ZWISCHENBERICHT

FFG Projektnummer	836757	eCall Antragsnummer	3062765
Kurztitel	Freiformflächen aus Beton	FörderungsnehmerIn	ÖBV GmbH
Bericht Nr.	3062765	Berichtszeitraum	01.05.2012- 31.08.2013
Bericht erstellt von	DI Benjamin Kromoser		

Richtwert für den Umfang: 10-20 Seiten

1. Ziele und Ergebnisse

- Wurden die dem Förderungsvertrag zugrunde liegenden Ziele erreicht?
 Sind diese Ziele noch aktuell bzw. realistisch?
 Achtung: Änderungen von Zielen erfordern eine Genehmigung durch die FFG.
- Vergleichen Sie die Ziele mit den erreichten Ergebnissen.
- Beschreiben Sie "Highlights" und aufgetretene Probleme bei der Zielerreichung.

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 dann Entwürfe aufgrund fehlender finanzieller Mittel nicht verwirklicht und müssen dann den konventionellen massiven Bauweisen weichen. Grundsätzlich haben Schalen den Vorteil, dass für sehr 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.

2. Zusammenfassung des ersten Forschungsjahres

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 mehrfachgekrümmten Geometrie, einer zweifach gekrümmten Schale experimentell überprüft werden, um eine Umsetzung in der Praxis möglich zu machen.

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 Bewehrung/Betonkombinationen 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

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 1 / 16

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 Spannlitzen, 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. Im letzten Teil des Forschungsjahres wurde die Schale vermessen und die Versuchsdaten ausgewertet und verarbeitet.

2.3 Zusammenfassung der Schlüsselereignisse während des ersten Forschungsjahres

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.

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.

2.3.2 Ausschalen der ebenen Betonschale

Um die großen in Umfangrichtung auftretenden Verzerrungen während des Verformens von 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 Verklemmen 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.

2.3.3 Erfolgreiche Errichtung einer zweifach gekrümmten Schale mit 13m Durchmesser

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 2 / 16

Nach einer umfangreichen Analyse der bereits in der Vergangenheit getesteten pneumatischen Schalenbauverfahren, einer aussagekräftigen Vorversuchsreihe 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 50N/mm².

3. Arbeitspakete und Meilensteine

3.1 Übersichtstabellen

Erläuterung:

Die Tabellen sind analog zum Förderungsansuchen aufgebaut. Basistermin: Termin laut Förderungsansuchen bzw. laut Vertrag gültigem Projektplan Aktuelle Planung: Termin laut zum Zeitpunkt der Berichtslegung gültiger Planung

Tabelle 1: Arbeitspakete

AP	Arbeitspaket	Fertig- stellungs-	Basister	Basistermin			Erreichte Ergebnisse /
Nr.	Bezeichnung	grad	Anfang	Ende	Anfang	Ende	Abweichungen
1	Technologie zur Herstellung von zweifach gekrümmten Schalen ohne Schalung und Traggerüst	0%	03/12	07/12	05/12	09/12	Die Kosten für das AP1 "Literaturrecherche" wurden nicht gefördert, die Recherche wurde dennoch durchgeführt.
2	Entwicklung eines Schalenbauverfahre ns 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.
10	Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton- Bewehrungskombin ation durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung	100%			07/12	08/12	Bei der Verformung des erhärteten Betons treten sehr große Verzerrungen in Betondruckzone und Bewehrung auf. Mit Hilfe numerischer Simulationen und einer anschließenden experimentellen Überprüfung an 6 unterschiedlichen Versuchskörpern wurde eine passende Materialkombination für

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 3 / 16

							den folgenden Großversuch bestimmt.
3	Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahre ns	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 Schalenbauverfahre ns	50%	09/12	02/13	01/13	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 Schalenbauverfahren, bilden.
5	Endbericht für das 1.Forschungsjahr	100%	02/13	02/13	04/13	04/13	Dokumentation der im ersten Jahr erhaltenen Projektergebnisse.

