60/75, deren Zugfestigkeit $4,4 \text{ N/mm}^2$ beträgt, kann der maximal belastete Querschnitt gerade noch als ungerissen betrachtet werden. Die von der Statiksoftware ausgegebene maximale Durchbiegung von 2,2 mm wird folglich um den Faktor 3,5 (Kriechen bei ungerissenem Querschnitt) erhöht, was eine Langzeitverformung von 7,7 mm ergibt. Eine dünnere Platte müsste rein rechnerisch aufgrund von auftretenden Zugspannungen über $4,40 \text{ N/mm}^2$ als gerissen betrachtet werden. Eine Erhöhung der zugehörigen Durchbiegung von 2,4 mm laut Statikprogramm um den Faktor 6 für Kriechen und Rissbildung ergäbe eine Langzeitverformung, welche damit den Grenzwert von 13,3 mm überschreitet.

Interessant erscheint die Frage, welchen konkreten Steifigkeitsgewinn die Diagonalrippen für die Konstruktion haben. Zu Vergleichszwecken wird daher eine ebenfalls 65 mm dicke, hexagonale Platte mit 10 mm dicken Zuggliedern, jedoch ohne Diagonalrippen unter derselben Belastung (Eigengewicht und 1 kN/m^2 Flächenlast) analysiert. Der Vergleich der Spannungen und Durchbiegungen der beiden Platten ist in Abbildung 4.8 ersichtlich. Links ist die Konstruktion mit Diagonalrippen, rechts die rippenlose Platte abgebildet. Zu erkennen ist ein verhältnismäßig geringer Steifigkeitsverlust bei Verzicht auf die Diagonalrippen. Die Durchbiegung ist dabei im Vergleich zur gerippten Platte um 9% höher. Jedoch ist bei der rippenlosen Konstruktion eine geringere Zugspannungskonzentration im Zentrum zu vernehmen. Abbildung 4.8b zeigt, dass die maximale Zugspannung im Zentrum bei der rippenlosen Platte (rechts) in etwa 60% von jener der gerippten Platte (links) beträgt.

Aufgrund der geringeren Spannungsspitzen bleibt die rippenlose Platte auch bei geringeren Plattenstärken im ungerissenen Zustand, was in geringeren Langzeitverformungen resultiert. Demnach würde bereits eine 51 mm dicke Platte ohne Rippen genügen, um das Kriterium maximaler Durchbiegungen von 13,3 mm zu erfüllen. Die dabei auftretenden Langzeitverformungen unter Berücksichtigung der Kriechverformung betragen 12,95 mm. Die Platte bleibt bei einer maximalen Zugspannung von $3,2 \text{ N/mm}^2$ ungerissen.

Selbst um bei linear elastischer Berechnung exakt die selbe Durchbiegung zu erhalten, wie bei der 65 mm dicken, gerippten Platte, bräuchte die rippenlose Platte lediglich eine Stärke von 68 mm, was einer Steigerung von etwa 5% entspricht. In Summe ergibt sich daraus jedoch eine geringere Betonkubatur ($0,707 \text{ m}^3$) als bei der dünneren Platte mit Diagonalrippen ($0,765 \text{ m}^3$).

Die Verstärkung der Platte durch Diagonalrippen erscheint aus dieser Sicht keinen großen Mehrwehrt zu liefern, da die Rippen bei derart großen Plattenstärken aufgrund des beachtlichen Steifigkeitsunterschieds zwischen Platte und Rippen nur in geringem Maß zur Lastabtragung beitragen. Darüber hinaus kann mit der geringen Steifigkeit der Zugglieder keine wesentliche Druckbogenwirkung entfaltet werden. Jedoch ist anzumerken, dass die einheitliche Erhöhung der Plattendicke über die gesamte Plattenfläche zur Reduktion der Spannungsspitzen im Zentrum (und damit einhergehend der Durchbiegung) dem biologischen Vorbild des Koffersfischskeletts nicht gerecht wird. Beim Fischskelett wird das Problem der Spannungskonzentration durch eine variable Plattendicke gelöst, wodurch in den gering belasteten Randbereichen Material gespart

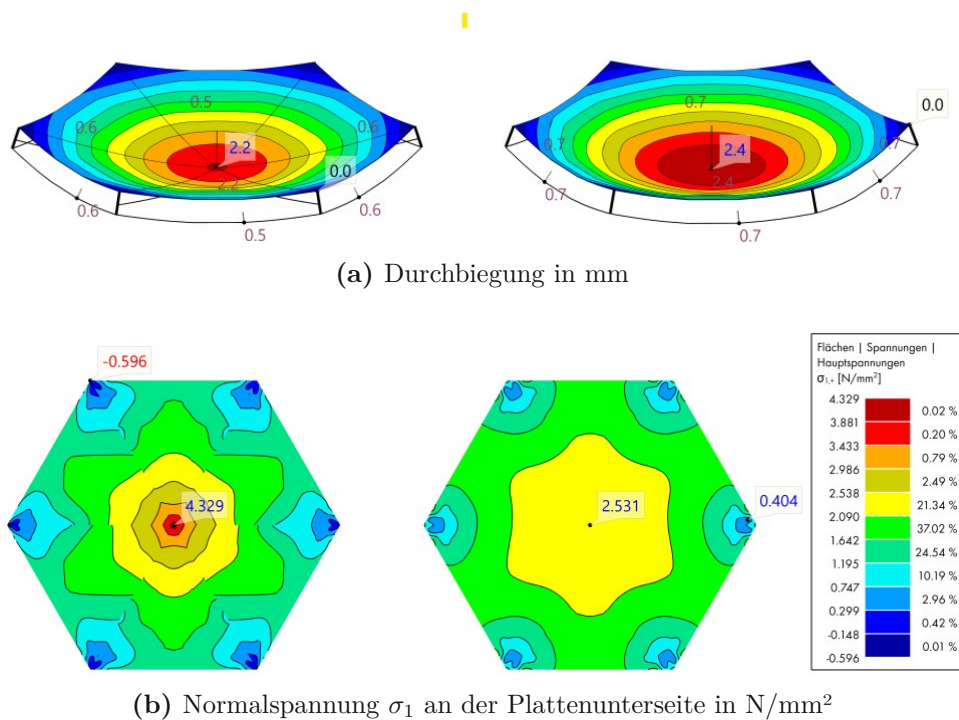


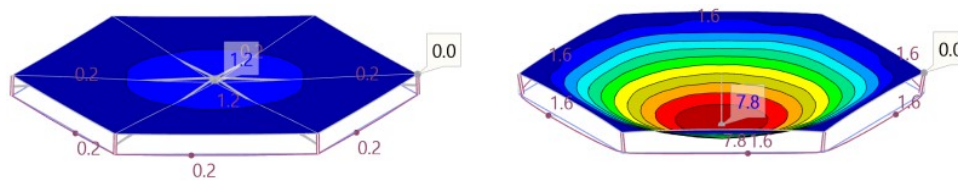
Abb. 4.8: Vergleich der gerippten (links) und der rippenlosen (rechts) Plattenkonstruktion: Plattendicke jeweils 63 mm, Zugglieddurchmesser 10 mm, Rippenhöhe am Rand (links) 20 cm

werden kann und die Rippen zur Lastabtragung mit herangezogen werden.

