

Komplexer neuer Baustoff

Die Bauingenieure gewannen neue Erkenntnisse über das Tragverhalten kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffs (CFK)

Im Mai wird ein experimentelles mobiles Gebäude nach Berlin kommen und dort zehn Wochen lang zu besichtigen sein, dessen Tragwerk ganz aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) besteht. Bei diesem Bauwerk haben die projektbeteiligten Bauingenieure neue Erkenntnisse über das Tragverhalten von CFK gewonnen; die wichtigste: quer zur Faser ist CFK noch schwächer als befürchtet. Dennoch bedeuten die Resultate kein prinzipielles Hindernis für den Einsatz von CFK im Hochbau. Im Gegenteil: Das Potential von CFK im Hochbau steigt mit fallenden Preisen. Die Vorteile dieses komplexen neuen Baustoffs, beispielsweise sein geringes spezifisches Gewicht, seine geringe Korrosions- und Ermüdungsanfälligkeit oder seine enorm kleine bis leicht negative Ausdehnung bei Temperaturerhöhung, können, wie der folgende Beitrag exemplarisch belegt, im Hochbau jetzt vermehrt genutzt werden – nicht nur für Tragwerksverstärkungen, sondern auch für vielfältige Bereiche des Neubaus – aber nur da, wo die Vorteile von CFK auch tatsächlich zum Tragen kommen.

Fachwerkstäbe sind in mit Carbonfasern verstärktem Kunststoff (CFK) ausgeführt. Die gekreuzten Verbände bestehen aus vorgespannten Stahlseilen. Die in Querrichtung biegesteif ausgeführten, bis zum Dach durchlaufenden Stützen sind aus sicherheitstechnischen Gründen als CFK-umhüllte Stahlstützen ausgebildet (Anprallsicherheit). In Längsrichtung sind die Stützen zum Boden hin mit Stahlseilen abgesehen. Quer sind sie biegesteif, als Vierendeelträger ausgeführt.

In einem modifizierten Wickelverfahren wurden die rechteckigen Fachwerkstäbe in CFK hergestellt (Abb. 4). Die beiden Stabenden in Stahl sind mittels Stahlstangen un-

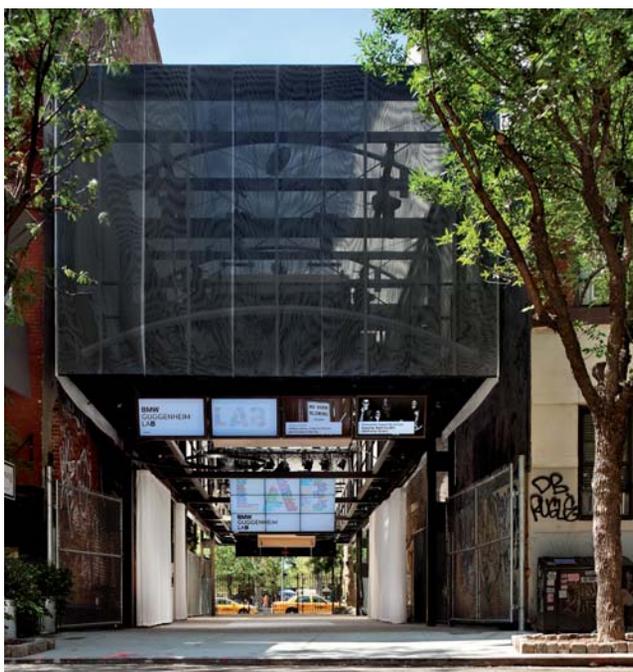
Prof. Dipl. Bau-Ing. Josef Kurat |
Dipl. Bau-Ing. FH Rebecca von Büren
| Ingenieurbüro Staubli,
Kurath & Partner AG (Zürich)

Im Rahmen der Kunstinitiative BMW Guggenheim Lab hat die Solomon Guggenheim Stiftung in New York im Herbst 2010 die japanischen Architekten des Ateliers Bow Wow aus Tokio eingeladen, einen mobilen Pavillon zu entwickeln. Vorgabe war, dass der Pavillon eine anpassungsfähige Infrastruktur bietet, in der Workshops, Ausstellungen, Fachvorträge, VIP-Einladungen oder auch Quartierfeste durchgeführt werden können. Als Eröffnungstermin stand der 1. August 2011 fest.

