

ENDBERICHT

FFG Projektnummer	844563	eCall Antragsnummer	3852737
Kurztitel	Freiformflächen aus Beton	Förderungsnehmerl n	ÖBV GmbH
Bericht Nr.		Berichtszeitraum	01.05.2012-31.08.2014
Bericht erstellt von	DI Benjamin Kromoser, DI Michael Pauser		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten

1. Ziele und Ergebnisse

1.1 Kurzfassung der grundlegenden Projektziele

Das Forschungsvorhaben Freiformflächen aus Beton verfolgt grundsätzlich das Ziel ein neues Schalenbauverfahren zu entwickeln, um frei geformte Betonflächen mit geringerem Aufwand von Ressourcen herstellen zu können. Komplizierte frei geformte Geometrien sind mit den momentan zur Verfügung stehenden konventionellen Bauverfahren oft nicht finanzierbar. Meist werden darum Entwürfe aufgrund fehlender finanzieller Mittel nicht verwirklicht und müssen dann den konventionellen massiven Bauweisen weichen. Grundsätzlich haben Schalen den Vorteil, dass für große Spannweiten ein nur sehr geringer Materialaufwand notwendig ist. In der Vergangenheit wurden bereits Schalen mit einem Längen-Dicken Verhältnis von bis zu 1/1000 verwirklicht. Im Vergleich dazu werden bei konventionellen Balken bzw. Betondecken L/D Verhältnisse von max. 1/50 bei sehr schlanken Bauteilen erreicht.

1.2 Zusammenfassung des ersten Forschungsjahres

1.2.1 Ziele des ersten Forschungsjahres:

Basierend auf der Patentanmeldung PCT/EP/2012/073678 der TU Wien war das Ziel des ersten Forschungsjahres die Idee für das neu zu entwickelnde Schalenbauverfahren in einem Großversuch umzusetzen. Das Bauverfahren sollte an der einfachsten mehrfach gekrümmten Geometrie, einer zweifach gekrümmten Schale experimentell überprüft werden, um eine Umsetzung in der Praxis möglich zu machen.

1.2.2 Umsetzungen der Ziele des ersten Forschungsjahres:

Um eine passende Materialkombination für den Schalenbau zu finden und die großen auftretenden Krümmungen aufnehmen zu können, wurden Vorversuche zur Ermittlung der maximalen Durchbiegung von unterschiedlichen Beton-Bewehrungskombinationen durchgeführt. Dabei wurden einerseits konventionelle Bewehrungsstäbe als auch Stahlseile mit unterschiedlichen Abständen und Lagen im Betonbauteil untersucht. Darauf basierend wurde dann eine optimale Materialkombination für den späteren Großversuch bestimmt. Anhand numerischer Simulationen wurde die gewählte Form statisch überprüft. Im Zuge der Versuchsplanung für das darauffolgende Experiment, die Verkrümmung einer ebenen Platte zu einer Kugelschale mit 13m Basisdurchmesser, wurden einige komplexere neue Detaillösungen entwickelt. Diese umfassten die Fertigung, Konstruktion und Verankerung der keilförmigen Pneus, die Entwicklung des Randdetails für die Befestigung bzw. Verankerung der ringförmig angeordneten Spannritzen, die Befestigung und Verlegung der unterschiedlichen Bewehrungen, die Ausführung der Sollbruchstellen in Kombination mit dem Betonmischverhältnis, die Anordnung und Herstellung der erforderlichen Schalungsteile, das Vorspannen der Bewehrung, die

Entwicklung einer digitalen Druckluftsteuereinheit zur Regulierung des Luftdrucks in den keilförmigen Pneus sowie die Überwachung des Luftdrucks im „Hebepneu“. In einem weiteren Schritt wurde die Kugelschale bei der Firma Doka in St.Martin/Karlsbach geschalt, bewehrt und betoniert. Der Versuch wurde schlussendlich Ende November mit einem positiven Versuchsergebnis durchgeführt. Zur Überprüfung der Anwendbarkeit der „Pneumatic Wedge Method“ an zweifach gekrümmten analytisch beschreibbaren Geometrien wurden grafische und numerische Simulationen durchgeführt. Um die Materialkombination für einen weiteren Großversuch im zweiten Forschungsjahr weiter zu verbessern, wurden zusätzlich zentrische Zugversuche an unterschiedlich bewehrten Betonkörpern durchgeführt.

1.2.3 Zusammenfassung der Schlüsselereignisse während des ersten Forschungsjahres

1.2.3.1 Regelung des Innendrucks der pneumatischen Luftkeile

Bei der Versuchsplanung stellte sich heraus, dass für eine positive Versuchsdurchführung eine separate Druckluftsteuerung der 16 pneumatischen Keile vorteilhaft wäre. In einem Vorversuch wurde ermittelt, dass die erforderlichen Drücke weit unter denen von konventionellen Druckluftsystemen liegen. Diese bewegen sich in der Regel zwischen 4 und 10 bar. Der im Vorversuch an einem Kissen mit 500x500mm ermittelte Grenzdruck betrug 120 Millibar. In Zusammenarbeit mit der Firma Festo wurden 2 Ventilinseln zusammengestellt, die schlussendlich den Druck in den pneumatischen Keilen mit digitalen Regelventilen steuerten. Eine alleinige Steuerung der Drücke mit den 16 digitalen Regelventilen war aufgrund der großen Leitungslängen und somit verbundenen hohen Reaktionszeit unmöglich. Zusätzliche Druckmessglieder ermöglichten eine reaktionsschnellere Regelung, bedurften jedoch auch einer aufwendigeren Programmierung und einer sehr genauen Feineinstellung der Speicherprogrammierbaren Steuerung (SPS) der Ventilinseln.

1.2.3.2 Druckverluste im kugelförmigen Pneu für das Heben und Verformen der Struktur

Um das Verformen der Kreisplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale möglich zu machen, wurde die Struktur einerseits durch einen großen Pneu, der unter der Betonplatte angeordnet war, gehoben und andererseits durch zwei Spannglieder in Umfangrichtung vorgespannt. Da eine ebene unverformte Kreisplatte nicht durch in der Mittelebene angeordnete Spannglieder aus der Ebene verformt werden kann, ist eine erste Auslenkung nur durch den unter der Betonplatte angeordneten „Hebepneu“ möglich. Da sich die ursprünglich ausgewählte Zeltplane der Firma Planex als nicht geeignet für das Projekt herausstellte, wurde auf eine Siloplane mit geringerem Gewicht und höherer Bruchdehnung zurückgegriffen. Beim Anheben der Struktur kam es verfahrenstechnisch zu einigen Leckagen an der Folie, was zu Luftverlusten und einem Stocken des Hebeprozesses führte. Durch Abdichtungsmaßnahmen in den Randbereichen und einer Erhöhung des zugeführten Luftvolumenstromes auf Maximalleistung der eingesetzten Seitenkanalverdichter konnte die Struktur weiter gehoben werden. Ab einer Hubhöhe in Plattenmitte von rund 900 mm war eine Unterstützung des Verformungsprozesses durch zusätzliches Vorspannen der ringförmig angeordneten Spannlitzen notwendig, um die Schale weiter zu verkrümmen. Die immer wieder auftretenden Leckagen der Folie konnte im Laufe des gesamten Verformungsprozesses kontinuierlich abgeklebt werden und ermöglichten somit die nahezu vollständige Verformung zu einer Kugelschale.

1.2.3.3 Ausschalen der ebenen Betonschale

Um die großen in Umfangrichtung auftretenden Verzerrungen während des Verformens der Platte zu einer zweifach gekrümmte Kugelschale aufnehmen zu können, war es notwendig keilförmige Auslässe in der Betonplatte zu schalen. Aufgrund der feuchten Witterung kam es nach begonnener Betonhydratation zu einem Aufquellen der für die Schalung verwendeten Mehrschichtplatten, was zu einem Verkleben der Schalung in der Betonstruktur führte. In den inneren Bereichen der Betonschale wurde neben den zur Verfügung stehenden Werkzeugen ein speziell angefertigtes Hebelwerkzeug hergestellt, um die Schalung vollständig aus der Struktur

entfernen zu können.

1.2.3.4 Erfolgreiche Errichtung einer zweifach gekrümmten Schale mit 13m Durchmesser

Nach einer umfangreichen Analyse der bereits in der Vergangenheit getesteten pneumatischen Schalenbauverfahren, einer aussagekräftigen Vorversuchsreihe an Biegebalken und einigen numerischen Simulationen zur Spannungsverteilung in der geplanten Struktur, konnte Ende November in St.Martin/Karlsbach eine erste erfolgreiche Versuchsschale mit der „Pneumatic Wedge Method“ errichtet werden. Die Ausgangsform bildete eine ebene, kreisförmige Betonplatte mit einer Dicke von 50mm, welche schlussendlich zu einer zweifach gekrümmten Schale mit einem Basisdurchmesser von 10m und einer Höhe von rund 4m verkrümmt wurde. Das Betonalter betrug am Tag der Versuchsdurchführung genau 3 Monate und die Würfeldruckfestigkeit betrug im Mittel 50N/mm².

1.3. Zusammenfassung des zweiten Forschungsjahres

1.3.1. Ziele des zweiten Forschungsjahres:

Die Hauptziele des zweiten Forschungsjahres sind einerseits das neue Bauverfahren auf freigeformte Betonfläche zu erweitern und in einem Großversuch auf die Anwendbarkeit in der Praxis zu testen sowie andererseits die verwendete Bewehrung in umfangreichen Vorversuchsreihen basierend auf den Ergebnissen des ersten Forschungsjahres zu optimieren.