Tabelle 2: Meilensteine

Meilen- stein 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 beantragt 01.03.2012 auf den 01.05.2012 verschoben.
2	Planungsgrundlagen für die Anwendung des Schalenbauverfahrens für Schalen mit analytisch beschreibbarer Geometrie	12/12	02/13	28.02.2013	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragt 01.03.2012 auf den 01.05.2012 verschoben.
10	Auswahl einer entsprechenden Beton- Bewehrungskonfiguration für den folgenden Schalengroßversuch	-	08/12	31.08.2012	Im Zuge der Entwicklung des neuen Schalenbauverfahrens wurden größere Krümmungen als bei den bisher verwendeten Materialkombinationen notwendig. Anhand von entsprechenden numerischen

					Simulationen und praktischen Experimenten konnte eine passende Bewehrung und deren Lage im Bauteil bestimmt werden.
3	Nachweis der Funktionsfähigkeit des Verfahrens unter baupraktischen Bedingungen	10/12	12/12	31.12.2012	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragt 01.03.2012 auf den 01.05.2012 verschoben.
4	Kenntnis über die mit dem Schalenbauverfahren herstellbaren Schalenbauwerke mit analytisch beschreibbarer Geometrie	02/13	06/13	-	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragt 01.03.2012 auf den 01.05.2012 verschoben.
5	Dokumentation der Projektergebnisse des 1.Forschungsjahres	02/13	04/13	30.04.2013	Der Projektstart wurde aufgrund des Genehmigungsverfahrens von ursprünglich beantragt 01.03.2012 auf den 01.05.2012 verschoben.

3.2 Beschreibung der im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten

- Beschreiben Sie die im Berichtszeitraum durchgeführten Arbeiten, strukturiert nach den Arbeitspaketen.
- Konnten die Arbeitsschritte und -pakete gemäß Plan erarbeitet werden?
 Gab es wesentliche Abweichungen?
- Die Beschreibung beinhaltet ebenso eine allfällige Änderung der angewandten Methodik.
 <u>Achtung:</u> Änderungen an der Methodik und wesentliche Änderungen im Arbeitsplan
 erfordern eine Genehmigung durch die FFG.

3.2.1 AP1 Literaturrecherche

Vor Beginn der Entwicklung eines neuen Schalenbauverfahrens war es notwendig die im vergangenen Jahrhundert getesteten Schalenbaumethoden ausführlich zu analysieren. Die wichtigsten Beiträge lieferten dabei Wallace Neff, Haim Heifetz und Dante Bini. Die ersten der beiden genannten Techniker entwickelten Verfahren basieren auf einer mit Luft und Gas bzw. Flüssigkeit gefüllten Membrane die im Nachhinein mit einer Betonschicht überdeckt bzw. besprüht wird. Haim Heifetz arbeitete dabei mir höheren Innendrücken um die Deformation in der pneumatischen Schalung möglichst gering zu halten. Nach dem Erhärten wurde das eingebrachte Medium ausgelassen bzw. abgepumpt und anschließend die Membrane entfernt. Im Laufe der Jahre wurden von verschiedenen Wissenschaftlern weitere Versuche mit geänderten Konfigurationen versucht.

In weiterer Folge entstanden viele Varianten dieser Bauweisen, die die kritische Phase des Jungbetons und

andere konstruktive Aspekte, unterschiedlich behandelten. Im Folgenden werden kurz die Entwicklungen der pneumatisch gestützten Schalungen und ihre unterschiedlichen Ausführungsformen dargestellt:

- Versteifung der Schalung durch das Versteifen des Füllmediums
- Versteifung der Schalung durch die Bewehrung (Seile, Drahtnetze)
- Versteifung der Schalung durch aufgebrachte aufschäumende Polyurethane
- Stabilisierung durch schichtweise Aufbringung des Betons auf die Membran
- Aufbringung des Betons auf die Außenseite
- Aufbringung des Betons auf die Innenseite
- Verwendung von Glasfaser- oder Stahlfaserbeton
- Hochdrucksystem (Domecrete)

Ein ähnliches, aber etwas anders konzipiertes Verfahren, wurde in Italien vom Architekten Dante Bini im Jahre 1965 entwickelt. Das Verfahren basierte auf der Verkrümmung von noch nicht hydradiertem Beton zu einer zweifach gekrümmten Kugelschale. Dabei wurden spezielle Spiralbewehrungen eingesetzt um die auftretenden Verzerrungen in Ringrichtung aufnehmen zu können. Um den Hydratationsprozess zu verlangsamen wurde neben dem Einsatz von Verzögerern zusätzliche Folien als "Gegenschalung" verwendet.

Die in der Vergangenheit an der TU Wien entwickelten Schalenbauverfahren basieren auf der Herstellung einer ebenen Betonplatte, die in erhärtetem Zustand zu einer zweifach gekrümmten Schale verformt wird.