Entstanden ist in dieser enorm kurzen Zeit ein innovatives Konzept mit einem mobilen Pavillon in neuartiger Carbonbauweise, in welchem – ähnlich einer Theaterbühne – die Requisiten an Motoren hochgezogen und heruntergelassen werden (Abb. 1 und Abb. 2).

Die Tragstruktur in Carbonbauweise

Der Hauptpavillon besteht aus einem acht Meter hohen Gebäude mit einem Grundriss von dreißig Metern Länge und sechs Metern Breite (Abb. 3). Die Tragstruktur des Labs besteht aus einem Raumbauwerk, welches auf sechs Stützen steht. Die größtenteils auch quer belasteten



Guggenheimmuseum New York

Abb. 1: Hauptpavillon ohne Betrieb



Guggenheimmuseum New York

Abb. 2: Hauptpavillon in Betrieb. Die Möblierung dauert weniger als eine Stunde

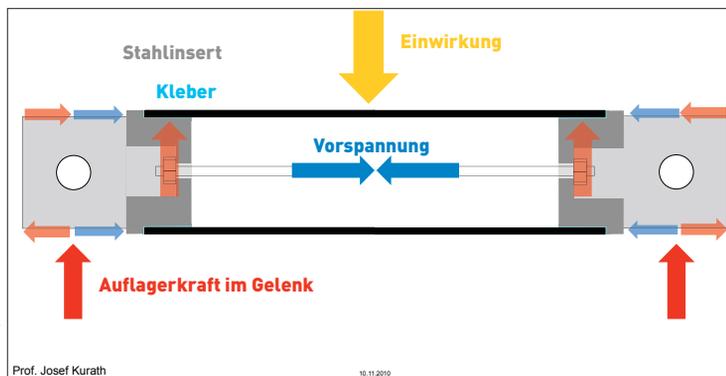


Abb. 6: Prinzip der Stabstatik mit innerer Vorspannung. Die Vorspannung überdrückt die inneren Zugkräfte zwischen Stabwandung und Endknoten infolge der entstehenden Momente aus den Gelenkquerkräften



Abb. 7: Fachwerkstab mit Endknoten in Stahl und innerer Vorspannung

**Carbonstruktur für ein Gebäude
BMW Guggenheim Lab – ein mobiles Städtebau-Labor**

Tabelle mit den Fasereigenschaften

Eigenschaften einer UD-Laminatschicht mit 60 % Volumenfaseranteil HS-Fasern (UD: Unidirektionale Faserrichtung – alles parallele Fasern, Herstellerangaben)

Fasereigenschaften	N/mm ²	
Zugfestigkeit in Faserrichtung	3'950	100 %
Elastizitätsmodul Faser längs	238'000	100 %
UD-Laminat		
Zugfestigkeit Faserrichtung	2'070	52 %
Druckfestigkeit Faserrichtung	1'650	42 %
Querdrukfestigkeit	110	2,8 %
Querzugfestigkeit	96	2,4 %
Schubfestigkeit x-y, x-z	112	2,8 %
Schubfestigkeit y-z	35	1,0 %
Elastizitätsmodul		
Elastizitätsmodul Zug längs	136'000	57 %
Elastizitätsmodul Druck längs	107'000	45 %

Abb. 8: Vergleich der sehr hohen mechanischen Festigkeiten in Faserrichtung mit den sehr schlechten Eigenschaften in die anderen Richtungen

Abb. 9: Vergleich der Fasereigenschaften mit den schlussendlich nutzbaren Laminateneigenschaften in Stabrichtung

**Carbonstruktur für ein Gebäude
BMW Guggenheim Lab – ein mobiles Städtebau-Labor**

Tabelle mit den berechneten Stabeigenschaften der Carbonstäbe:

Nutzungsgrad Bauteil im Vergleich zu den Fasereigenschaften (Faservolumengehalt 60 %):

Tragsicherheitsniveau	Zug-Festigkeit	Druck-festigkeit	Im Vergleich zur:		Elastizitätsmodul Zug
N/mm ² (MPa)			Faser-Festigkeit Zug	UD-Einzel-Schicht Druck	
	N/mm ²	N/mm ²			N/mm ²
Faser HS T300	3'950		100 %		238'000
Einzel-schicht UD gerechnet	2'370		60 %		143'000
Einzel-schicht UD gemessen Labor	2'070	1'650	52 %	100 %	136'000

Bauteil gerechnet	1'191	961	24 %	58 %	80'300
Bauteil gerechnet mit Beulen im Druckgurt		426	11 %	26 %	
Bauteil gemessen (Grossversuch)		490	12 %	29 %	83'040

Bauteil gestörter Bereich (zBp. Stabendbereich) gerechnet		213	5 %	13 %	80'300

Spannungsspitzen zu vermeiden, wurde der Spalt zwischen Carbonrohr und Stahlinsert mit einem speziellen Kleber verfüllt.