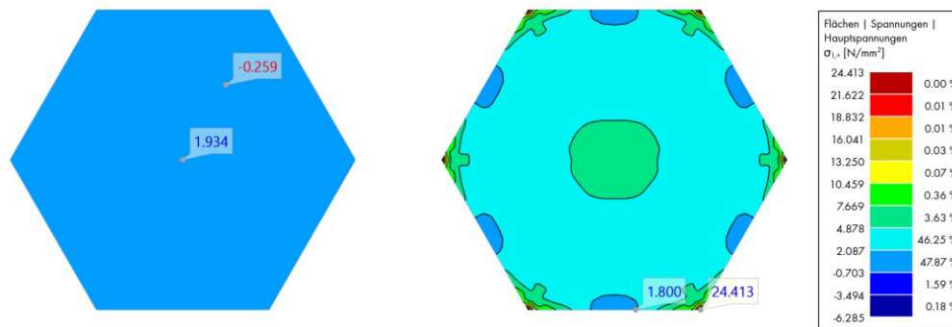
4.6 Vorspannung der Zugglieder am Rand

Eine weitere Option zur Reduktion der Durchbiegungen ist das Aufbringen einer Vorspannung auf den äußeren Zugring. Auf diese Weise kann die Platte dünner ausgeführt werden und die Diagonalrippen tragen wesentlich mehr zur Lastabtragung bei. Bei einer Vorspannung der Zugglieder mit 10 kN erfüllt bereits eine 30 mm dicke Platte das in Kapitel 4.5 genannte Durchbiegungskriterium. Theoretisch könnte die Plattendicke noch weiter reduziert werden, aus herstellungstechnischen Gründen wurden jedoch 30 mm als konstruktiv erforderlicher Minimalwert herangezogen. Die Durchbiegung laut statischer Berechnung beträgt in diesem Fall 1,2 mm, bzw. 4,2 mm bei Berücksichtigung der Kriechverformungen.

Der Vergleich mit einer vorgespannten Platte ohne Diagonalrippen verdeutlicht die Erforderlichkeit der Rippen zur effektiven Nutzung des Vorspannungseffekts. Abbildung 4.9 zeigt die Durchbiegungen und Spannungen der gerippten (links) sowie der rippenlosen (rechts) Plattenkonstruktion bei einer Vorspannung der 10 mm dicken Zugelemente mit 10 kN unter der kombinierten Belastung mit Eigengewicht und Flächenlast. In Abbildung 4.9a ist zu erkennen, dass die rippenlose Platte die 6,5-fache Durchbiegung im Vergleich zur Platte mit Diagonalrippen erfährt. Die Vorspannung ist im Bezug auf die Durchbiegung bei der rippenlosen Platte relativ wirkungsarm. Sie führt jedoch zu unverhältnismäßig großen Spannungskonzentrationen in den Eckpunkten (vgl. Abb. 4.9b). Um das Durchbiegungskriterium zu erfüllen, benötigt die rippenlose, vorgespannte Platte eine Mindestdicke von 39 mm. Die Vorspannung führt folglich zu einer Reduktion der erforderlichen Betonkubatur um etwa 30% im Vergleich mit der in Kapitel 4.5



(a) Durchbiegung in mm



(b) Normalspannung σ_1 an der Plattenunterseite in N/mm²

Abb. 4.9: Vergleich der gerippten (links) und der rippenlosen (rechts) Plattenkonstruktion bei einer Vorspannung mit 10 kN: Plattendicke jeweils 30 mm, Zugglieddurchmesser 10 mm, Rippenhöhe am Rand (links) 20 cm

ermittelten Mindestdicke von 51 mm für eine rippenlose Platte ohne Vorspannung. Darüber hinaus ist aber die Sinnhaftigkeit einer solchen Vorspannung einer ebenen Platte, die zu hohen Spannungskonzentrationen führt, in Frage zu stellen.

Die dargelegte Analyse verdeutlicht, dass die hexagonale Platten-Rippenkonstruktion ihr volles Potenzial erst bei Vorspannung des äußeren Zugrings entfaltet. Auf diese Weise können minimale Plattendicken bei gleichzeitiger Begrenzung der Durchbiegungen erzielt werden. Die vorgespannte Plattenkonstruktion weicht vom natürlichen Vorbild des Kofferrisfskeletts ab. Anstelle der Vorspannung wird die optimale Tragwirkung beim Skelett durch die veränderliche Plattendicke mit einer zackenartigen Verstärkung im spitzenbeanspruchten Bereich des Plattenzentrums erzielt. Im Sinne des bionischen Grundgedankens gilt es aber nicht die Natur vorbehaltlos zu kopieren, sondern sinnvolle Teilaspekte in die Praxis zu überführen.

4.7 Weiterführende Fragestellungen

4.7.1 Herstellungsverfahren

Wie bereits in den vorigen Kapiteln erwähnt, spielt die Art der Herstellung des Tragwerks eine entscheidende Rolle bezüglich seiner zukünftigen Einsetzbarkeit. Die traditionelle Herstellung von Betontragwerken durch gießen der flüssigen Betonmischung in eine Schalung und anschließende Verdichtung mittels Rüttelgeräten erfordert ein hohes Maß an Personal- und Zeitaufwand. Je komplexer die zu betonierende Geometrie dabei ist, als umso aufwändiger erweist sich deren Herstellung. Am arbeitsintensivsten ist dabei die in situ Herstellung des Bauteils auf der Baustelle. Durch die Vorproduktion von Bauteilen im Fertigteilwerk, welche auf der Baustelle lediglich zusammen gesetzt werden müssen, kann ein großer Anteil an Arbeitsstunden eingespart werden.

Eine neuartige Entwicklung, die für die Fertigteilproduktion interessant ist, ist die additive Fertigung von Betonkonstruktionen. Bei diesem Verfahren wird der Beton z.B. mittels 3D-Drucker schichtweise horizontal aufgetragen bis ein fertiges dreidimensionales Bauteil entstanden ist. Eine eigene Software konvertiert dabei im Voraus das eingegebene 3D-Modell in die einzelnen zweidimensionalen Schichtpläne, die der Reihe nach übereinander gedruckt werden (Gosselin et al., 2016). Ganz wesentlich für das Verfahren ist dabei die Zusammensetzung des Betons. Dieser muss ausreichend feinkörnig und verarbeitbar sein, gleichzeitig ein gutes Haftvermögen sowie genügend Steifigkeit besitzen und ohne nachträgliche maschinelle Verdichtung auskommen. Kurz gesagt: er muss die Vorteile von selbstverdichtendem Beton und Spritzbeton vereinen. (Zhang et al., 2019) Spezielle Betonrezepturen hierfür wurden bereits entwickelt und werden laufend verbessert. Um die Notwendigkeit einer konventionellen Bewehrung aus Stahl zu umgehen, besteht die Möglichkeit dem Betongemisch Fasern beispielsweise aus Kohlenstoff, Glas oder Basalt beizufügen, welche die Biege- und Zugfestigkeit erhöhen (Hambach und Volkmer, 2017).