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

3.2.2.1 Problemanalyse bisher getesteter pneumatischer Schalenbauverfahren

Trotz aller Bemühungen und Fortschritten mit den neu entstandenen und erfundenen Bauverfahren, die einen erheblichen Einfluss auf die Verringerung der Herstellungskosten hatten, konnten die Stahlbetonschalen den Schritt mit anderen Bauweisen nicht halten. Ab etwa 1975 wurden immer weniger Schalen gebaut und so trat eine Stagnation des Schalenbaus ein, die noch bis heute andauert.

Mitunter lagen die Gründe dabei bei folgenden Punkten:

- Während des Herstellungsprozesses traten oft zu große Imperfektionen auf, die eine sichere Lastabtragung und die einwandfreie Nutzung der erstellten Bauwerke stark beeinträchtigten.
- Es konnte oft nicht die gewünschte Oberflächenqualität der Schalen erreicht werden was sich in Konkurrenz mit den konventionellen Schalungsmethoden als problematisch herausstellte.
- Oftmals konnten Spezialeinbauteile aus Folie, Styropor und Holz nur mehr schwer aus der fertiggestellten Struktur entfernt werden.
- Die möglichen herstellbaren Formen blieben bei den meisten entwickelten Methoden nur sehr eingeschränkt. Teilweise war mit den Bauverfahren nur die Herstellung von zweifach gekrümmten Kugelschalen bzw. einfach gekrümmten rohrartigen Formen möglich.
- Durch die Verwendung von verhältnismäßig geringen Dicken bei den Membranen kam es oft zu Leckagen und in weiterer Folge zu Luftverlusten die nur mehr teilweise repariert werden konnten.

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 6 / 16

- Normentliche Regelung der Betondeckung machten die Herstellung von Schalen mit sehr geringer Dicke fast unmöglich, was im Schalenbau einen zusätzlichen Rückschritt bedeutete.
- Aufgrund des pneumatischen Überdrucks ist oft eine Sicherung der Strukturen gegen Abheben notwendig.

3.2.2 AP10 Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung

Das Arbeitspaket 10 "Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung" wurde zusätzlich in das Arbeitsprogramm des ersten Forschungsjahres aufgenommen.

3.2.2.1 Anforderungen

Da während des Verformungsprozesses sehr große Krümmungen bzw. Biegungen der Elemente auftreten war es notwendig eine Beton-Bewehrungskombination zu finden die große Krümmungen der bereits erhärtenden Betonelemente möglich macht. Deshalb wurden Vorversuche zur maximalen Krümmbarkeit verschiedener Materialkombinationen durchgeführt. In einem weiteren Projektschritt wurden die Versuche durch numerische Simulationen zur Überprüfung nachgerechnet.

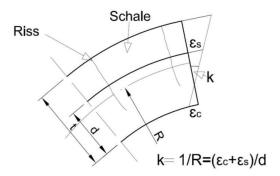


Abbildung 1 Mechanische Zusammenhänge für das Kaltverformen der Stahlbetonschalen

Abbildung 1 zeigt den mechanischen Zusammenhang zwischen Bewehrung und Beton beim Kaltverformen der Elemente. Die maximal erreichbare Krümmung ist, wie die angeführte Gleichung beschreibt, direkt von der Betonstauchung, der Dehnung der Bewehrung und dem Abstand d zwischen Außenkante der Betondruckzone und Mittelachse der Bewehrung abhängig.

3.2.2.2 Vorversuche zum Biegetragverhalten

Da die gute Krümmbarkeit der bereits erhärteten Betonsegmente zu den Schlüsseleigenschaften des neu entwickelten Bauverfahrens gehört, wurden in 6 unterschiedliche Experimente in Form von 4 Punkt-Biegeversuchen durchgeführt. Die repräsentative Krümmung der Elemente wurde zwischen den beiden mittleren Auflagern bestimm, da dort das eingeleitete Moment konstant ist. Die maximale Durchbiegung wurde einerseits mit 2 Wegaufnehmern (Feldmitte und Außenkante) und andererseits durch analoges Messen mit Hilfe eines Zahlstabes an 6 unterschiedlichen Messpunkten bestimmt. Die aufgebrachten Lasten wurden mit Hilfe einer Kraftmessdose direkt an der hydraulischen Presse (Feldmitte) gemessen.