1.3.2 Umsetzungen der Ziele des zweiten Forschungsjahres:

Das Bauverfahren wurde unter Zuhilfenahme der im ersten Jahr gewonnenen Ergebnisse und auf Basis der bei der Errichtung des Großversuchs aufgetretenen Probleme weiterentwickelt. In ersten Schritten wurden umfangreiche Untersuchungen zur Formfindung von freigeformten Schalenträgwerken und zur Eingrenzung auf mit dem neu entwickelten Verfahren herstellbare Formen durchgeführt. Basierend auf den in AP 10 „Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung“ und AP11 „Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten und zum Dehnungsverhalten der als Bewehrung dienenden Stahlseile“ ermittelten Ergebnissen wurden weitere Biegeversuche an unterschiedlichen Bewehrungsmaterialien, Bewehrungsgraden und inneren Hebelsarmen der Platten durchgeführt. In weiterer Folge konnte auf Basis eines Ausschlussverfahrens der Einfluss der getesteten Bewehrung als auch der Einfluss der getesteten Betongüte auf das Biegeverhalten bestimmt werden. Anhand der gewonnenen Ergebnisse konnte eine für die praktische Anwendung des Verfahrens optimale Bewehrung bestimmt werden. Da es wie im Zuge der in AP3 „Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahrens“ errichteten Kugelschale zu Querversätzen zwischen den einzelnen Betonelementen kam, wurde eine Querverschubsicherung entwickelt die derartige Relativverschiebungen der Betonelemente untereinander verhindert. Zur Überprüfung des Umformungsprozesses von einer ebenen Platte zu einer Schale an einer freigeformten Struktur und der Wirkungsweise der neu entwickelten Querverschubsicherung wurden zwei Versuchsschalen aus Holz-Mehrschichtplatten im Maßstab 1:5 hergestellt. Zur maßstabsgerechten Anpassung der Steifigkeit der Holz-Mehrschichtplatten wurden diese in regelmäßigen Abständen eingeschnitten. Schnittabstand und Schnitttiefe wurden an Bögen mit unterschiedlichen Schnittabständen und Schnitttiefen unter Eigengewichtsbelastung mit und Auflagerung in Plattenmitte bestimmt. Wie in Abschnitt 1.2.3.2 beschrieben kam es bei dem im Rahmen des ersten Forschungsjahres durchgeführten Großversuch an einer Kugelschale zu großen Luftverlusten. Um diese zu verhindern, wurden Drucktests an unterschiedlichen für Hebeplanen und keilförmige Pneus verwendbaren Folien durchgeführt und zusätzlich an Verbesserungen der Form des Pneus gearbeitet. Das Verfahren wurde anschließend an einer freigeformten Schale mit einer Länge von 17,6m, einer Breite von 10,8m und einer Höhe von 2,9m im Rahmen eines Großversuchs im Maßstab 1:1 erfolgreich getestet. Zur Demonstration von möglichen Anwendungen wurde anschließend eine 30mm Spritzbetonschicht mit zusätzlicher Karbon-Textilbewehrung eingelegt. Anschließend wurden durch zwei Teilabbrüche mögliche

praktische Anwendungen des Verfahrens demonstriert. Anhand von grafischen Simulationen und Finite-Element-Berechnungen wurden abschließend mögliche mit dem Verfahren herstellbare Formen simuliert.

1.3.3 Zusammenfassung der Schlüsselereignisse während des ersten Forschungsjahres:

1.3.3.1 Anwendung des neuen Bauverfahrens für freigeformte Betonflächen

Im Rahmen der in AP12 „Experimentelle Überprüfung der maximalen Krümmbarkeit der in AP 11 getesteten Bewehrungskombinationen an rechteckigen Versuchskörpern“ durchgeführten Biegeversuche konnte eine optimale Bewehrung für die Verkrümmung der ausgehärteten Betonplatten gefunden werden. Die maximale Krümmbarkeit sowie die Gleichmäßigkeit der Krümmung konnten damit verbessert werden. Durch die höhere mögliche Krümmbarkeit der Betonplatten wurden auch die mit dem Verfahren herstellbare Formenvielfalt entscheidend vergrößert. Krümmungsradien von ∞ bis zu 2,5m können innerhalb eines Elementes problemlos realisiert werden. Die entworfenen Strukturen können somit innerhalb dieser Grenzen optimal an die Anforderungen angepasst werden. Mögliche Einflussparameter auf die gewählte Form können dabei zum Beispiel die geplante Nutzung, eine optimal Tragwirkung oder ästhetische Ansprüche sein.

1.3.3.2 Verbesserung von Form und Material der verwendeten Pneus

Im Zuge der durchgeführten Drucktests an unterschiedlichen Materialien und ausführlichen Überlegungen zur Form des Hebepneus konnte die im ersten Forschungsjahr aufgetretenen Druckverluste vollkommen verhindert werden. Der maximal aufnehmbare Druck bei einem Krümmungsradius des Pneus von 0,4m konnte von maximal 150mbar auf 600mbar erhöht werden. Entscheidend dabei waren das verwendete Material und hauptsächlich die Schweißbarkeit des verwendeten Materials. Bei der im ersten Forschungsjahr errichteten 13m Kugelschale wurden die für den Hebepneu verwendeten beiden Folien mit Hilfe der in Umfangs-Richtung verlaufenden Spannlitzen zusammengeklemmt und somit verbunden. Dadurch befand sich die Dichtungsebene des Pneus außerhalb der ringförmigen bodenberührenden Schalenkante. Die Elemente bewegten sich also am Pneu nach innen und verursachten somit zusätzliche Leckagen. Um dieses Problem zu beseitigen wurde der Pneu bei der im zweiten Forschungsjahr errichteten Freiformschale 0,5m innerhalb des Schalenrandes abgeschweißt.

1.3.3.3 Erfolgreiche Errichtung einer freigeformten Betonschale im Maßstab 1:1

Nach umfangreicher Analyse des ersten Forschungsjahres sowie ausführlichen weiteren Untersuchungen zum Biegeverhalten der Beton-Bewehrungskombination während des Umformungsprozesses, an pneumatischen Strukturen und zum Formfindungsprozess konnte im Frühjahr 2014 auf den Aspanggründen der TU Wien im 3. Wiener Gemeindebezirk eine Freiformschale mit einer Länge von 17,6m, einer Breite von 10,8m, einer Höhe von 2,9m und einer Dicke von 50mm erfolgreich errichtet werden. Dabei konnten alle beim Großversuch des ersten Forschungsjahres aufgetretenen Probleme beseitigt und die Weiterentwicklung auf freie Formen umgesetzt werden.

1.3.3.3 Mögliche Anwendungen

Anhand der errichteten Freiformschale konnte ebenfalls im Maßstab 1:1 nach Auftragung einer zusätzlichen Spritzbetonschicht von 30mm mögliche Anwendungen durch teilweisen Abbruch der Struktur gezeigt werden. Im Detail wurde im ersten Teilabbruch ein Portal für die Anwendung als Wildbrücke über eine Straße oder Bahngleise ausgebrochen. In einem zweiten und letzten Teilabbruch wurde eine halbschalenförmige Konzertüberdachung hergestellt.

2. Arbeitspakete und Meilensteine

2.1 Übersichtstabellen

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP Nr.	Arbeitspaket Bezeichnung	Fertigstellungsgrad	Basistermin		Aktuell		Erreichte Ergebnisse / Abweichungen
			Anfang	Ende	Anfang	Ende	
1	Technologie zur Herstellung von zweifach gekrümmten Schalen ohne Schalung und Traggerüst	100%	03/12	07/12	05/12	09/12	Stand der Technik im Schalenbau, Überblick über bisher angewandte Bauverfahren
2	Entwicklung eines Schalenbauverfahrens zur Herstellung von zweifach gekrümmten Schalen durch Anspannen von Zuggliedern und Aufblasen von mehreren, unabhängigen Pneus	100%	03/12	12/12	05/12	02/13	Auf Basis des Patentanmeldung PCT/EP/2012/073678 der TU Wien wurde am Institut für Tragkonstruktionen ein Schalenbauverfahren zur Herstellung zweifach gekrümmter Schalen durch Anspannen von Zuggliedern und Aufblasen von mehreren, unabhängigen Pneus entwickelt.
3	Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahrens	100%	07/12	10/12	09/12	12/12	Zur praktischen Überprüfung des neu entwickelten Schalenbauverfahrens wurde im Rahmen des Projekt eine Versuchsschale mit 13m Durchmesser, einer Höhe von 4m und einer Dicke von 50mm geplant, berechnet und errichtet.
4	Entwurf und Berechnung von Schalenbauwerken mit analytisch beschreibbarer Geometrie auf der Basis des neuen	100%	09/12	02/13	04/13	06/13	Im Zuge der Auswertung des Großschalenversuchs wurden Parameter bestimmt die die Basis für mögliche Entwürfe für Schalen mit analytisch beschreibbare Geometrie, herstellbar mit dem neu entwickelten