Die Herstellung der in dieser Arbeit vorgestellten gerippten Struktur mit diesem Verfahren ist prinzipiell denkbar. Vorteilhaft ist, dass ein aufwendiger Schalungsbau entfällt, beziehungsweise wesentlich erleichtert wird. Ein erstes Versuchsobjekt, dessen Geometrie in Anlehnung an die hier beschriebene Kofferfisch-Platte gewählt wurde, wurde bereits von Preinstorfer (2022) gesprayed. Der Sprayprozess verläuft ähnlich wie der 3D-Druck: Die Betonmasse wird dabei schichtweise maschinell aufgespritzt. Abbildung 4.10 zeigt das Objekt im frisch gesprayedten (a) sowie im ausgehärteten (b) Zustand. Der Prototyp wurde in kleinerem Maßstab hergestellt. Der Durchmesser des Hexagons beträgt 80 cm. Anstatt der Spannglieder wurde der äußere Zugang als durchgehender Betonquerschnitt mit Textilbewehrungseinlagen hergestellt. Auf eine Textilbewehrung in den Diagonalen wurde verzichtet, da diese aufgrund der deutlich geringeren Dimension der Konstruktion und der daraus resultierenden Reduktion der Biegetragwirkung vorwiegend durch Druckkräfte beansprucht werden. Der Betonmischung wurden beim Sprayen der Diagonalen zur Verbesserung der mechanischen Eigenschaften aber Fasern beigefügt.

Die Rippenstruktur ist beim vorliegenden Druckexemplar bereits gut erkennbar, jedoch ist an den Rändern, insbesondere in den Eckpunkten, ein Spritzschatten aufgetreten, welcher unerwünscht ist. Durch eine bessere Abstimmung der Textilgeometrie, insbesondere der Maschenweite, auf die Mischrezeptur wird aber eine Verbesserung in der nächsten Generation angestrebt. Nichts desto trotz verdeutlicht der von Preinstorfer (2022) durchgeführte Versuch, dass eine Produktion der Kofferfischplatte über das Verfahren des 3D-Beton-Sprayens umsetzbar ist.

Auch wenn die additive Fertigung von Betonkonstruktionen eine verhältnismäßig neuartige Entwicklung und noch nicht zur Gänze ausgereift ist, wurden bereits einige beeindruckende Konstruktionen und teilweise sogar ganze Gebäude mit dieser Methode geschaffen. Im Jahr 2015 druckte die chinesische Firma WinSun einen Apartmentkomplex, welcher aus fünf ober- und fünf unterirdischen Geschoßen besteht (Yingchuang Building Technique Co.Ltd. – WinSun, 2015). Als Druckmaterial kam dabei eine spezielle Betonmischung, welche teilweise sogar Recyclingmaterial aus Bauabfällen sowie Glasfasern zur Verstärkung beinhaltet, zum Einsatz. Die einzelnen Elemente des Gebäudes wurden werkseitig vorgedruckt und anschließend auf der Baustelle zusammengesetzt und durch Stahlbewehrung verstärkt (Starr, 2015). Laut Angaben der Firma WinSun können auf diese Weise 60% an Material im Vergleich zu herkömmlichen Bauweisen gespart, sowie der Zeitaufwand für die Herstellung des Gebäudes auf etwa ein Drittel reduziert werden. (Sevenson, 2015)

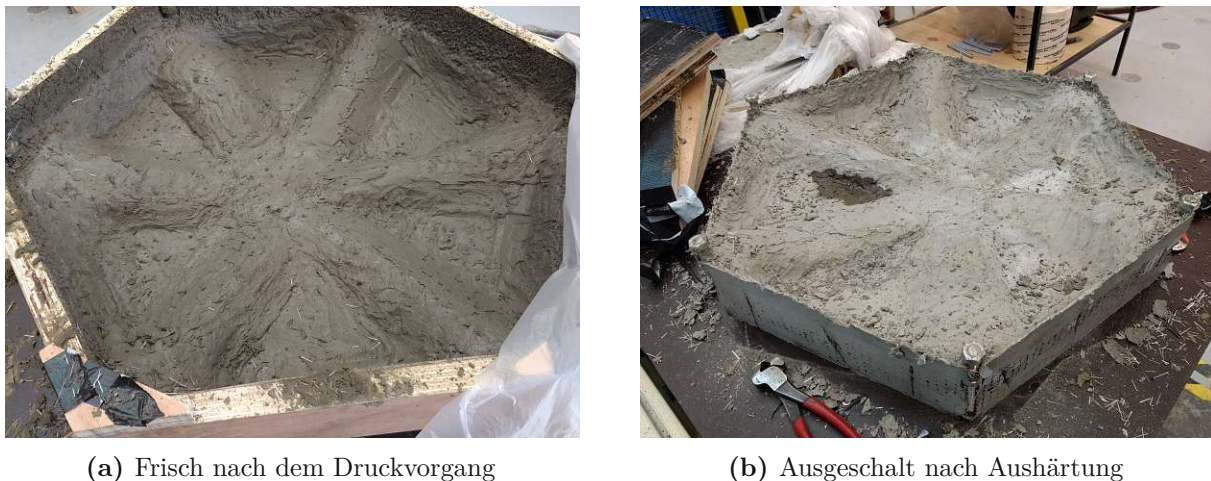


Abb. 4.10: Erster Versuch der Herstellung einer Kofferfisch-Platte mittels 3D-Druck (Fotos: Preinstorfer 2022)

Ein ähnliches Projekt wurde im Jahr 2016 ebenfalls von der Firma WinSun fertig gestellt. Das weltweit erste 3D-gedruckte Geschäftsgebäude ist mittlerweile Sitz der Dubai Future Foundation und schaffte es sogar in die Liste der Guinness Weltrekorde. Es besteht aus 17 boxförmigen Modulen, die jeweils eine Länge von 13 m und eine Höhe von 3 m aufweisen. Die Wände, Decken und Böden der Elemente wurden vollständig in der Fabrik vorgedruckt und per Schiff zum Bauplatz gebracht (Yingchuang Building Technique Co.Ltd. – WinSun, 2020), wo sie nur noch durch Haustechnik, Elektrizität und Inneneinrichtung ergänzt wurden. Der Druckprozess selbst erfordert dabei Angaben des Herstellers zufolge bloß eine einzige Person zur Überwachung des Druckgeräts (Urbanist, 2022). Auf diese Weise kann der Kostenfaktor für die benötigten Arbeitsstunden im Vergleich zu auf herkömmliche Weise hergestellten Konstruktionen ebenfalls drastisch reduziert werden.

4.7.2 Skalierung, Verbindung und mögliche Einsatzbereiche

Die Größe der Plattenkonstruktion spielt eine entscheidende Rolle bezüglich der Kräfteverteilung und des Tragmechanismus. Je größer der Plattenumfang, und damit einhergehend die Stützweite zwischen den Lagerpunkten ist, desto stärker tritt die Biegetragwirkung in den Vordergrund. Diese bewirkt Zugspannungen in der Konstruktion, denen gegebenenfalls durch Erhöhung der Steifigkeit des äußeren Zugrings oder durch Vorspannung desselben entgegen gewirkt werden kann. Im vorliegenden Beispiel wurde der Plattenradius im Hinblick auf die Transportierbarkeit mittels LKW auf 2 m festgelegt. Insgesamt kann ein Plattenelement damit lediglich eine Fläche von 10,39 m² überspannen. Dies ist für kleine Bauwerke wie etwa Pavillions (vgl. Abbildung 4.11) ausreichend, zum Einsatz in großformatigen Bauwerken jedoch eher ungeeignet. Wie weit die Konstruktion vergrößert werden kann und dabei gleichzeitig noch wirtschaftlich herstellbar bleibt, ist noch zu untersuchen.