Carbonfasern haben unglaublich gute Eigenschaften in Längsrichtung auf Zug. Sowohl die Festigkeit, als auch die Steifigkeit sind enorm hoch. Die Druckfestigkeit der Fasern ist aufgrund des mikroskopischen Aufbaues bereits wesentlich tiefer als die Zugfestigkeit. Im Gegensatz zu den sehr hohen Zugfestigkeiten der Faser von 3500 bis 7000 N/mm² liegen die Querdruk-, Querzug- und die Schubfestigkeit der Faser bei 1 bis 3 Prozent dieses Wertes (Abb. 8). Dieser Gegensatz der Fasereigenschaften führt dazu, dass die nutzbaren mechanischen Eigenschaften des Verbundbauteiles je nach Schichtenaufbau und Kraftwirkung circa 50 bis 95 Prozent tiefer liegen als die eigentliche Zugfestigkeit der Carbonfaser (Abb. 9).

Neben der Harz- und der Verarbeitungsqualität sowie den Umwelteinflüssen sind folgende Wirkungen für diesen großen Abfall der nutzbaren mechanischen Eigenschaften verantwortlich:

- Der maximale Faservolumengehalt liegt bei rund siebzig Prozent. Dadurch wird die Festigkeit um mindestens dreißig Prozent reduziert.

- Beim Laminieren wird als kleinste Einheit ein Roving verwendet. Der Roving ist ein Faserbündel mit mehreren 1000 Fibrillen (Fasern). Es ist mit keinem Produktionsverfahren möglich, die einzelnen Fibrillen so zu legen, dass alle parallel zueinander gestreckt im Laminat liegen. Dies hat zur Folge, dass beim Kräfteaufbau erste Fasern bereits reißen, bevor andere Fasern wirklich beginnen zu tragen.

- Sind die einzelnen Lagen im Laminataufbau nicht sauber aufeinander abgestimmt, führen interlaminare Spannungen zu einem frühzeitigen Versagen. Meistens ist auch bei optimalem Lagenaufbau ein solcher Zwischenfaserbruch für das Versagen des Bauteiles verantwortlich (Abb. 10).

- Kann sich die Wandung eines längsbeanspruchten Stabes in Querrichtung nicht frei verformen (zum Beispiel infolge Querdehnungsbehinderung bei Endplatten am Stab), kann dies bereits zu großen Querspannungen und zu einem frühzeitigen Bruch führen. Dies kann den eigentlichen Tragwiderstand in Längsrichtung um weitere fünfzig Prozent reduzieren (Abb. 7).

- Durch die relativ dünnwandigen Strukturen und die eher schlechten Biegeeigenschaften der Profilwandungen treten bei ebenen Wandstrukturen der Bauteile oft Beulprobleme auf (Abb. 11).

Die meisten dieser Eigenschaften sind berechenbar, oder es können Abminderungsfaktoren eingesetzt werden. Die Be-