	Schalensbauverfahrens						Schalensbauverfahren, bilden.
5	Endbericht für das 1.Forschungsjahr	100%	02/13	05/13	11/13	11/13	Dokumentation der im ersten Jahr erhaltenen Projektergebnisse.
10	Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung	100%			07/12	08/12	Bei der Verformung des erhärteten Betons treten sehr große Verzerrungen in der Betondruckzone und in der Bewehrung auf. Mit Hilfe numerischer Simulationen und einer anschließenden experimentellen Überprüfung an 6 unterschiedlichen Versuchskörpern wurde eine passende Materialkombination für den Großversuch (AP3) bestimmt.
11	Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten und zum Dehnungsverhalten der als Bewehrung dienenden Stahlseile	100%			05/13	08/13	Zur Bestimmung der optimalen Materialkonfiguration wurden unterschiedliche Bewehrungen eingebaut und anschließend in Form von zentrischen Zugversuchen überprüft. Dabei stellte sich heraus dass eine optimale Rissverteilung und ein optimaler Rissabstand mit einer Kombination aus Glasfasertextilien und Nirostastahlseilen Dm=5mm mit 7x19 Litzen erreicht werden kann.
6	Weiterentwicklung des Schalensbauverfahrens zur Herstellung von Schalensbauwerken mit freier Geometrie	100%	09/13	06/14	09/13	06/14	Basierend auf den Kenntnissen aus dem 1. Forschungsjahr wurden die dabei erkannten Probleme gelöst und das Schalensbauverfahren für freigeformte Flächen weiterentwickelt.
7	Experimentelle Überprüfung des Schalensbau-	100%	10/13	05/14	10/13	05/14	Mit Kenntnis der in AP 12, AP 13 und AP 14 gewonnen Ergebnisse wurde das Schalensbauverfahren

	verfahrens für Freiformflächen						an einem Prototypen mit einer ebenen Ausgangsgröße von 19,5x13m baupraktisch überprüft.
8	Entwurf und Berechnung von Schalenbauwerken mit freier Geometrie auf der Basis des neuen Schalenbauverfahrens	100%	03/14	08/14	03/14	08/14	Anhand von Visualisierungen und numerischen Simulationen wurden Formen bestimmt, die mit dem neuen Verfahren gebaut werden können. Zusätzlich wurden einzuhaltende Randbedingungen definiert anhand derer eine mögliche Anwendung des Verfahrens schnell bestimmt werden kann. Die mit dem Verfahren herstellbaren Formen wurden mit Hilfe von Finite-Element Rechnungen statisch überprüft.
9	Schlussbericht über das Forschungsprojekt	100%	08/14	08/14	08/14	08/14	Dokumentation der im gesamten Forschungsprojekt erhaltenen Ergebnisse.
12	Experimentelle Überprüfung der maximalen Krümmbarkeit der in AP 11 getesteten Bewehrungskombinationen an rechteckigen Versuchskörpern	100%	09/13	12/13	09/13	12/13	Zur Ermittlung einer für die baupraktischen Anwendung geeigneten Bewehrung wurden, aufbauend auf den in AP 10 und AP 11 gewonnen Ergebnissen, 4 Punkt – Biegeversuche an rechteckigen Betonplatten durchgeführt. Durch Vergleich der gesamten Vorversuchsergebnisse unter Berücksichtigung aller Einflussparameter konnte die optimale Bewehrung bestimmt werden.
13	Entwicklung einer Versatzsicherung der Betonelemente zur Verhinderung von ungewollten vertikalen	100%	09/13	03/14	09/13	03/14	Auf Basis der im Rahmen von AP 3 durchgeführten Großversuchs an einer Kugelschale aufgetretenen Probleme in Form eines Querversatzes der einzelnen Betonelemente wurde

	Verschiebungen						eine baupraktisch anwendbare Querverschubsicherung entwickelt.
14	Herstellung von Versuchsschalen unterschiedlicher Geometrien im Maßstab 1:5 aus homogenen Holz-Mehrschichtplatten	100%	09/13	12/13	09/13	12/13	Zur Überprüfung des Transformationsprozesses und der Wirkungsweise der in AP 13 entwickelten Querverschubsicherungen wurden 2 Versuchsschalen aus homogenen Holz-Mehrschichtplatten im Maßstab 1:5 im Vergleich zum geplanten Großversuch errichtet.
15	Modifikation der hergestellten Versuchsschale zu einem weiteren Bauwerkstyp durch teilweisen Abbruch der Struktur	100%	06/14	07/14	06/14	07/14	Um die Anwendungsmöglichkeiten des entwickelten Bauverfahrens zu bestimmen, wurden Visualisierungen an unterschiedlichen Bauwerkstypen, durchgeführt. Zwei dieser Anwendungen wurden durch teilweisen Abbruch des in AP 7 durchgeführten Großversuch hergestellt.

Tabelle 2: Meilensteine

Meilenstein Nr.	Meilenstein Bezeichnung	Basis-termin	Aktuelle Planung	Meilenstein erreicht am	Anmerkungen zu Abweichungen
1	Überblick über existierende Herstellungsverfahren	07/12	09/12	30.09.2012	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragten Termin (01.03.2012) auf den 01.05.2012 verschoben. Deswegen wurde der Meilenstein um 2 Monate später erreicht.
2	Planungsgrundlagen für die Anwendung des Schalenbauverfahrens für Schalen mit analytisch	12/12	02/13	28.02.2013	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragten

	beschreibbarer Geometrie				Termin (01.03.2012) auf den 01.05.2012 verschoben. Deswegen wurde der Meilenstein um 2 Monate später erreicht.
3	Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verfahrens unter baupraktischen Bedingungen	10/12	12/12	31.12.2012	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragten Termin (01.03.2012) auf den 01.05.2012 verschoben. Deswegen wurde der Meilenstein um 2 Monate später erreicht.
4	Kenntnis über die mit dem Schalenbauverfahren herstellbaren Schalenbauwerke mit analytisch beschreibbarer Geometrie	02/13	06/13	31.08.2013	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragten Termin (01.03.2012) auf den 01.05.2012 verschoben. Zusätzlich wurden während des Forschungsjahres weitere Arbeitspakete erforderlich, die eine Verlängerung des ersten Forschungsjahres um 4 Monate notwendig machten.
5	Dokumentation der Projektergebnisse des 1.Forschungsjahres	05/13		31.08.2013	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragten Termin (01.03.2012) auf den 01.05.2012 verschoben. Zusätzlich wurden während des Forschungsjahres weitere Arbeitspakete erforderlich die eine Verlängerung des ersten Forschungsjahres um 4 Monate notwendig machten.
6	Planungsgrundlagen für die	06/14		30.06.2014	Der Meilenstein konnte wie im

	Anwendung des Schalenbauverfahrens für Schalen mit freier (nicht analytisch beschreibbarer) Geometrie				Folgeantrag für das 2.Forschungsjahr geplant erreicht werden.
7	Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verfahrens unter baupraktischen Bedingungen zur Herstellung von Freiformflächen aus Stahlbeton	05/2014		31.05.2014	Der Meilenstein konnte wie im Folgeantrag für das 2.Forschungsjahr geplant erreicht werden.
8	Kenntnis über die mit dem Schalenbauverfahren herstellbaren Schalenbauwerke mit Freiformflächen	08/14		31.08.2014	Der Meilenstein konnte wie im Folgeantrag für das 2.Forschungsjahr geplant erreicht werden.
9	Schlussbericht über das Forschungsprojekt	08/2014		31.08.2014	Der Meilenstein konnte wie im Folgeantrag für das 2.Forschungsjahr geplant erreicht werden.

2.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

2.2.1 AP1 Literaturrecherche

Eine detaillierte Beschreibung von AP1 ist im Endbericht des ersten Forschungsjahres zu finden.

2.2.2 AP2 Entwicklung eines neuen Schalenbauverfahrens auf Basis des von der TU-Wien angemeldeten Patentes zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalenträgwerken

Eine detaillierte Beschreibung von AP2 ist im Endbericht des ersten Forschungsjahres zu finden.

2.2.3 AP3 Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahrens

2.2.3.1 Die Herstellung der ebenen Betonplatte

Das in AP2 neu entwickelte Schalenbauverfahren wurde an einer zweifach gekrümmten Versuchsschale erstmals praktisch getestet. Ausgehend von einer ebenen Betonplatte mit einem Durchmesser von 13m und 50mm Dicke wurde eine zweifach gekrümmte Kuppelschale mit einem Basisdurchmesser von 10m und einer Höhe von rund 4m gebaut. Die Versuchsvorbereitung umfasste folgende Arbeitsschritte:

- Erstellung eines ebenen Unterbauplanums mit Hilfe eines Deckenschalungssystems
- Herstellen der keilförmigen Schalungselemente sowie der Randabschalung

- Auflegen der als „Hebepneu“ dienenden Silofolie (die beiden Folien wurden durch ein Vlies getrennt um ein Verkleben zu verhindern)
- Auflegen der keilförmigen Pneus mit bereits eingefädelt Kegerschienen (zur Verankerung der Pneus im Beton)
- Positionieren der Schalungselemente auf der aufgelegten Siloplane und den keilförmigen Pneus
- Verlegen und Vorspannen der Bewehrungsstahlseile mit DM=5mm
- Verlegen der Querbewehrung mit DM=6mm
- Betonage der ebenen Platte