Von wesentlich größerem Interesse ist jedoch nicht die mögliche Ausdehnung einer einzelnen Platte, da diese rasch an die Grenzen der Umsetzbarkeit stößt, sondern die Möglichkeit des Zusammenschlusses mehrerer Platten zu einem gemeinsam wirkenden Tragwerk. Um noch einmal auf das Vorbild des Kofferfischskeletts zurück zu greifen, bei dem die zahlreichen kleinen Platten



Abb. 4.11: Pavillion auf Stützen mit interessanter Deckengeometrie aus Holz, Budapest 2022, Foto: eigene Aufnahme

sich gegeneinander abstützen und so das Gesamtbild der „Box“ bilden, so wäre es auch denkbar, die davon abgeleitete Betonkonstruktion aus Platten und Rippen in modularer Weise zu verbinden. Die einzelnen Segmente könnten dabei als Fertigteile vorproduziert werden und müssten lediglich auf der Baustelle zusammengesetzt werden. Das Zusammensetzen von Teilelementen zu einem Gesamttragwerk ist keine Neuigkeit im Betonbau. So werden beispielsweise Elementdecken oder Hohldeckendecken als (Halb-)Fertigteile im Werk vorproduziert und baustellenseitig durch Aufbeton ergänzt. Über den Verguss der Fugen wird dabei die Verbindung zwischen den Elementen sichergestellt. In analoger Weise bestünde auch die Möglichkeit, die Fugen zwischen den hexagonalen Plattenelementen zu vergießen.

Im Hinblick auf die Wiederverwertbarkeit des Materials erweist sich der Verguss mit Beton jedoch als nachteilig, da das Lösen einer derartigen Verbindung mit viel Aufwand und Materialverlust verbunden ist. Die Wiederverwertbarkeit von Bauprodukten aber gewinnt fortschreitend an Bedeutung. Die Entwicklung neuartiger Tragstrukturen zur Reduktion von CO₂-Emissionen, wie solcher aus Textilbeton, ist nur ein Schritt in die richtige Richtung. Um letztendlich vollständig nachhaltige Bauwerke errichten zu können, muss deren gesamter Lebenszyklus, bis hin zum Abbruch und der potentiellen Wiederverwertung des Materials betrachtet werden. Demnach wäre eine leicht lösbare und wiederverwendbare Verbindung, wie etwa durch Schrauben oder Ähnliches, anzustreben. Auf diese Weise könnten die Deckenelemente einfacher wieder abgebaut und eventuell anderenorts neu zusammengefügt werden, ohne dass diese zwingend zerstört werden müssten, wie das bei zu einem Stück vergossenen Deckensystemen der Fall ist.

Die detaillierte Entwicklung einer passenden Verbindungsmöglichkeit ist nicht Teil der vorliegenden Arbeit. An dieser Stelle soll lediglich darauf hingewiesen werden, dass der Art der Verbindung große Bedeutung zuzuschreiben ist, da sich eben diese beim Skelett des Kofferrfischs häufig als Schwachstelle herausstellte. In der von Yang, Naleway et al. 2015 durchgeführten Versuchsreihe, bei der die Platten des Kofferrfischskeletts unterschiedlichen mechanischen Belastungen ausgesetzt wurden, versagten jeweils die Kollagenfasern, welche die einzelnen Platten verbinden und so eine Kraftübertragung zwischen den Platten ermöglichen, wohingegen die Platten selbst weitgehend intakt blieben. Am anfälligsten waren die getesteten Objekte dabei auf Scherbeanspruchung. Im vorliegenden Beispiel wurde die Belastung der Plattenkonstruktion auf Scherung noch nicht



Abb. 4.12: Zusammengesetztes Deckentragwerk aus mehreren hexagonalen Platten-Rippen-Konstruktionen, an den äußeren Eckpunkten auf Einzelstützen gelagert

untersucht. Für die Zusammensetzung mehrerer Platten zu einem Deckentragwerk kann diese jedoch maßgebend werden und ist dementsprechend zu berücksichtigen. Ebenso ist darauf zu achten, dass die Tragwirkung im Falle der Verbindung mehrerer Platten deutlich von jener in vorliegendem Beispiel beschriebenen abweichen kann. Die Verbindung an den Plattenrändern entspräche dabei eher einem nachgiebigen Liniengelenk. Die Punktlagerung unter den Plattenecken würde in den innenliegenden Bereichen entfallen. Für Randelemente, die an den dem Deckenzentrum zugewandten Rändern mit benachbarten Platten verbunden und an den äußeren Kanten entweder linienförmig auf Wände oder punktuell auf Stützen gelagert sind, ergäbe sich demnach auch keine symmetrische Schnittgrößenverteilung. Je nach Ausmaß der Unterschiede ist dabei abzuwägen, ob es sinnvoll ist, die Randelemente gesondert zu dimensionieren, beziehungsweise diese gegebenenfalls sogar asymmetrisch auszubilden. In diesem Fall wäre die Handhabung auf der Baustelle etwas komplizierter, da die einzelnen Deckenelemente nicht beliebig anordenbar wären und Verwechslungsgefahr zwischen Mittel- und Randstücken bestünde.

Ein Beispiel, wie eine aus mehreren kleineren Plattenelementen zusammengesetzte Decke aussehen könnte, ist in Abbildung 4.12 gegeben. Hierbei wurde die Geometrie des in Abbildung 4.2c vorgestellten Prototypen mit durchgehenden Randbalken aus Beton und sich zum Zentrum hin verjüngenden Diagonalrippen aufgegriffen.

Kapitel 5

Zusammenfassung

5.1 Problemstellung und Ergebnisse

Die Produktion von Beton trägt aufgrund des hohen Treibhausgasausstoßes einen maßgeblichen Anteil zur globalen Erwärmung bei. Um die Klimaziele zu erreichen, muss dieser Ausstoß verringert werden, wobei unterschiedliche Strategien verfolgt werden. Durch Anpassen der Betonzusammensetzung in Hinblick auf eine Reduktion des Zementgehalts ist es möglich, den ökologischen Fußabdruck bei der Betonherstellung zu senken. Eine weitere Alternative ist die Reduktion des verbauten Betonvolumens per se. Durch den Einsatz von Hochleistungswerkstoffen kann eine gegebene Belastung unter geringerem Materialverbrauch abgetragen werden. Die Verwendung von korrosionsbeständigen Faserverbundwerkstoffen als Alternative zu Stahlbewehrung erlaubt darüber hinaus eine Reduktion der erforderlichen Betondeckung auf wenige Millimeter und in der Folge eine weitere Reduktion des gesamten Betonvolumens.

Textilbewehrung ist eine Untergruppe faserverstärkter Bewehrungselemente, die durch textile Verarbeitungsmethoden wie Sticken, Stricken oder Weben hergestellt wird. Dabei können in der Regel zwei bzw. mehraxiale Gitterstrukturen aber auch gänzliche Freiformen geschaffen werden, die dem Kraftfluss im Bauteil entsprechend angeordnet können. Ein Vergleich der Treibhausgasemissionen bei der Produktion von faserverstärkten Bewehrungselementen und Bewehrungsstahl zeigt aber, dass die Produktion von Textilbewehrung, insbesondere solche mit Carbonfasern, erheblich mehr Treibhausgasemissionen freisetzt als die Bewehrungsstahlproduktion. Der Einsatz von Textilbewehrung bedeutet somit nicht automatisch eine bessere Umweltbilanz. Für eine ganzheitliche ökologische Bewertung ist ein Vergleich der beiden Bauweisen (mit Bewehrungsstahl bzw. mit Textilbewehrung) bezogen auf das Gesamtbauwerk/-bauteil erforderlich. Der höhere Energieaufwand der Faserproduktion ist mit der Einsparung von Betonvolumen, sowie einem potentiell geringeren Erhaltungsaufwand im Betrieb abzuwägen.