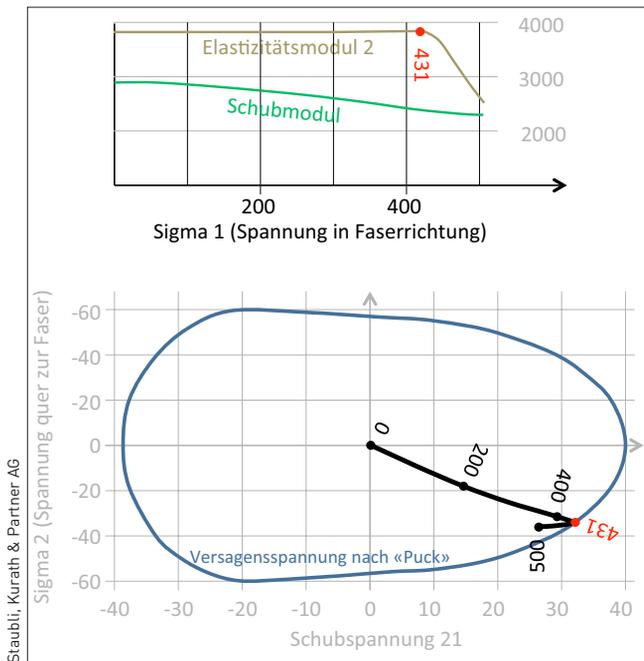


Abb. 10: Das Erstschichtversagen des Stabwandlamina-tes (16 Schichten) findet in Schicht 3 infolge Zwischenfa-berbruchs bei einem Sigma 2 von 431 N/mm² statt. Die Faserrichtung dieser Schicht liegt im 45°-Winkel zur Stabrichtung. Die eigentliche Faserlängsspannung liegt noch weit unter deren Bruchfestigkeit. Trotzdem kommt es kurz nach diesem Moment zum rechnerischen Gesamtversagen des Querschnittes (alles in N/mm²; Berechnung nach „Puck“; die Berechnung stimmt gut mit den Versuchsergebnissen überein)

rechnungen am BMW-Guggenheim Lab wurden mit Klein- und Großversuchen erhärtet (Abb. 12 und Abb. 13). Eine gute Grundlage für die Dimensionierung bildet die Empfehlung „Tragende Kunststoffbauteile im Bauwesen“ des Bauüberwachungsvereins (BÜV), welche allerdings stark auf glasfaserverstärkte Bauteile ausgerichtet ist (sie kann kostenlos heruntergeladen werden unter www.deutsches-ingenieurblatt.de → WebInfos → Suchwort: BUEV-Empfehlungen).



Der Umgang mit Zeit, Visionen und Budget

Ausführungstechnisch stellten die knappe Zeitschiene und der Umgang mit dem Material CFK die Hauptherausforderung des Projektes dar. Das architektonische Konzept des Pavillons wurde im Dezember 2010 festgelegt. Dabei wurde erstmals die Idee diskutiert, dem Pavillon eine Tragstruktur aus Carbonfasern zugrunde zu legen. Im Rahmen eines zweitägigen Workshops Mitte Januar 2011 in der Schweiz wurden die beteiligten Projektpartner ins Fachgebiet der Carbontechnologie eingeführt. Statische Konzepte wurden diskutiert und sukzessive detailliert. Aufgrund der mobilen Charakteristik des Bauwerkes mussten konstruktive Lösungen gesucht werden, die gleichzeitig verschiedene nationale Gesetzgebungen erfüllen. Weiter mussten für die Hauptgewerke Lieferanten evaluiert werden, welche in der Lage waren, innerhalb von knapp drei Monaten diese nicht alltägliche Tragstruktur zu produzieren und zu montieren.

Das BMW Guggenheim Lab ist am 3. August 2011 eröffnet worden. Bis Mitte Oktober stand es noch in Manhattan, New York. Ab Mitte Mai 2012 wird es für rund zehn Wochen in Berlin stehen und danach seine letzte Reise nach Mumbai antreten, wo es für weitere zwei Monate stehen wird.

Erkenntnisse über CFK im Bauwesen

Das Projekt wurde von der internationalen Presse und Architekturszene gut aufgenommen. Mit der Entwicklung und neuartigen Anwendung der Carbonfaser-Technologie in der Bauindustrie ist bereits gelungen, wofür das BMW-Guggenheim-Lab einsteht – dass interdisziplinäre Teams neue Technologien diskutieren und Lösungen entwickeln. Das Projekt zeigte auch auf, dass eine intensive Zusammenarbeit von Architekt und Ingenieur bereits im Entwurf entscheidend ist für ein erfolgreiches Resultat mit diesem doch etwas komplexen, neuen Baustoff.