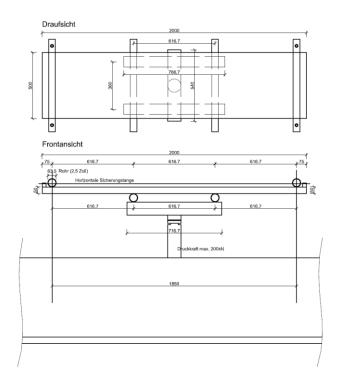




Abbildung 2 Versuchsaufbau für die Vorversuche zum Biegetragverhalten

Es wurde insgesamt mit sechs rechteckigen Versuchskörpern experimentiert. Die Prüfkörper wiesen allesamt dieselben Außenabmessungen auf die wie folgt festgelegt wurden:

Abmossungon [mm]				
Längo	2000			
Broite - B	500			
Dicko - H	50			

Variiert wurden folgende Parameter:

- Die Bewehrungsart (Betonstahlbewehrung DM=6mm, Stahlseile DM=5mm)
- Die Bewehrungslage (d=25mm, d=36mm)
- Die Anzahl der eingebauten Bewehrungsstäbe (4 Stk., 5 Stk.)

Tabelle 1 Versuchskörperzusammenstellung

Versuchs- körper	Bewehrungsart	Anzahl der Bewehrungsstäbe (Stk)	Lage der Bewehrung (d) [mm]	Abstand der Bewehrung [mm]	Sollbruchstellen
1	Stahlseile DM=5mm	5	25	100	alle 150mm
2	Stahlseile DM=5mm	5	25	100	keine
3	Stahlseile DM=5mm	5	36	100	alle 150mm
4	Betonstahl DM=6mm	5	25	100	keine
5	Betonstahl DM=6mm	5	36	100	alle 100mm
6	Betonstahl DM=6mm	4	36	120	alle 100mm

Ergebnisse:

Das Ziel der Vorversuche war festzustellen, wie groß die Krümmung eines Elementes werden kann, bevor eine Versagen von Betondruckzone, ein Versagen der Bewehrung oder ein Verbundversagen auftritt. Aufgrund der großen Bruchdehnung von 8% wiesen die mit Stahlseilen bewehrten Elemente eine wesentlich höhere Durchbiegung und somit auch größeren Krümmungen auf. Es trat bei den mit Stahlseilen bewehrten Versuchskörpern entweder kein Versagen oder ein Versagen der Betondruckzone auf. Um die Bruchform der Elemente zu verbessern wurden nach dem ersten Biegetest zusätzliche Sollbruchstellen an der Zugseite des Elementes-mit Hilfe eines Einhandwinkelschleifers eingeschnitten.

Bei den mit konventionellen Bewehrungsstäben armierten Versuchskörpern wurde die maximale Krümmung durch ein Versagen der Betondruckzone durch ein Abreißen der Bewehrung begrenzt. Die erreichten Durchbiegungen lagen dabei bei rund 50% der mit Stahlseilen bewehrten Elemente. Der Einfluss der unterschiedlichen Anzahl der Bewehrungsseile bzw. Bewehrungsstäbe und der unterschiedlichen Bewehrungslagen stellte sich im Vergleich dazu als sehr gering dar. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst.

Tabelle 2 Versuchsergebnisse Biegeversuche Gars am Kamp

Versuchs- körper	maximale Durchbiegung [mm]	maximale Krümmung [1/m]	Versagensart
1	217	0,48	Versagen der Betondruckzone
2	210	0,47	Versagen der Betondruckzone
3	229	0,52	kein endgültiges Versagen
4	107	0,25	Versagen der Betondruckzone
5	102	0,24	Bewehrungsriss
6	106	0,24	Bewehrungsriss

Resultierend aus den Versuchsergebnissen fiel die Entscheidung für die Bewehrung der Schale (AP3) auf eine Bewehrung mit Stahlseilen (DM=5mm) und einem Abstand d=25mm von der Betonunterkante bis zur Schwerachse der Bewehrung.

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 9 / 16

3.2.2.3 Numerische Simulationen mit unterschiedlichen Bewehrungen

Mit Hilfe des nichtlinearen Finite-Elemente-Programmes Atena der Firma Cervenka Consulting wurden die Versuchskörper 1,3, 4 und 5 nachgerechnet.

Variiert wurden folgende dabei folgende Parameter:

- Die Bewehrungsart (Betonstahlbewehrung DM=6mm, Stahlseile DM=5mm)
- Die Bewehrungslage (d=25mm, d=36mm)

Ergebnisse:

Aufgrund der Symmetrie wurde das halbe System simuliert.