Eine möglichst lastoptimierte Bauteilstruktur ist demnach der Schlüssel zu einer effizienten und ressourcenschonenden Bauweise. Zur Entwicklung derartiger Tragstrukturen kann es hilfreich sein, Ideen aus dem Reich der Natur aufzugreifen. Unter dem Begriff „Bionik“ versteht man eine Wissenschaft, bei der anhand von natürlichen Vorbildern Lösungen für technische Problemstellungen gesucht werden. Durch Abstraktion natürlicher Grundprinzipien und Anwendung derselben auf eine technisch realisierbare Weise können innovative Produkte geschaffen werden, die potentiell ökologische Vorteile bieten. In der Architektur ist zum Beispiel die Anlehnung an menschliche oder tierische Skelette zur Realisierung materialsparender Leichtbauten bereits Realität.

Skelettknochen zeichnen sich durch einen besonders lastoptimierten Materialeinsatz aus. An Stellen mit geringer Belastung wird an Knochensubstanz gespart, wodurch der Knochen besonders leicht im Verhältnis zu seiner Tragfähigkeit ist. Ein besonderes Skelett besitzt der Koffersch.

Dieses besteht aus vorwiegend hexagonalen, dünnen Platten, die an der Unterseite durch Rippen verstärkt sind. Die Rippen verlaufen diagonal vom Zentrum zu den Eckpunkten, wobei sich die Rippen zum Zentrum hin verzüngen. Entlang des Plattenrandes, verläuft ein durchgehender Ring, der exzentrisch von der Platte abgehoben und mit den Diagonalrippen verbunden ist.

Im Zuge dieser Arbeit wurde ein an die Skelettstruktur des Kofferfisches angelehntes Tragwerk aus Textilbeton entwickelt. Dieses besteht aus einer dünnen, hexagonalen Betonplatte, schmalen, textilbewehrten Diagonalrippen, deren Querschnittshöhe vom Zentrum zum Plattenrand wächst und einem äußeren Zugring aus Stahl. Die statische Analyse der Platte unter Einheitsbelastung ergibt, dass die Schnittgrößenverteilung stark von der Steifigkeit des außenliegenden Zugrings abhängig ist. Im Fall eines stark nachgiebigen Zugrings entstehen große Verformungen der Platte. Die Ableitung der Kräfte erfolgt vorwiegend über Biegetragwirkung, aus welcher Zugspannungen im Plattenzentrum sowie in den Diagonalrippen resultieren. Je steifer der Ring ist, desto weniger Durchbiegung erfährt die Platte und eine Druckbogenwirkung kann sich einstellen.

Ihr volles Potenzial entfaltet die Konstruktion bei Vorspannung des äußeren Zugrings, wodurch die Schnittgrößen und Verformungen gezielt gesteuert werden können. Mit dem Aufbringen einer Vorspannkraft wird zudem die Druckbogenwirkung voll aktiviert, was sich günstig auf die Durchbiegungen auswirkt. Die Zugbelastung in den Diagonalen weicht einer vorwiegenden Druckbelastung und die Zugspannungen in der Platte sinken. Bei geeigneter Abstimmung von Vorspannkraft, Platten- und Rippenabmessungen ist es theoretisch denkbar, die Zugbeanspruchung so weit zu reduzieren, dass gänzlich auf eine Bewehrung der Betonelemente verzichtet werden kann.

Erste Vergleichsrechnungen bei einer Platte mit einem Durchmesser von 400 cm, 3 cm breite Diagonalrippen, deren Querschnittshöhe vom Zentrum zum Rand von 3 auf 20 cm anwächst, sowie äußeren Zugglieder mit einem Durchmesser von 10 mm ergaben, dass unter Belastung durch ihr Eigengewicht und einer zusätzlichen Flächenlast von 1 kN/m^2 , die Platte eine Mindestdicke von 65 mm benötigt, um einen Grenzwert von $L/300$ für die Durchbiegung, unter approximativer Berücksichtigung von Kriechverformungen, einzuhalten. Der Steifigkeitsgewinn der gerippten Konstruktion beträgt im Vergleich zu einer rippenlosen Platte in etwa 9%. Einen deutlicheren Vorteil zeigt die gerippte Platte bei Vorspannung des Zugrings. Eine mit einer Vorspannkraft von 10 kN vorgespannte, gerippte Platte, erfüllt bereits mit einer Dicke von 30 mm das Durchbiegungskriterium, während ohne Diagonalrippen die Durchbiegung den 6,5-fachen Wert beträgt.

5.2 Weiterführende Fragestellungen

Die vorliegende Arbeit beschränkt sich auf die qualitative Beurteilung des Einflusses unterschiedlicher Geometrien der einzelnen Tragwerkskomponenten (Platte, Rippe, Zugring) auf die Schnittgrößenverteilung und Verformung der Konstruktion. In weiterer Folge ist die statische Bemessung einer konkreten Plattengeometrie, sowie die Ermittlung der Treibhausgasemissionen, die bei der Herstellung einer solchen Platte anfallen, interessant. Um ein modular zusammensetzbares Tragwerk aus mehreren Platten zu ermöglichen, muss zudem ein geeigneter Anschluss der Platten untereinander gefunden, sowie das Systemverhalten mehrerer zusammengeschlossener Platten untersucht werden.