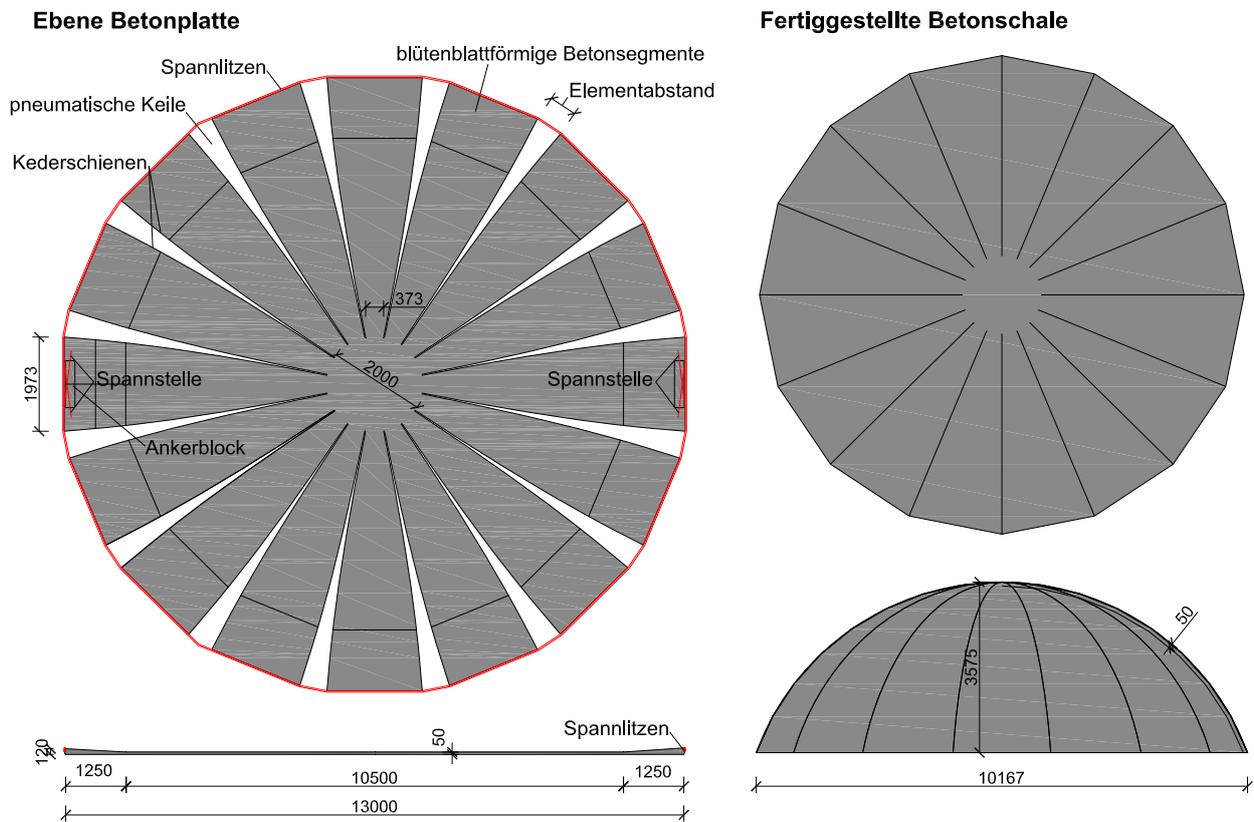


Abbildung 1 Versuchsaufbau für die Betonschale DM=13m

2.2.3.2 Versuchsdurchführung

Nach einer Wartezeit von 3 Monaten wurde der eigentliche Versuch, die Verkrümmung der ebenen Betonplatte zu einer zweifach gekrümmten Schale am 27.11.2012 bei der Firma doka im Werk St.Martin/Karlsbach durchgeführt. Wie bereits in Punkt 2.3.1 beschrieben, stellte die Druckregelung der 16 pneumatischen Keile eine besondere Herausforderung dar, da die zu regelnden Drücke mit rund 100mbar im Vergleich zum atmosphärischen Luftdruck von 1000mbar sehr gering sind. Für den Hebeprozess wurden 2 Seitenkanalverdichter verwendet. Zur Abdichtung des „Hebepneus“ wurde die unter der Betonplatte verlegte Silofolie in einem Abstand von 40cm zur Betonkante abgeschnitten, aufgeklappt und anschließend durch das Anspannen der Spannlitzen abgedichtet. Die Betonplatte wurde mit Hilfe des „Hebepneus“ in Plattenmitte bis zu einer Höhe von 0,9m angehoben. Anschließend wurde dieser Prozess durch zusätzliches Vorspannen der in Umfangrichtung verlegten beiden Spannlitzen unterstützt und die Schale wurde

bis zu einer Höhe von rund 4m angehoben und verkrümmt. Um einem ungleichmäßigen Verkrümmen der einzelnen Elemente entgegenzuwirken wurde der Druck der pneumatischen Keile zwischen 30 und 150mbar variiert.



Abbildung 2 Verlegen der Schalung am Unterbauplanum



Abbildung 3 Betonplatte nach der Betonage der Platte



Abbildung 4 Fertiggestellte Betonschale



- Selbstdichtungsverhalten von Trennrissen
- Korrosionsschutz von Spanngliedern
- Vorgespannte Stützen aus UHPC
- Ladungsrückhaltesystem aus textilibewehrten Fertigteilen
- Schalenträgerwerke mit der „Pneumatic Wedge Method“
- Ermittlung von Ausschallfristen



Abbildung 5 Fertiggestellte Betonschale

2.2.4 AP4 Entwurf und Berechnung von Schalenbauwerken mit analytisch beschreibbarer Geometrie auf der Basis des neuen Schalenbauverfahrens

Eine detaillierte Beschreibung von AP4 ist im Endbericht des ersten Forschungsjahres zu finden.

2.2.5 AP10 Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination

durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung

Eine detaillierte Beschreibung von AP10 ist im Endbericht des ersten Forschungsjahres zu finden.

2.2.6 AP11 Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten und zum Dehnungsverhalten der als Bewehrung dienender Stahlseile

Eine detaillierte Beschreibung von AP11 ist im Endbericht des ersten Forschungsjahres zu finden.

2.2.7 AP6 Weiterentwicklung des Schalenbauverfahrens zur Herstellung von Schalenbauwerken mit freier Geometrie

Auf Basis des AP2 „Entwicklung eines neuen Schalenbauverfahrens auf Basis des von der TU-Wien angemeldeten Patentes zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalenträgwerken“ wurde das Verfahren für die Anwendung von frei geformten Schalen weiterentwickelt.

Da sich Beton nicht zweiachsig verkrümmen lässt, können nur in einfach gekrümmte Flächen unterteilte Strukturen mit dem neuen Schalenbauverfahren errichtet werden. Somit stellt die Vereinfachung von einer glatten Struktur zu einer in einfach gekrümmte Flächen segmentierten Struktur einen wichtigen Teil des Entwurfs- und Planungsprozesses dar. Einflussparameter sind dabei die Gesamtgröße der Schale, die Größe der gewählten Elementanschlussplatte sowie die vorhandenen Krümmungen. Für die Zerlegung wird zuerst die perfekte glatte Struktur modelliert. Anschließend wird die Größe und Form der am Scheitelpunkt angeordneten Anschlussplatte bestimmt. Nun wird die Mantelfläche mit Hilfe eines speziellen Algorithmus in mehreren Schritten zu mehreren einfach gekrümmten Flächen optimiert. Abschließend wird diese Struktur für die Herstellung der ebenen Betonplatte abgewickelt.

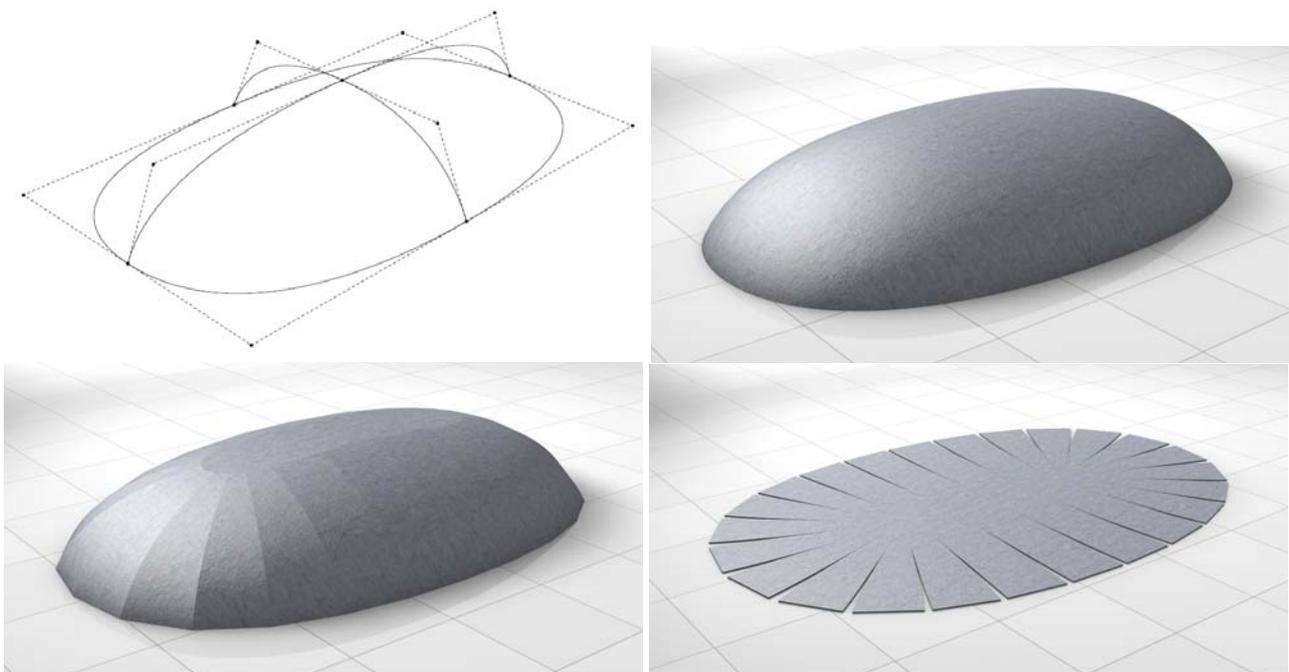


Abbildung 6 Entwurfsprozess von der Formfindung bis zur ebenen Ausgangsbetonplatte

2.2.8 AP7 Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahrens für Freiformflächen

2.2.8.1 Formfindung

Die Form des neuen Großversuchs ähnelt der eines Ellipsoidabschnitts. Die verwendete

Basiskurve ist jedoch keine Ellipse, sondern eine in ein Rechteck eingeschriebene Bézierkurve dritten Grades mit den Kontrollpunkten an den End- und Mittelpunkten der vier Seiten. Die Schnittkurven längs und quer sind ebenfalls Bézierkurven, die in einem gleichschenkligen Trapez, dessen seitliche Schenkel jeweils im 65° Winkel zur Grundseite stehen (Abbildung 7). Die Basiskurve ist somit im Vergleich zur Ellipse zu den Enden hin runder und weist bei annähernd gleicher Proportion eine geringere Krümmungsspitze an den Enden auf. Der 65° Grad-Winkel soll gewährleisten, dass der entstehende Raum auch bis in die Randzonen nutzbar ist.