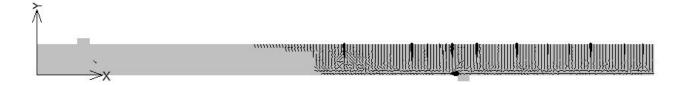


Abbildung 3 Rissverteilung Versuchskörper 1

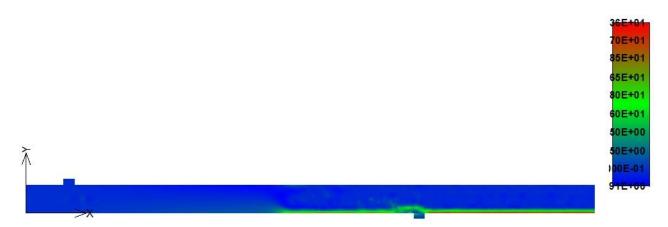


Abbildung 4 Spannungsverteilung Versuchskörper 1

In Abbildung 3 und Abbildung 4 sind die für die Ergebnisse von allen Versuchskörpern repräsentative Rissverteilung bzw. Spannungsverteilung von Versuchskörper 1 dargestellt.

Tabelle 3 Ergebnisse der numerischen Berechnungen

Versuchskörpe	maximale Durchbiegung [mm] Berechnung	maximale Durchbiegung Versuch
r		
1	235	217
3	225	229
4	156	107
5	152	102

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 10 / 16

3.2.3 AP3 Experimentelle Überprüfung des Schalenbauverfahrens

3.2.3.1 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 eine Basisfläche 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 eingefädelten Kederschienen (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

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 11 / 16

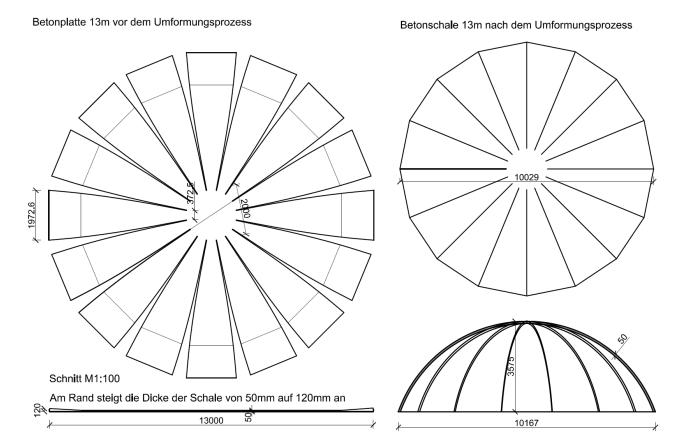


Abbildung 5 Versuchsaufbau für die Betonschale DM=13m

3.2.3.2 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 im Vergleich zum atmosphärischen Luftdruck mit rund 100mbar 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 6 Verlegen der Schalung am Unterbauplanum

Abbildung 7 Betonplatte nach der Betonage der Platte





Abbildung 8 Fertiggestellte Betonschale

Abbildung 9 Fertiggestellte Betonschale

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

Mit der "pneumatic wedge method" können Formen erstellt werden die ihre Ausgangsform in einer ebenen Platte haben und im Zuge eines Umformungsprozesses zu der gewünschten Geometrie verkrümmt werden können. Ziel dieses Arbeitspaketes ist es Schalen mit analytisch beschreibbarer Geometrie mit Hilfe eines Simulationsprogrammes in eine mit dem Verfahren herstellbare Formen zu transformieren. Momentan befinden sich erste Simulationsversuche mit dem Programmaufsatz Evolutetools für Rhino in Arbeit.

4. Projektteam und Kooperationen

- Gibt es wesentliche Veränderungen im Projektteam (interne SchlüsselmitarbeiterInnen und externe Parnter/Drittleister)?
- Gehen Sie auf Änderungen in der Arbeitsaufteilung ein.
 Gibt es Auswirkungen auf die Kosten- / Finanzierungsstruktur und die Zielsetzung?

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 beschäftige sich mit der numerischen Simulationen an einer Metall-Beton-Verbundplatte. Im Projekt wird Frau Schönweger für die numerische Simulation verantwortlich sein.

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.