Literatur

- 2021 *Global Status Report for Buildings and Construction: Towards a Zero-emission, Efficient and Resilient Buildings and Construction Sector*. (2021). report. United Nations Environment Programme. 105 S.
- Anderl, M., A. Bartel, K. Geiger und B. Gugele et al. (2021). *Klimaschutzbericht 2021*. Reports. Band 0776, ISBN:978-3-99004-599-2. Wien: Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie. 231 S.
- Andrew, R. M. (2018). „Global CO₂ emissions from cement production“. In: *Earth Syst. Sci. Data* 10, S. 195–217.
- Antony, F., R. Griefthamer, T. Speck und O. Speck (2014). „Sustainability assessment of a lightweight biomimetic ceiling structure“. In: *Bioinspir. Biomim.* 9 016013.
- Bajcinovci, B. (2019). „Biomimicry and Biophilic Design: Multiple Architectural Precepts“. In: *Journal of Science Humanities and Arts* 6(3), S. 1–9.
- Bartol, I. K., M. S. Gordon, M. Gharib, J. R. Hove, P. W. Webb und D. Weihs (2002). „Flow Patterns Around the Carapaces of Rigid-bodied, Multi-propulsor Boxfishes (Teleostei: Ostraciidae)“. In: *Integrative and Comparative Biology* 42, S. 971–980.
- Becke, A., J. Reiners und A. Tuan Phan (2020). *Erläuterungen zu den Umweltproduktdeklarationen von Beton*. Forschungsber. InformationsZentrum Beton GmbH. 36 S.
- Becker, P.-R. (2001). „Architektur und Lebewesen“. In: *NestWerk: Architektur und Lebewesen*. Hrsg. von P.-R. Becker. Oldenburg: Oldenburg [u.a.], Isensee [u.a.], S. 8–27. ISBN: 3-932292-33-2.
- Benett, P. und S. Tanaka (2016). *Hightech aus der Natur*. Köln: Fackelträger. ISBN: 978-3-7716-4654-7.
- Bertling, J. (2020). „Bionik & Nachhaltigkeit“. In: *Prototype Nature – Biologie als Startpunkt in Technologie, Kunst und Design für eine nachhaltige Zukunft*. Hrsg. von A. Bernotat und J. Bertling. Oberhausen: Karl Maria Laufen, S. 144–155. ISBN: 9783874683937.
- Besseau, L. und Y. Bouligand (1998). „The twisted collagen network of the box-fish scutes“. In: *Tissue & Cell* 30, S. 251–260.
- Bisaillon, A., M. Livest und V. M. Malhotra (1994). „Performance of High-Volume Fly Ash Concrete in Large Experimental Monoliths“. In: *ACI Materials Journal* 19 (2), S. 178–187.
- Brück, J. und B. Kuhn (2008). *Bionik – Der Natur abgeschaut*. Köln: Naumann und Göbel GmbH. ISBN: 9783625120315.
- Bükki, C. (2005). „Das Voronoi Spiel“. Diplomarbeit. Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- Cadenazzi, T., G. Dotelli, M. Rossini, S. Nolan und A. Nanni (2020). „Cost and environmental analyses of reinforcement alternatives for a concrete bridge“. In: *Structure and Infrastructure Engineering* 16(4), S. 787–802.
- Chaidee, S. und K. Sugihara (2017). „Approximation of fruit skin patterns using spherical Voronoi diagrams“. In: *Pattern Analysis and Applications* 20, S. 783–795.
- Chowdhury, H., R. Islam, M. Hussein, M. Zaid, B. Loganathan und F. Alam (2019). „Design of an energy efficient car by biomimicry of a boxfish“. In: *Energy Procedia* 160, S. 40–44.
- Clagett, N., A. Surovek, W. Capehart und S. Khosro (2018). „Termite Mounds: Bioinspired Examination of the Role of Material and Environment in Multifunctional Structural Forms“. In: *Journal of Structural Engineering* 144(7).

- Curbach, M. und F. Jesse (2009). „Eigenschaften und Anwendung von Textilbeton“. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 104, S. 9–16.
- Denk, A. (2001). „Animalische Architektur – Zoomorphe Tendenzen in der Baukunst des 20. Jahrhunderts“. In: *NestWerk: Architektur und Lebewesen*. Hrsg. von P.-R. Becker. Oldenburg: Oldenburg [u.a.], Isensee [u.a.], S. 74–87. ISBN: 3-932292-33-2.
- Eigen, L., D. Baum, M. N. Dean, D. Werner, J. Wölfer und J. A. Nyakatura (2022). „Ontogeny of a tessellated surface: Carapace growth of the longhorn cowfish *Lactoria cornuta*“. In: *Journal of Anatomy* 00, S. 1–16.
- Environmental Product Declaration – Reinforcing Bar and Mesh* (2016). Nr: S-P-00858 V. 1.2, ARC - The Australian Reinforcing Company, EPD Australasia. URL: <https://www.infrabuild.com/resources/epd/reinforcing-bar-and-mesh-epd-arc/> (Zugriff am 15.09.2022).
- Fratzl, P., O. Kolednik, F. D. Fischer und M. N. Dean (2016). „The mechanics of tessellations — bioinspired strategies for fracture resistance“. In: *Chem. Soc. Rev.* 45, S. 252–267.
- Goel, A. K., S. Vattam, M. Helms und B. Wiltgen (2011). „An Information-Processing Account of Creative Analogies in Biologically Inspired Design“. In: *C&C'11: Proceedings of the 8th ACM conference on Creativity and cognition* Nov 2011, S. 71–80.
- Goel, A. K., S. Vattam, B. Wiltgen und M. Helms (2014). „Information-Processing Theories of Biologically Inspired Design“. In: *Biologically Inspired Design*. Hrsg. von A. K. Goel, D. McAdams und R. Stone. London: Springer, S. 127–152. ISBN: 978-1-4471-5248-4.
- Gosselin, C., R. Duballet, P. Rouc, N. Gaudilliere, J. Dirrenberger und et al. (2016). „Large-scale 3D printing of ultra-high performance concrete — a new processing route for architects and builders“. In: *Materials and Design* 100, S. 102–109.
- Grace, N., E. Jensen, C. Eamon, X. Shi und V. Matsagar (2012). „Life cycle cost analysis of CFRP prestressed concrete bridges“. In: *ACI Structural Journal* 109, S. 697–704.
- Grun, T. B., M. von Scheven, F. Geiger, T. Schwinn, D. Sonntag, M. Bischoff, J. Knippers, A. Menges und J. H. Nebelsick (2019). „Bauprinzipien und Struktur – Design von Seeigeln – Vorbilder für bioinspirierte Konstruktionen“. In: *Bionisch bauen - Von der Natur lernen*. Hrsg. von J. Knippers, U. Schmid und T. Speck. Basel: Birkhäuser, S. 104–115. ISBN: 978-3-0356-1785-6.
- Habibah, T. U., D. V. Amlani und M. Brizuela (2021). *Hydroxyapatite Dental Material*. URL: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK513314/> (Zugriff am 05.05.2022).
- Haist, M. und H. S. Müller (2012). „Nachhaltiger Beton – Betontechnologie im Spannungsfeld zwischen Ökobilanz und Leistungsfähigkeit“. In: *Proceedingsband: 9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruhe Institut für Technologie*. KIT Scientific Publishing, ISBN: 978-3-86644-820-9.
- Hambach, M. und D. Volkmer (2017). „Properties of 3D-printed fiber-reinforced Portland cement paste“. In: *Cement and Concrete Composites* 79, S. 62–70.
- Hansen, J. (1999). „Positionspapier für die 1. Sitzung „Kompetenznetz Bionik“ vom 1.10.1999“. In: *DLR-PT-Umwelt* unveröff.
- Hashemi Farzaneh, H., M. K. Helms, C. Muenzberg und U. Lindemann (2016). „Technology-pull and biology-push approaches in bio-inspired design – comparing results from empirical studies on student teams“. In: *DS 84: Proceedings of the DESIGN 2016 14th International Design Conference* series: design, sec.:design methods, S. 231–240.
- Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung* (1987). Forschungsber. Greven: Eggenkamp.
- Hecker, H.-D. (1969). „Der Hörsaal des Zoologischen Instituts der Universität Freiburg“. In: *Freiburger Universitätsblätter* 25, S. 49–52.
- Helms, M., S. Vattam und A. K. Goel (2009). „Biologically Inspired Design: Process and Products“. In: *Design Studies* 30, S. 606–622.