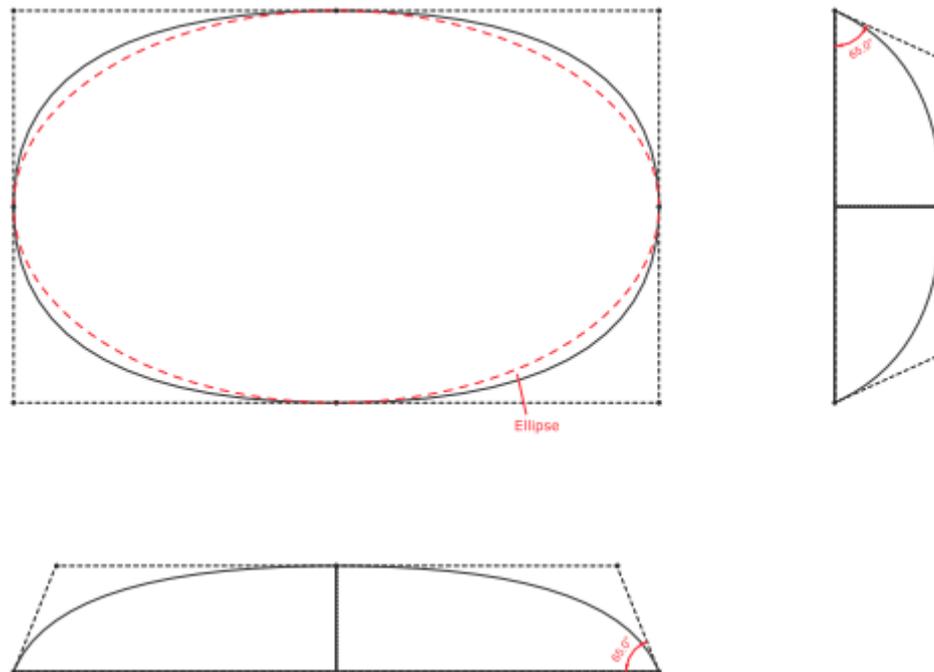


Abbildung 7 Formfindung Großversuch

2.2.8.2 Versuchsaufbau

Für die Herstellung dieser Schale mit der „Pneumatic Wedge Method“ ist wie in Punkt 2.2.8.1 beschrieben eine Segmentierung erforderlich. Dafür wurde die Zerteilung der Schale in eine verbindende längliche Platte im Zentrum und 24 Segmente die rundum laufen, gewählt. Damit kann gewährleistet werden, dass die keilförmigen Aussparungen im Randbereich nicht zu groß werden und die damit verbundenen Verzerrungen verhältnismäßig klein bleiben. Die Segmentbreite betrug außen rund 1,9m. Der Abstand der Keile bewegte sich an der Außenkante zwischen 250 und 350mm. In Abbildung 8 ist die geplante Segmentierung der Schale zu erkennen. Die Abmessungen der ebenen Platte betragen ca. $13 \times 19,5$ m. Im Endzustand erreichte die Schale eine Länge von 17,6m eine Breite von 10,8m sowie eine Höhe von 2,9m. Die Kuppel umschloss ein Volumen von 285m^3 und die Stärke der Schale beträgt 50mm. In den äußeren 500mm der Platte wurde die Schalendicke auf 200mm vergrößert, um das Gewicht im Randbereich zu erhöhen. Ein Abheben der Platte beim Aufstellvorgang konnte somit verhindert werden. In Abbildung 9 ist die eben beschriebene geplante Endform des Großversuchs zu sehen.

2.2.8.3 Versuchsdurchführung

Der Versuch wurde am 29.04.2014, 6 Tage nach Betonage der Betonplatte, durchgeführt. In Abbildung 10 ist die Betonplatte in ihrer Anfangslage zu sehen. Es konnte mit dem Einblasen der Luft begonnen werden. In den pneumatischen Keilen wurde in einer 1.Stufe ein Luftdruck von 20 mbar eingestellt. Die notwendige Druckluft dafür wird von einem Kompressor erzeugt. In einer 2.Stufe wurde der Luftdruck auf 30 mbar erhöht. Für das Einblasen der Luft in den Hebeplan war während des gesamten Versuchs nur einer der 4 Seitenkanalverdichter notwendig. Dieser war

aufgrund der Dichtigkeit des Systems ausreichend, um die zum Anheben und Verformen notwendigen Druck von 14-16mbar durchgehend zur Verfügung zu stellen. Die gesamte Platte konnte anfangs nur durch den Hebeplan verformt werden und die Spannglieder wurden nur gestrafft, um an der Betonplatte weiterhin eng anzuliegen. Nachdem 2/3 der Höhe erreicht waren, wurde der Verformungsprozess zusätzlich mit den Spannpressen unterstützt, bis die 24 Elementfugen auf die Sollbreite von 30mm geschlossen waren und die speziell entwickelten Abstandhalter fest an beiden Betonkanten anlagen (Abbildung 10). Die Schale wurde im Mittel mit einer Geschwindigkeit von 23mm/min angehoben. Durch die Querverschubsicherung (Stahlprofile in Abbildung 10) konnte Relativverschiebungen von den Elementkanten vollkommen verhindert werden.