5. Wirtschaftliche und wissenschaftliche Verwertung

- Beschreiben Sie die bisherigen Verwertungs- und / bzw. Weiterverbreitungsaktivitäten. Ist eine Verwertung möglich?
- Listen Sie Publikationen, Dissertationen, Diplomarbeiten sowie etwaige Patentmeldungen, die aus dem Projekt entstanden sind, auf.
- Welche weiterführenden F&E-Aktivitäten sind geplant?

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 im ersten Forschungsjahr 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 dem gerade in Arbeit befindlichem 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.

Die von der TU Wien aufgegriffene Idee "Verfahren zur Herstellung von zweifach räumlich gekrümmten Schalen" wurde am 30.November 2011 beim österreichischen Patentamt eingereicht. Nach der Genehmigung des österreichischen Patentes wurde am 29.November 2012 ein Schutz für alle Staaten beim europäischen Patentamt beantragt. Das Rechercheergebnis fiel positiv aus. Der Prüfer konnte keinen Stand der Technik finden, der den Verfahrensansprüchen entgegensteht und sieht diese folglich als neu und erfinderisch an.

6. Erläuterungen zu Kosten & Finanzierung

Die Abrechnung ist als eigene Datei im Excel-Format hochzuladen. Die Verwendung der im

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 14 / 16

eCall zur Verfügung gestellten Vorlage ist verpflichtend. Beachten Sie den FFG Kostenleitfaden (www.ffg.at/kostenleitfaden) bzw. Ausschreibungsdokumente.

Abweichungen vom Kostenplan sind an dieser Stelle zu beschreiben und zu begründen.

>Text<

7. Projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen

- Gehen Sie auf projektspezifische Sonderbedingungen und Auflagen (laut §6 des Förderungsvertrags) ein, sofern diese im Förderungs- bzw. Werkvertrag vereinbart wurden.
- 1. Die Projektergebnisse sind zu veröffentlichen. Die Veröffentlichungsschrift ist im Endbericht beizulegen

Erste Ergebnisse wurden bereits beim PhD-Symposium in Karsruhe im Juli 2012 im Konferenzbeitrag "Methods for transforming flat concrete plates into double curved shell structures" und dem dazugehörigen Vortrag veröffentlicht. Weitere Veröffentlichungen der Ergebnisse sind einerseits beim Symposium der International Association for Shell and Spatial Structures (IASS 2013) in Breslau, Polen von 23.-27. September sowie beim zehnten fib International PhD Symposium in Civil Engineering an der Université Laval in Québec, Canada von 20.-23. Juli 2014 geplant. Für die Vorstellung des neuen Schalenbauverfahrens an der IASS 2013 Konferenz in Breslau, Polen wurde bereits ein Abstract eingereicht.

2. Es ist die Teilnahme von mindestens drei Unternehmen, von denen eine Barbeteiligung von mindestens 20% der anerkennbaren Projektkosten zu leisten ist, erforderlich.

Folgende Unternehmen haben das Projekt mit den genannten Beträgen unterstützt:

Firma	finanzielle Unterstützung	In-kind Leistungen
Doka GmbH	10000	5000
ÖBB-Infrastruktur AG	20000	
Autobahnen- und Schnellstraßen- Finanzierungs-	5000	
Strabag AG	5000	
Porr Bau GmbH	5000	
Alpine 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

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 15 / 16

- 3. Die Kosten für das AP1 "Literaturrecherche" wurden nicht gefördert.
 - Für die Durchführung des Projektes wurde die notwendige Recherche dennoch durchgeführt.
- 4. Das Arbeitspaket 10 "Ermittlung der für das Verfahren optimalen Beton-Bewehrungskombination durch numerische Simulation und experimentelle Überprüfung" wurde zusätzlich in das Arbeitsprogramm des ersten Forschungsjahres aufgenommen.

8. Meldungspflichtige Ereignisse

Gibt es besondere Ereignisse rund um das geförderte Projekt, die der FFG mitzuteilen sind (siehe auch Richtlinien – Anhang zu 5.3., 5.3.5), z.B.

- Änderungen der rechtlichen und wirtschaftlichen Einflussmöglichkeiten bei dem/der Förderungsnehmer/in
- Insolvenzverfahren
- Ereignissen, die die Durchführung der geförderten Leistung verzögern oder unmöglich machen
- Weitere Förderungen für dieses Projekt

Im ersten Forschungsjahr traten keine meldungspflichtigen Ereignisse auf.

Projekt Akronym: FAB, Projektnummer: 836757 16 / 16