- Hill, C. und A. Norton (2018). „LCA database of environmental impacts to inform material selection process“. In: *DACOMAT project*. Deliverable number 6.1.
- Hohmann, A. (2018). „Ökobilanzielle Untersuchung von Herstellungsverfahren für CFK-Strukturen zur Identifikation von Optimierungspotentialen – Systematische Methodik zur Abschätzung der Umweltwirkungen von Fertigungsprozessketten“. Dissertation. Technischen Universität München.
- Huang, B., X. Xu, J. Song, Y. Geng, J. Sarkis, T. Fishman, H. Kua und J. Nakatani (2020). „A Life Cycle Thinking Framework to Mitigate the Environmental Impact of Building Materials“. In: *One Earth* 3, S. 564–573.
- Jan Knippers Ingenieure (2019). URL: <https://www.janknippers.com/de/archives/portfolio-type/holzpavillon-bundesgartenschau-heilbronn-2019> (Zugriff am 07. 07. 2022).
- Kanstinger, C. (2020). „Form-finding with Frei Otto“. In: *Prototype Nature – Biologie als Startpunkt in Technologie, Kunst und Design für eine nachhaltige Zukunft*. Hrsg. von A. Bernotat und J. Bertling. Oberhausen: Karl Maria Laufen, S. 28–37. ISBN: 9783874683937.
- Knippers, J. und T. Speck (2019). „Warum Bionik?“. In: *Bionisch bauen - Von der Natur lernen*. Hrsg. von J. Knippers, U. Schmid und T. Speck. Basel: Birkhäuser, S. 8–11. ISBN: 978-3-0356-1785-6.
- Kooistra, W. H. C. F. und G. Pohl (2015). „Diatom Frustule Morphology and its Biomimetic Applications in Architecture and Industrial Design“. In: *Evolution of Lightweight Structures – Analyses and Technical Applications*. Hrsg. von C. Hamm. Dordrecht: Springer, S. 75–102. ISBN: 978-94-017-9398-8.
- Kovacic, I. (2005). „Building Performance Evaluation: Quantifizierung des Nachhaltigkeitspotentials von Gebäuden durch die Analyse der Nachhaltigkeitsindikatoren“. In: *Journal for Facility Management* 0, S. 42–53.
- Kozlov, A., H. Chowdhury, I. Mustary, B. Loganathan und F. Alam (2015). „Bio-inspired design: aerodynamics of boxfish“. In: *Procidia Engineering* 105, S. 323–328.
- Kresling, B. und W. Nachtigall (1992). „Bauformen der Natur Teil II: Technische Biologie und Bionik von Platten- und Faltkonstruktionen“. In: *Naturwissenschaften* 97, S. 251–259.
- Kromoser, B., P. Preinstorfer und J. Kollegger (2018). „Building lightweight structures with carbon-fiber-reinforced polymer-reinforced ultra-high-performance concrete: Research approach, construction materials, and conceptual design of three building components“. In: *Structural Concrete*, S. 1–15.
- Küppers, U. (2001). „Bionik und Bauen – Lernen von den Baumeistern der Natur“. In: *Nest-Werk: Architektur und Lebewesen*. Hrsg. von P.-R. Becker. Oldenburg: Oldenburg [u.a.], Isensee [u.a.], S. 88–103. ISBN: 3-932292-33-2.
- Lötsch, B. (1998). „Gibt es Kunstformen der Natur? Radiolarien - Haeckels biologische Ästhetik und ihre Überschreitung“. In: *Stapfia* 56, S. 340–372.
- Lovell, H. (2005). „Supply and Demand for Low Energy Housing in the UK: Insights from a Science and Technology Studies Approach“. In: *Housing Studies* 20(5), S. 815–829.
- Malhotra, V. M. (1986). „Superplasticized Fly Ash Concrete for Structural Applications“. In: *Concrete International* 8 (12), S. 28–31.
- Marti, P. (2014). *Baustatik – Grundlagen, Stabtragwerke, Flächentragwerke*. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN: 978-3-433-03093-6.
- Mehta, P. K. (1999). „Concrete Technology for Sustainable Development“. In: *Concrete International* 21 (11), S. 47–53.
- (2002). „Greening of the Concrete Industry for Sustainable Development“. In: *Concrete International* 24 (7), S. 23–28.
- Mehta, P. K. und W. S. Langley (2000). „Monolith Foundation: Built to Last '1000' Years“. In: *Concrete International* 22 (7), S. 27–32.

- Mercedes-Benz Group AG (2011). *Die Natur als Vorbild – Mercedes-Benz bionic car*. URL: <https://group-media.mercedes-benz.com/marsMediaSite/de/instance/ko/Die-Natur-als-Vorbild--Mercedes-Benz-bionic-car.xhtml?oid=9361190> (Zugriff am 29.04.2022).
- Nachtigall, W. (2008). *Bionik – Lernen von der Natur*. München: C.H. Beck oHG. ISBN: 9783406536366.
- (2010). *Bionik als Wissenschaft: Erkennen – Abstrahieren – Umsetzen*. Berlin-Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-642-10319-3.
- Nachtigall, W. und G. Pohl (2013). *Bau-Bionik: Natur-Analogien-Technik*. 2. Auflage. Berlin Heidelberg: Springer. ISBN: 978-3-540-88995-3.
- OECD (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. Paris: OECD Publishing. ISBN: 978-3-642-10319-3. URL: <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>.
- ÖNORM EN 1992-1-1:2015-02-15: *Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau (konsolidierte Fassung)* (Feb. 2015). Wien: Austrian Standards.
- ÖNORM EN 1992-1-1:2021-10-01: *Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau* (Okt. 2021). Wien: Austrian Standards.
- Otto, F. (1984). „Die Forschungsgruppe Biologie und Bauen“. In: *Frei Otto: Schriften und Reden 1951-1983*. Hrsg. von B. Burkhardt. Braunschweig: Vieweg, 170ff. ISBN: 3528086874.
- Paris Agreement* (2022). United Nations Treaty Collection, Chapter XXVII 7. d. URL: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=_en (Zugriff am 04.08.2022).
- Perry, V. H. (2018). „What Really is Ultra-High Performance Concrete? –Towards a Global Definition“. In: *Proceedings of The 2nd Int. Conference on Ultra-High Performance Concrete Material & Structures*. Fozhou: RILEM Publications.
- Pohl, G., T. Speck, O. Speck und J. Pohl (2010). „The role of textiles in providing biomimetic solutions for construction“. In: *Textiles, Polymers and Composites for Buildings*. Hrsg. von G. Pohl. Woodhead Publishing, S. 310–329. ISBN: 978-1-84569-397-8.
- Preinstorfer, P., T. Huber, J. M. Lees und B. Kromoser (2022). „Parametric Design Studies of Mass-Related Global Warming Potential and Construction Costs of FRP-Reinforced Concrete Infrastructure“. In: *Polymers* 14. 2383.
- Proske, T., S. Hainer, M. Jakob, H. Garrecht und C. A. Graubner (2012). „Stahlbetonbauteile aus klima- und ressourcenschonendem Ökobeton – Technische Innovation zur Realisierung nachhaltiger Betonbauwerke“. In: *Beton und Stahlbetonbau* 107 (6), S. 401–413.
- Purnell, P. und L. Black (2012). „Embodied carbon dioxide in concrete: Variation with common mix design parameters“. In: *Cement and Concrete Research* 40, S. 874–877.
- Ramm, E. (1996). „»Force Follows Form« oder »Form Follows Force«? – Die Wechselwirkung von Form und Kraft bei Flächentragwerken“. In: *Prozess und Form »Natürlicher Konstruktionen«*. Hrsg. von K. Teichmann und J. Wilke. Berlin: Ernst & Sohn, S. 68–73. ISBN: 3-433-02883-4.
- Reichenbach, S., P. Preinstorfer, M. Hammerl und B. Kromoser (2021). „A review on embedded fibre-reinforced polymer reinforcement in structural concrete in Europe“. In: *Construction and Building Materials* 307. 124946.
- Rooch, A. und E. Syring (2001). „Funktion, Konstruktion und Distinktion – Aspekte des Organischen in der Architektur des 20. Jahrhunderts“. In: *NestWerk: Architektur und Lebewesen*. Hrsg. von P.-R. Becker. Oldenburg: Oldenburg [u.a.], Isensee [u.a.], S. 28–73. ISBN: 3-932292-33-2.
- Ruszaj, A. (2015). „Bionic impact on industrial production development“. In: *Advances in manufacturing science and technology* 9(4), S. 5–22.