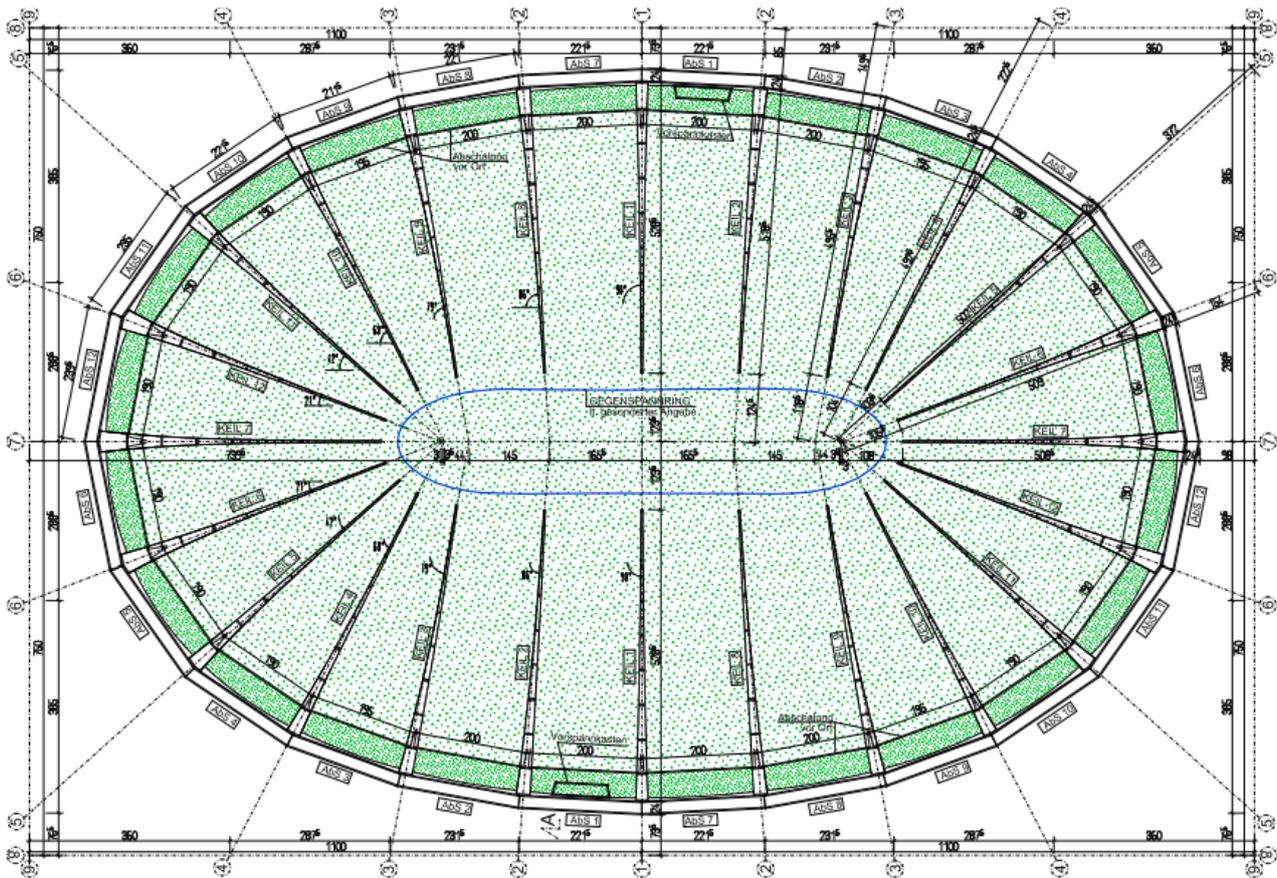


Abbildung 8 Segmentierung Großversuch

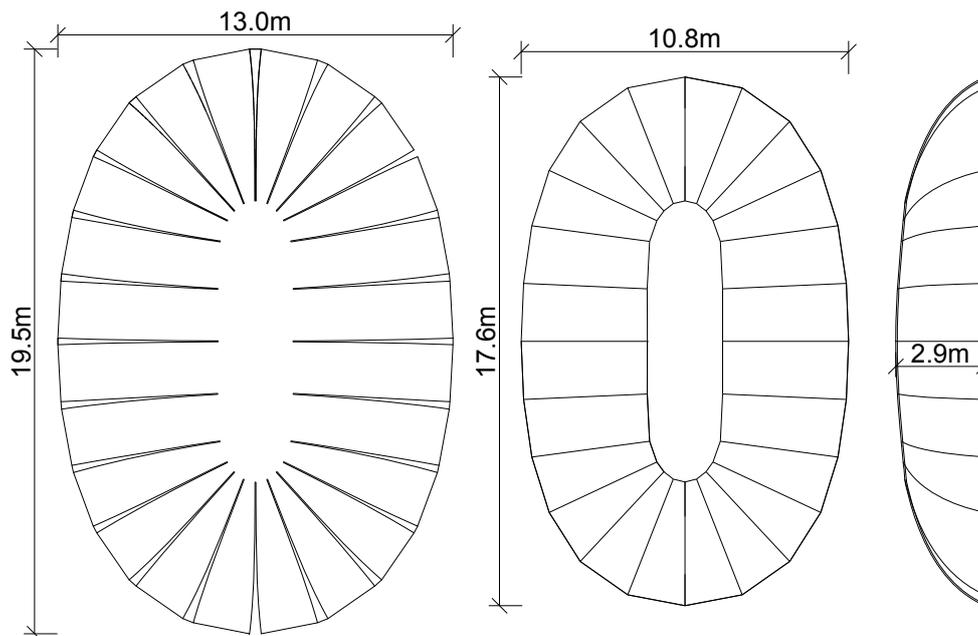


Abbildung 9 Abmessungen der Ausgangsplatte und der fertig gestellten Schale

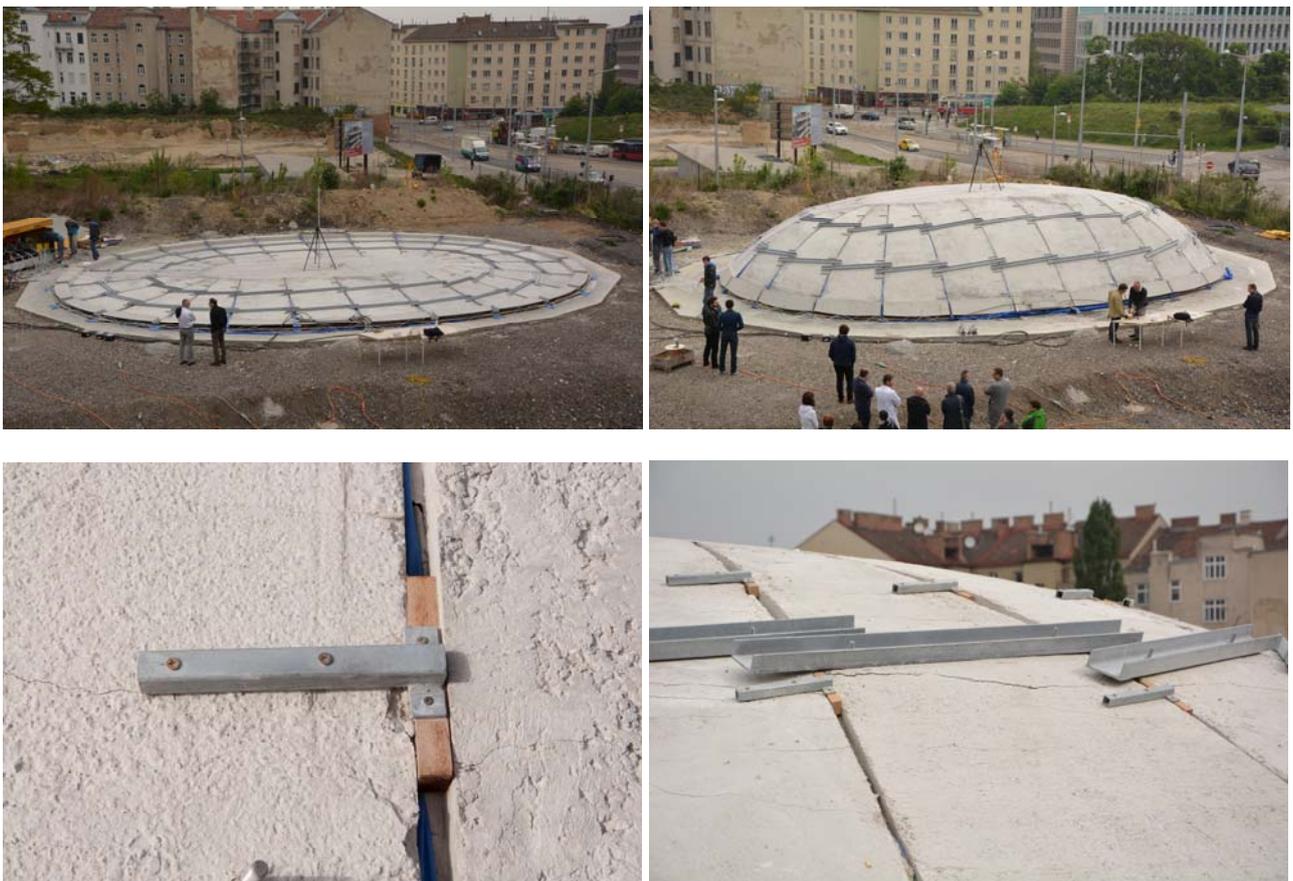


Abbildung 10 Ebene Ausgangsbetonplatte (links oben) und fertig verkrümmte Schale (rechts oben) sowie Abstandhalter (links unten) und Querverschubsicherung (rechts unten)

2.2.9 AP8 Entwurf und Berechnung von Schalenbauwerken mit freier Geometrie auf der Basis des neuen Schalenbauverfahrens

Die Untersuchung der analytisch beschreibbaren Grundformen in AP4 „Entwurf und Berechnung von Schalenbauwerken mit analytisch beschreibbarer Geometrie auf der Basis des neuen

„Schalenbauverfahren“ zeigt welche Möglichkeiten in Bezug auf Form und Krümmung mit der „Pneumatic wedge method“ möglich sind. Um aber weitere theoretisch mögliche Einsatzbereiche der „Pneumatic wedge method“ zu finden, wird eine mögliche weitere Manipulation zu freien Formen durchgeführt. Auf Basis der bisher untersuchten Geometrien können durch Variation oder Kombination der einzelnen Formen, genauso wie durch Einschnitte und Verzerrungen verschiedener Grundformen, wieder völlig neue Gesamtformen entstehen. Die Möglichkeiten der verschiedenen Variationen bzw. Kombinationen sind nahezu unendlich, insofern sollen die folgenden Beispiele (Abbildung 11) dazu dienen, eine Übersicht zu schaffen. Es sind nur kleine Änderungen, wie zum Beispiel ein Verschieben des Scheitelpunkts bzw. der Scheitellinie aus dem Zentrum oder eine Variation des Basiskreises oder einer erzeugenden Geraden, die schon große Wirkung zeigen können.

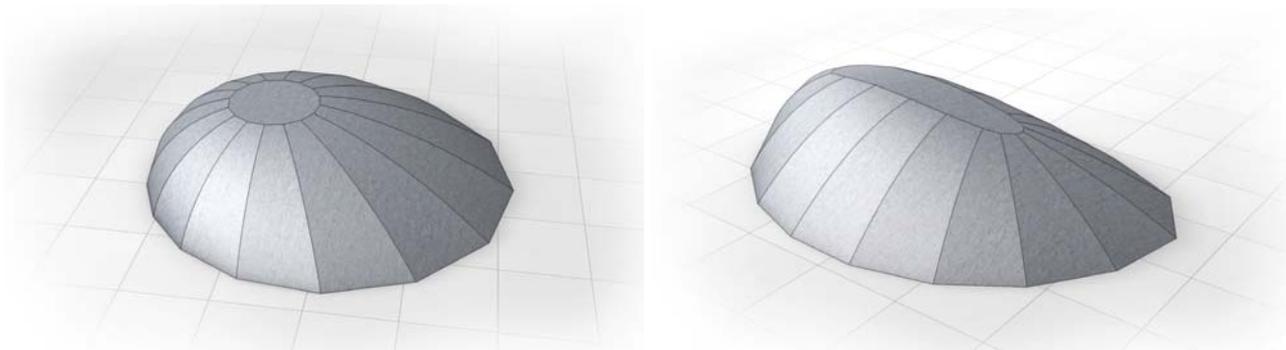


Abbildung 11 Modifikation des Scheitelpunktes (links) und Modifikation von Scheitelpunkt und Basislinie (rechts)

Nachfolgend wurden eine Vielzahl an möglichen Formen mit einem Finite-Element-Programm nachgerechnet.