Mit dem Einsatz von CFK bei diesem – ex-

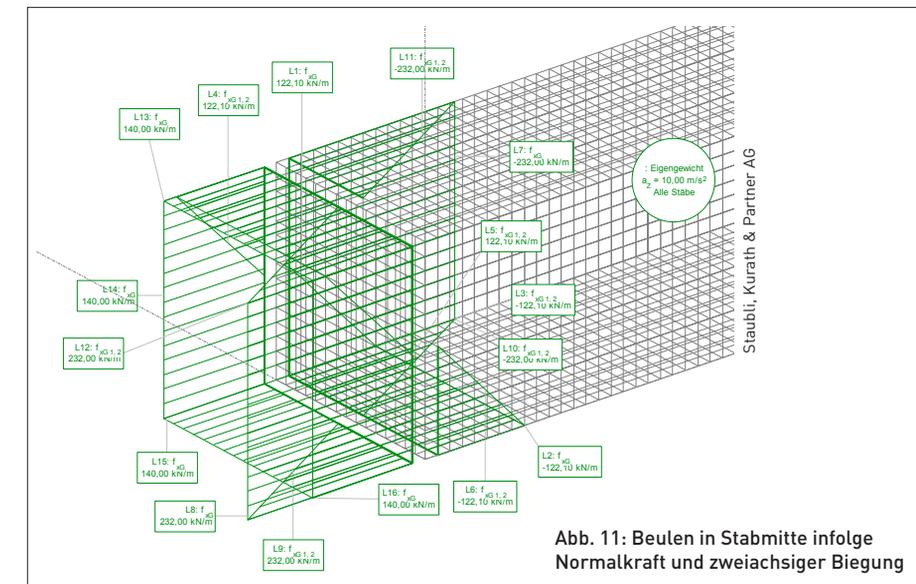


Abb. 11: Beulen in Stabmitte infolge Normalkraft und zweiachsiger Biegung

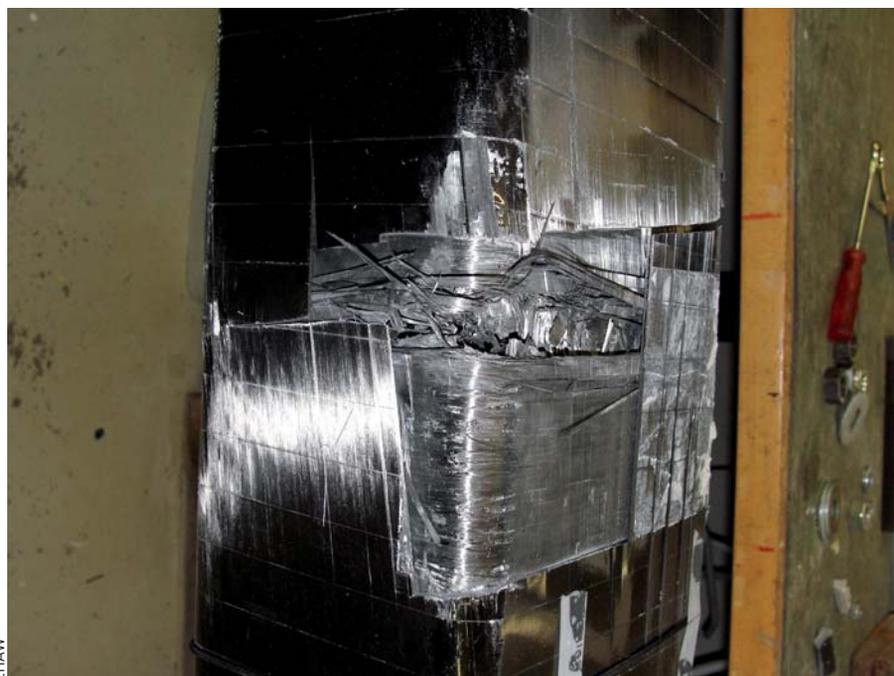


Abb. 12: Versagen des Druckgurtes bei einem 1:1-Stabversuch; gut zu sehen ist der Schichtenaufbau (Schichtdicke: 0.2 bis 0.4 Millimeter pro Einzelschicht)