- Ryghaug, M. und K. H. Sørensen (2009). „How energy efficiency fails in the building industry“. In: *Energy Policy* 37, S. 984–991.
- Santini, F., L. Sorenson, T. Marcroft, A. Dornburg und M. E. Alfaro (2013). „A multilocus molecular phylogeny of boxfishes (Aracnidae, Ostraciidae; Tetraodontiformes)“. In: *Molecular Phylogenetics and Evolution* 66, S. 153–160.
- Schäfer, S., B. Briegert und S. Menzel (2005). „Bionik im Bauwesen“. In: *Bionik – Aktuelle Forschungsergebnisse in Natur-, Ingenieur- und Geisteswissenschaft*. Hrsg. von T. Rossmann und C. Tropea. Berlin Heidelberg: Springer, S. 123–143. ISBN: 3-540-21890-4.
- Scheerer, S. (2015). „Was ist Textilbeton?“ In: *Verstärken mit Textilbeton*. Hrsg. von K. Bergmeister. Berlin: Ernst & Sohn, S. 4–6.
- Schlaich, J. (2013). „Leichtbau – eine Forderung unserer Zeit“. In: *Bautechnik* 90 (12), S. 825–838.
- Schwinn, T., D. Sonntag, T. Grun, J. Nebesick, J. Knippers und A. Menges (2019). „Anwendungsmöglichkeiten von Segmentschalen in der gebauten Architektur“. In: *Bionisch bauen - Von der Natur lernen*. Hrsg. von J. Knippers, U. Schmid und T. Speck. Basel: Birkhäuser, S. 116–125. ISBN: 978-3-0356-1785-6.
- Sevenson, B. (2015). URL: <https://3dprint.com/38144/3d-printed-apartment-building/> (Zugriff am 07.06.2022).
- solidian GmbH (2022). URL: <https://solidian.com/de/downloads> (Zugriff am 27.05.2022).
- Speck, O., J. Gantner, K. Sedlbauer und R. Horn (2019). „Das bionische Versprechen“. In: *Bionisch bauen - Von der Natur lernen*. Hrsg. von J. Knippers, U. Schmid und T. Speck. Basel: Birkhäuser, S. 180–187. ISBN: 978-3-0356-1785-6.
- Starr, M. (2015). URL: <https://www.cnet.com/culture/worlds-first-3d-printed-apartment-building-constructed-in-china/> (Zugriff am 07.06.2022).
- Stoiber, N., B. Kromoser und M. Hammerl (2020). „Cradle-to-gate life cycle assessment of CFRP reinforcement for concrete structures: Calculation basis and exemplary application“. In: *Journal of Cleaner Production* 280. 124300.
- Umwelt-Produktdeklaration – Beton der Druckfestigkeitsklasse C 30/37* (2018). Nr.: EPD-IZB-20180102-IBG1-DE, InformationsZentrum Beton GmbH, Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (Hrsg.). URL: <https://www.beton.org> (Zugriff am 08.09.2022).
- UN DESA (Population Division) (2022). *Prognose zur Entwicklung der Weltbevölkerung von 2010 bis 2100 (in Milliarden) [Graph]*. URL: <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1717/umfrage/prognose-zur-entwicklung-der-weltbevoelkerung/> (Zugriff am 07.09.2022).
- Urbanist (2022). URL: <https://weburbanist.com/2016/05/26/worlds-first-3d-printed-office-building-unveiled-in-dubai/> (Zugriff am 07.06.2022).
- Van Wassenbergh, S., K. V. Manen, M. E. Alfaro, T. Marcroft und E. J. Stamhuis (2014). „Bionic impact on industrial production development“. In: *Journal of The Royal Society Interface* 12(103).
- VDI 6220: Bionik – Grundlagen, Konzeption und Strategie* (Sep. 2021). Deutschland: VDI-Gesellschaft Technologies of Life Sciences.
- Vogel, S. (2000). *Von Grashalmen und Hochhäusern – Mechanische Schöpfungen in Natur und Technik*. Übers. von T. Filk. Weinheim: Wiley-VCH. ISBN: 3-527-40303-5.
- von Gleich, A. (2007). „Berechtigung und Reichweite des „bionischen Versprechens““. In: *Bionik und Nachhaltigkeit – Lernen von der Natur: 12. Internationale Sommerakademie St. Marienthal*. Hrsg. von F. Brickwedde, R. Erb, J. Lefèvre und M. Schwanke. Berlin: Erich Schmidt Verlag, S. 255–262. ISBN: 978 3 503 10325 6.
- Wawers, W. (2020). *Bionik - Bionisches Konstruieren verstehen und anwenden*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH. ISBN: 978-3-658-31872-7.

- Wienecke-Janž, D., W. Berger, I. Berkel, E. Binder, A. Braun, K. Braun, R. Butscher, L. Calmes, U. Deffke, S. Donner, R. Erb, G. Eßer und H. Gatterer et al (2008). *Bionik: Vorbild Natur in Leben und Technik*. Hrsg. von D. Wienecke-Janž. Gütersloh/München: Wissen-Media-Verlag. ISBN: 9783577162098.
- World Steel in Figures* (2021). report. World Steel Association. 17 S.
- Yang, W., I. H. Chen, B. Gludovatz, E. A. Zimmermann, R. O. Ritchie und M. A. Meyers (2013). „Natural Flexible Dermal Armor“. In: *Advanced Materials* 25, S. 31–48.
- Yang, W., S. E. Naleway, M. M. Porter, M. A. Meyers und J. McKittrick (2015). „The armored carapace of the boxfish“. In: *Act Biomaterialia* 23, S. 1–10.
- Yingchuang Building Technique Co.Ltd. – WinSun (2015). URL: http://www.winsun3d.com/En/Product/pro_inner_5/id/102 (Zugriff am 07.06.2022).
- (2020). URL: http://www.winsun3d.com/En/News/news_inner/id/549 (Zugriff am 07.06.2022).
- Younes, A., A. Seidel, S. Rittner, C. Cherif und R. Thyroff (2015). „Innovative textile Bewehrungen für hochbelastbare Bauteile“. In: *Verstärken mit Textilbeton*. Hrsg. von K. Bergmeister. Berlin: Ernst & Sohn, S. 16–21.
- Zhang, J., J. Wang, S. Dong, X. Yu und B. Han (2019). „A review of the current progress and application of 3D printed concrete“. In: *Composites Part A* 125. 105533.
- Zilch, K. und G. Zehetmaier (2010). *Bemessung im konstruktiven Betonbau*. 2. Auflage. Heidelberg Dordrecht London New York: Springer. ISBN: 978-3-540-70637-3.