Bei den Berechnungen werden folgende Materialwerte angesetzt:

- Beton: C30/37
- Schalendicke: 50 mm
- E-Modul: angepasst an die Krümmung in Anlehnung an die Vorversuche
- Bewehrung: Niro-Seile
- Belastung: Eigengewicht + 1,5 kN/m² Schnee

Beispielweise sind in Abbildung 12 die Ergebnisse einer nachgerechneten freigeformten Schale dargestellt.

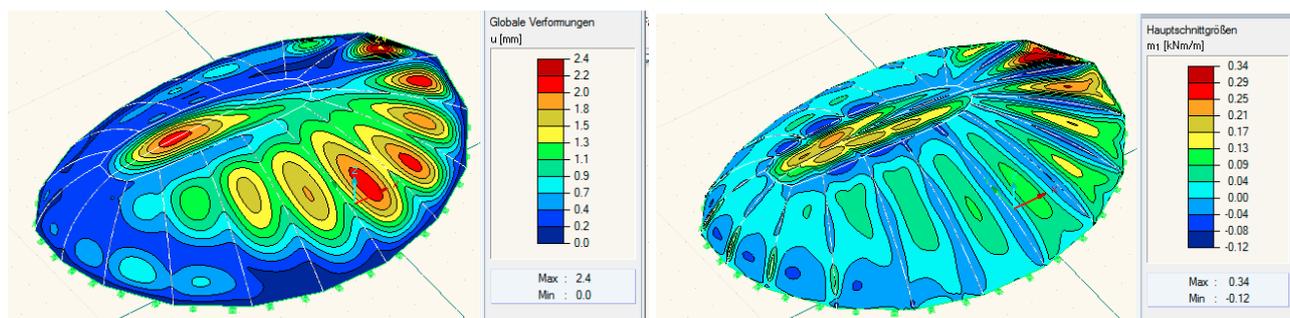


Abbildung 12 Finite-Element-Berechnung einer freigeformten Betonschale mit der auftretenden Durchbiegung (links) und den auftretenden Biegemomenten M1 (rechts)

2.2.10 AP12 Experimentelle Überprüfung der maximalen Krümmbarkeit der in AP 11 getesteten Bewehrungskombinationen an rechteckigen Versuchskörpern

Da die einzelnen Betonelemente während des Herstellungsvorganges sehr stark verkrümmt werden, muss eine Beton- Bewehrungskombination eingesetzt werden, die diese Krümmungen aufnehmen kann. Im Zuge der Voruntersuchungen wurden basierend auf den in AP 10 „Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung“ und AP11 „Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten und zum Dehnungsverhalten der als Bewehrung dienenden Stahlseile“ gewonnenen Ergebnissen weitere 4-Punkt-Biegeversuche an unterschiedlich bewehrten rechteckigen Betonplatten durchgeführt. Hier wird nur die für die Anwendung am besten passende Beton-Bewehrungskombination angegeben, die auch im Großversuch verwendet wurde. Die Abmessung der Betonplatten betrug 2500x500x50 mm. Es wurde ein Beton der Festigkeitsklasse C40/50 mit einem E-Modul von 35000 N/mm² verwendet. Als Bewehrung wurden je Element 5 Edelstahlseile mit 7x19 Litzen, Durchmesser 5 mm und einer Seilfestigkeit von 1570 N/mm² mit einem inneren Hebelsarm von 40mm angeordnet. Diese können einfach eingebaut werden, garantieren eine gleichmäßige Dehnungsaufnahme und ermöglichen große Krümmungen der Betonplatte ohne die Entstehung von großen Rissen. Das Ziel der Vorversuche war festzustellen, wie groß die Krümmung eines Elementes werden kann, bevor ein Versagen der Betondruckzone, ein Versagen der Bewehrung oder ein Verbundversagen auftritt. Das Momenten-Krümmungsdiagramm ist in Abbildung 13 dargestellt.

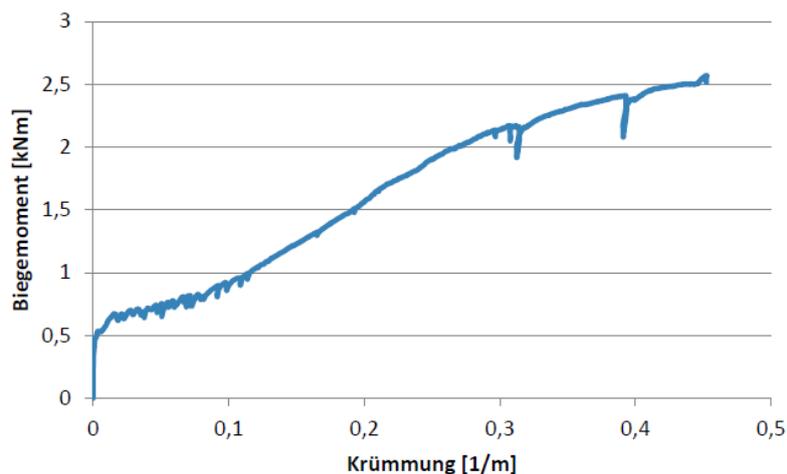


Abbildung 13 Momenten-Krümmungs-Diagramm 4-Punkt-Biegeversuch

2.2.11 AP13 Entwicklung einer Versatzsicherung der Betonelemente zur Verhinderung von ungewollten vertikalen Verschiebungen

Um die beim Großversuch an einer 13m Kugelschale im Rahmen des ersten Forschungsjahres aufgetretenen Querversätze zu verhindern wurde eine sekundäre Querverschiebungssicherung (siehe Abbildung 10), wie bereits in Absatz 2.2.8 beschrieben, entwickelt.

2.2.12 AP14 Herstellung von Versuchsschalen unterschiedlicher Geometrien im Maßstab 1:5 aus homogenen Holz Mehrschichtplatten

Um die Machbarkeit der geplanten Freiformschale vor Durchführung des Großversuchs im Vorfeld zu testen, wurden Versuche im Maßstab 1:5 durchgeführt. Bei diesem Maßstab wäre eine Durchführung der Versuchsanordnung aus Beton nicht mehr zielführend gewesen, da die Platten nur noch eine Stärke von 10mm gehabt hätten. So wurde entschieden, als Werkstoff eine 12 mm starke Mehrschichtplatte aus Holz zu verwenden. Die Einzelteile wurden mittels CNC-Fräse aus der Platte gefräst. Die Mehrschichtplatte war jedoch zu steif für die Simulation der Betonsegmente. Damit die Platten die erforderliche geringere Biegesteifigkeit aufweisen, wurden in die einzelnen Holzsegmente zusätzlich 9 mm tiefe Nuten in die Platte gefräst. Der

Parallelabstand der Einschnitte betrug 30mm. Grundsätzlich wurde versucht die Versuchsanordnung im kleinen Maßstab so wirklichkeitsgetreu wie möglich gehalten. Für den Anhebe- bzw. Transformationsprozess sollten ebenso Hebeplanen sowie Spannritzen verwendet werden. Zusätzlich wurden die Querverschubsicherungen in kleinerem Maßstab montiert um auch diese auf deren Funktionalität zu prüfen. (in Abbildung 14: die dunklen Holzelemente auf den Segmenten). Der Transformationsprozess der Holzplatte zu einer Holzschale konnte problemlos durchgeführt werden und es zeigte sich, dass die Schienen, die gegen die Verschiebung der Segmente montiert wurden, ihre Funktion erfüllen. Einzig das fehlende zusätzliche Gewicht an den Randbereichen führte dazu, dass der Hebeplanen die gesamte vergleichsweise leichte Schale zum Teil vom Boden abhob.



Abbildung 14 Vorversuch mit Holz-Mehrschichtplatten im Maßstab 1:5

2.2.13 AP15 Modifikation der hergestellten Versuchsschale zu weiteren Bauwerkstypen durch teilweisen Abbruch der Struktur

Das mögliche Einsatzspektrum des neu entwickelten Bauverfahrens ist sehr groß und könnte von einer simplen Grünbrücke (z.B. Wildquerung) bis hin zum spektakulären Raum für Ausstellungen reichen. Die Machbarkeit vor Ort müsste von Fall zu Fall überprüft werden, aber viel mehr als ein ebener stabiler Untergrund wäre meist nicht notwendig. Bedingt durch die Tatsache, dass sich eine doppelt gekrümmte Betonschale mittels "Pneumatic wedge method" mit vergleichsweise geringem Aufwand herstellen lässt, ergeben sich viele Verwendungsmöglichkeiten für eine mit diesem Verfahren errichtete Schale. Bei Abmessungen der Schale in ähnlichen Größenordnungen wie bei den Großversuchen (15 - 25 Meter Länge oder Durchmesser, 3 bis 4 Meter Höhe) kommen schon sehr viele Funktionsszenarien in Frage. Überall, wo gehobene ästhetische Ansprüche an ein Gebäude gestellt werden und sich die entsprechende Funktion auch in eine doppelt gekrümmte Schale integrieren lässt, kann ein Einsatz einer so gefertigten Schale überlegt werden. Die Schale könnte als Infopoint in einem Ortskern verwendet werden. Es besteht die Möglichkeit die Schale entsprechend auszustatten, um Auskunftsstelle, Infotafeln, Ticketschalter etc. zu integrieren. In weiterer Folge könnte sie nicht nur Infopoint und/oder Ticketschalter sein, sondern auch gleichzeitig als Eingang oder Tor in einen geschlossenen Bereich (Veranstaltung, Konzert, Zoo, Markt uvm.) fungieren, da auch eine optische Signalwirkung garantiert ist. Ebenso denkbar wäre ein Veranstaltungsraum, der einerseits spektakuläres räumliches Ambiente bietet und andererseits als großer offener Raum zur Verfügung steht. Eine andere denkbare Anwendung könnte eine Funktion als Bühnenüberdachung bzw. Musikpavillon sein. Entsprechend wären unzählige Formvariationen alleine durch eine jeweils andere Schnittführung möglich. Zwei dieser möglichen Schnittformen wurden am errichteten Großversuch in Form von 2 Teillabbrüchen wie in Abbildung 15 getestet.