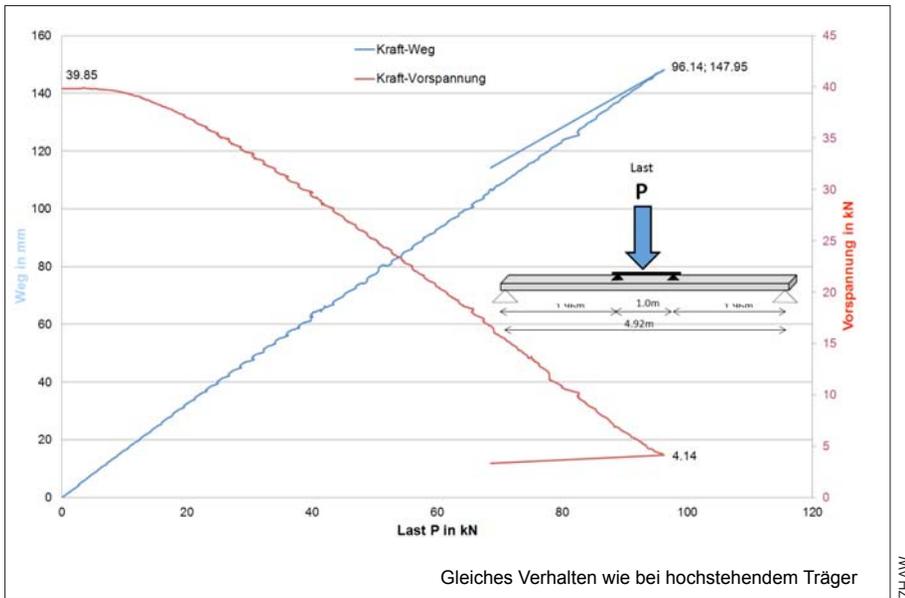


Abb. 13: Messprotokoll Biegeversuch; gut zu sehen ist das linearelastische Tragverhalten des Stabes bis zum Bruch (rot der Verlauf der inneren Vorspannung)

perimentellen – Bauwerk gewannen die Projektbeteiligten Bauingenieure neue Erkenntnisse über sein Tragverhalten: Quer zur Faser ist CFK noch schwächer als befürchtet (vgl. Abb. 9). Dennoch sind die Resultate kein prinzipielles Hindernis für den Einsatz von CFK im Hochbau. Im Gegenteil: die Umsetzung dieses Projektes zeigt, dass sich die Kosten der Carbonfasern in den letzten Jahren stark reduziert haben. Das Potential für den Einsatz von CFK im Hochbau steigt damit an. Die Vorteile des Werkstoffes wie sein geringes spezifisches Gewicht, seine geringe Korrosions- und Ermüdungsanfälligkeit, seine enorm kleine bis leicht negative Ausdehnung bei

Temperaturerhöhung können so im Hochbau vermehrt genutzt werden – nicht nur in der Tragwerksverstärkung, sondern auch in vielfältigen Bereichen des Neubaus – aber nur da, wo die Vorteile von CFK auch tatsächlich zum Tragen kommen.

Es ist wichtig, Lösungen (Fügetechnik, Tragwerksformen etc.) aus der Industrie, Luft- und Raumfahrt für die Anwendung in der Bauindustrie genauestens zu studieren. Da sich aber einige Randbedingungen in der Bauindustrie sehr stark von denen in anderen Industrien unterscheiden, ist es notwendig, vieles neu zu denken, damit sinnvolle Lösungen resultieren.

Die Beteiligten

Das BMW-Guggenheim-Lab in New York, ein mobiler Pavillon, der im Mai zehn Wochen lang in Berlin zu besichtigen sein wird, war eine Gemeinschaftsarbeit, die den am Bau Beteiligten und damit der Baupraxis insgesamt eine Menge neues Wissen über die Anwendung von Carbonfasern im Bauwesen beschert hat. Die Beteiligten waren:

- als Bauherr die Solomon R. Guggenheim Foundation (New York, USA) und die BMW Group (München),
- als Architekt Yoshiharu Tsukamoto, Momoyo Kaijima, Mirai Morita, Masatoshi Hirai vom Atelier Bow-Wow (Tokio, Japan),
- als Graphic Designer Sulki Choi und Min Choi von der Sulki & Min (Seoul, Southkorea),
- die Gesamtleitung und Realisierung oblagen Martin Joos, Patrick Wallain und Alvine Wiedstruck von der Nüssli Eventbau, Messebau und Ausstellungsbau. [Schweiz] AG (Hüttwilen, Schweiz),
- als Tragwerksingenieur fungierten Ove Arup & Partners (Tokio, Japan) und die Staubli, Kurath & Partner AG (Zürich) sowie die form TL ingenieure für tragwerk und leichtbau gmbh (Radolfzell),
- die Dimensionierung der Carbonstruktur und die Ausführungsstatik für das Gesamttragwerk besorgte Rebecca von Büren (Staubli, Kurath & Partner AG, Zürich),
- Die Herstellung der Carbonträger erledigte die Carbofibretec (Friedrichshafen) und
- die Versuche mit den Carbonträgern führten schließlich Peter Henckel und Silvano Matthaei von der Zürcher Hochschule für angewandte Wissenschaften (ZHAW, Winterthur, Schweiz), Departement A, ZKE, Fachgruppe FVK durch.