Abbildung 15 Mögliche Anwendungen als Wildbrücke und Konzertüberdachung

3. Projektteam und Kooperationen

Im Zuge des ersten Forschungsjahres schied Dipl.-Ing. Dr. techn. Anton Schweighofer aufgrund einer beruflichen Veränderung aus dem Projektteam aus. In weiterer Folge wird sein Aufgabenbereich von DI Charlotte Schönweger übernommen.

Dipl.-Ing. Charlotte Schönweger

Dipl.- Ing. Charlotte Schönweger hat Bauingenieurwesen an der TU Wien studiert und ihr Studium im März 2013 abgeschlossen. Ihre Diplomarbeit beschäftigte sich mit der numerischen Simulationen an einer Metall-Beton-Verbundplatte. Im Projekt führte Frau Schönweger einen Teil der numerischen Simulationen durch.

1.Forschungsjahr:

Die von der Firma Planex angebotene Zeltplane wurde während der Versuchsplanung durch eine dehnbarere, weitaus preisgünstigere Siloplane ersetzt und fiel als Kostenstelle somit weg. Im Gegenzug wurden Dokamatic – Tische als Unterbauplanum für den Großversuch verwendet. Diese wurden von der Firma Doka angemietet. Die Mietkosten ersetzen somit die weggefallene Kostenstelle in der Abrechnung.

2.Forschungsjahr:

Durch die die zusätzlich von der Fa. Strabag applizierte Spritzbetonschicht und sowie die darauffolgenden Teilabbrüche im Rahmen des AP 15 „Modifikation der hergestellten Versschale zu einem weiteren Bauwerkstyp durch teilweisen Abbruch der Struktur“ kam es zu höheren Kosten als angeboten.

4. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

Die neu entwickelte Technologie zur Herstellung von Schalen und Freiformflächen aus Beton kann an ausgewählten Bauprojekten im In- und Ausland angewendet werden. Entwürfe mit freier Formgebung, die bisher an einem zu großen Kostenaufwand gescheitert sind, könnten durch das neue Bauverfahren realisierbar werden.

Das entwickelte Verfahren wurde im Zuge des in Amstetten durchgeführten Großversuches anhand der einfachsten möglichen Geometrie, einer zweifach gekrümmten Kugelschale, auf die praktische Machbarkeit überprüft. Der positive Verlauf des in Punkt 2.2 beschriebenen Großversuches an einer Versuchsschale mit 13m Durchmesser stellt die Basis für eine

Optimierung und Weiterentwicklung des Bauverfahrens dar. In Arbeitspaket 4 „Entwurf und Berechnung von Schalenbauwerken mit analytisch beschreibbarer Geometrie auf Basis des neuen Schalenbauverfahrens“ werden mit Hilfe von Simulationsprogrammen Schalen mit analytisch beschreibbarer Geometrie in mit dem Verfahren herstellbare Flächen vereinfacht.

Das Verfahren konnte im Rahmen des zweiten Forschungsjahres verbessert und die im ersten Forschungsjahr aufgetretenen Probleme behoben werden. Im Rahmen des in AP 7 „Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahrens für Freiformflächen“ durchgeführten Großversuchs konnte gezeigt werden dass das Verfahren in der Praxis auch für freigeformte Strukturen verwendet werden kann. Anhand des Prototyps wurden mögliche Anwendungen gezeigt. Aufgrund der begrenzten Mietdauer des Versuchsareals wurde dieser am Ende des Forschungsprojektes rückgebaut.

Publikationen:

- [1] Kromoser, B., Kollegger, J.: *Methods for transforming flat concrete plates into double curved shell structures*. Conference Proceedings, PhD-Symposium Karlsruhe, 2012.
- [2] Kromoser, B., Eichwalder, B., Kollegger, J.: *Simulation of large strains in concrete specimen – centric tensile tests using steel ropes as reinforcement*. Conference Proceedings, Euro-C, St. Anton, 2014.
- [3] Kromoser, B., Kollegger, J.: *Building free formed concrete surfaces by using the „pneumatic wedge method“*. Conference Proceedings, PhD-Symposium Quebec, 2014.
- [4] Kromoser, B., Kollegger, J.: *Herstellung von Schalenträgwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“ – Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen mit Hilfe von pneumatischer Schalung*. Beton- und Stahlbetonbau, 109, 2014.
- [5] Kromoser, B., Kollegger, J.: Application areas for pneumatic forming of concrete. IASS-Journal. in review, submitted 26.05.2014.
- [6] Kromoser, B., Kollegger, J.: *Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century*. In review, submitted 16.07.2014

Dissertation:

Kromoser, B.: *Pneumatisches Verformen von ausgehärtetem Beton – Die Errichtung von Betonschalen aus ursprünglich ebenen Platten*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, in Arbeit.

Diplomarbeiten:

Sohm, M.: *Entwurf von geeigneten Schalenformen für die „Pneumatic wedge method“*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, April 2014.

Waglechner, M.: *Planung und Herstellung einer freigeformten Betonschale*. Institut für Tragkonstruktionen, TU Wien, Juni 2014.

1. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

Die Erläuterung zu Kosten & Finanzierung ist als Excel – Tabelle hinzugefügt.

2. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

Erste Ergebnisse wurden bereits beim PhD-Symposium in Karlsruhe im Juli 2012 sowie bei der Euro-C Konferenz im März 2014 in St. Anton am Arlberg mit den Konferenzbeiträgen „Methods for transforming flat concrete plates into double curved shell structures“ und „Simulation of large strains in concrete specimen – centric tensile tests using steel ropes as reinforcement“ veröffentlicht. Weiters wurde das neue Bauverfahren beim zehnten fib International PhD

Symposium in Civil Engineering an der Université Laval in Québec, Canada von 20.-23. Juli 2014 mit dem Beitragsnamen "Building free formed concrete surfaces by using the "pneumatic wedge method" vorgestellt. Im August 2014 wurde ein Fachbeitrag unter dem Namen „Herstellung von Schalenträgwerken aus Beton mit der „Pneumatic Wedge Method“ - Ein neues Bauverfahren für den Bau von zweifach gekrümmten Betonflächen mit Hilfe von pneumatischer Schalung“ in der Fachzeitschrift Beton- und Stahlbetonbau herausgegeben von Ernst und Sohn veröffentlicht. Zusätzlich wurde zwei weitere Fachbeiträge unter den Namen "Application areas for pneumatic forming of concrete" für die Publikation in der Fachzeitschrift der IASS (International Association for Shells and Spatial Structures) und „Pneumatic forming of hardened concrete – building shells in the 21st century“ für die Publikation in der Fachzeitschrift des fib (Federation Internationale du Beton) eingereicht.

Folgende Unternehmen haben das Projekt mit den genannten Beträgen unterstützt und Gegenzug dafür Lizenzen für die Nutzung des Verfahrens erhalten:

Firma	finanzielle Unterstützung	In-kind Leistungen
Doka GmbH	10000	5000
ÖBB-Infrastruktur AG	20000	
Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierungs- Aktiengesellschaft vertreten durch die ASFINAG Bau Management GmbH	5000	
Strabag AG	5000	
Porr Bau GmbH	5000	
Swietelsky Baugesellschaft m.b.H	2500	
Habau Hoch- und Tiefbaugesellschaft m.b.H.	2500	
Bilfinger Berger Baugesellschaft .m.b.H	2500	
Tiwo Wopfinger Tiefbau- u. Umweltbaustoffe GmbH	1500	1000
Grund-, Pfahl- , und Sonderbau GmbH	2000	
Holcim Wien GmbH	2500	
Lafarge Zementwerke GmbH	2500	
Sika Österreich GmbH	500	500
Festo GmbH		7000

1. Das Arbeitspakete 10 „Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung“ und das Arbeitspaket 11 „Experimentelle Untersuchungen zum Verbundverhalten und zum Dehnungsverhalten der als Bewehrung dienenden Stahlseile“ wurde zusätzlich in das Arbeitsprogramm des ersten Forschungsjahres aufgenommen.

2. Im 2. Forschungsjahr wurden die Arbeitspakete 12 „Experimentelle Überprüfung der maximalen Krümmbarkeit der in AP 11 getesteten Bewehrungskombinationen an rechteckigen Versuchskörpern“, 13 „Entwicklung einer Versatzticherung der Betonelemente zur Verhinderung von ungewollten vertikalen Verschiebungen“, 14 „Herstellung von Versuchsschalen unterschiedlicher Geometrien im Maßstab 1:5 aus homogenen Holz Mehrschichtplatten“ und „15 Modifikation der hergestellten Versschale zu einem weiteren Bauwerkstyp durch teilweisen

Abbruch der Struktur“ zusätzlich in das Arbeitsprogramm aufgenommen.

3. Meldungspflichtige Ereignisse

Im gesamten Verlauf des Forschungsprojektes traten keine meldungspflichtigen Ereignisse auf.