

... und Beton schwimmt doch!



SEGMENTA / EXTERNIA

Gewicht : 62 kg
Wandstärke : 2 - 3 mm

8. Deutsche Betonkanu-Regatta 2000 Weil am Rhein / Basel

1. Platz Konstruktion (Segmenta)
4. Platz Gestaltung (Externia)

Konstruktionsbericht

- Vorwort
- Konstruktionsbeschreibung
- Konstruktive Ausbildung der Segmente
- Betonprojektierung
- Bewehrung
- Berechnung
- Versuche
- Formenbau
- Betoniervorgang
- Ausschalen und Nacharbeiten
- Aussteifung / Auftriebskörper
- Spannen der Segmente
- Dankagung / Sponsoren



Vorwort

Brücken schaffen Übergänge und verbinden Ufer - wo es keine Brücke gibt, können Boote diese leisten. Mit den Booten **SEGMENTA** und **EXTERNIA** haben wir ein Konstruktionsprinzip des Massivbrückenbaus aufgefunden und auf den Bootbau übertragen - die Segmentbauweise.

Bei großen Brückenbauten kann ein hoher Baufortschritt durch Einsatz von Fertigteilen erzielt werden. Um die Transportmassen und -geometrie zu beherrschen wird das künftige Bauwerk in Segmenten vorgefertigt. Am Montageort werden diese Segmente durch Spannriegel miteinander verbunden. Stück um Stück wächst die Brücke dem anderen Ufer entgegen.

In ähnlicher Weise entstehen unsere Boote. Vorgefertigte, handliche Segmente werden am Einsatzort der Boote aneinander gereiht. Spannriegel pressen diese dünnwandigen, randverstärkten Schalen aneinander. Mit dieser Bootskonstruktion betreten wir Neuland: Wurde Glasfaserbeton bislang in seiner Ausprägung als dünnwandiges Bauteil zu einem auf Zug belastet, wird er hier erstmalig einer planmäßigen, vollen Vorspannung ausgesetzt.

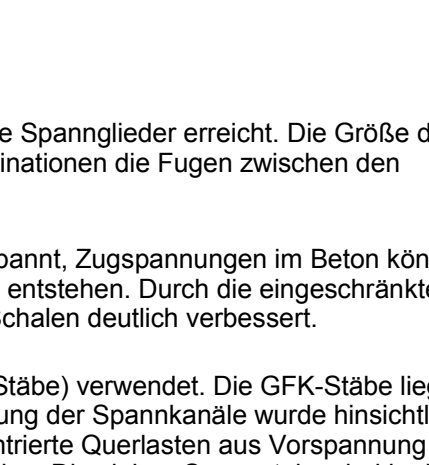
Im Vorfeld des Bootsbaus wurden zahlreiche Konstruktionsvarianten und deren Ausführbarkeit diskutiert, statische Berechnungen durchgeführt, Detaillösungen entwickelt und für ausgewählte, hoch beanspruchte Punkte deren Tragfähigkeit in Versuchen nachgewiesen.



Konstruktionsbeschreibung

Idee

Die Idee zu den Booten **SEGMENTA** und **EXTERNIA** ergibt sich aus den Problemen beim Transport von kompletten Booten über lange Strecken (Dresden - Basel). Um das Transportieren gering zentralen sich ein Boot aus U-förmigen, dünnwandigen Segmenten zusammengefasst werden. Diese Verbindung ist lösbar gestaltet, so dass die Einzelteile "ineinandergestellt" nur ein geringes Transportvolumen benötigen.



Geometrie und Gewicht

Das Kanu erhält die Form eines Wanderkanadlers. Das "Kernboot" besteht aus zehn Segmenten. Es lässt sich durch Einfügen von Mittelsegmenten in der Koppelfuge zwischen den Segmenten 5 und 6 bei Bedarf verlängern. Die Länge des Kernbootes beträgt 4,460 m. Die Masse des Kernbootes beträgt ca. 57 kg, ein Mittelsegmente wiegt ca. 6 kg.



Vorspannung

Der Zusammenhalt der Segmente wird durch durchlaufende Spannriegel erreicht. Die Größe der Spannkräfte muß sicherstellen, daß unter allen Lastfallkombinationen die Fugen zwischen den Segmenten geschlossen bleiben.

Die Segmente werden in der Haupttragrichtung voll vorgespannt. Zugspannungen im Beton können nur noch aus Quertagwirkung und unter ungünstigen Lasten entstehen. Durch die eingeschränkte Ribbildung wird bei Wasserdruck kein momentenschüsseltypisch Nach.

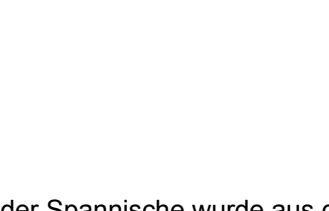
Als Spannriegel werden Glasfaserkunststoffstäbe (GFK-Stäbe) verwendet. Die GFK-Stäbe liegen in Vertiefungen der Außenwände der Bootshaut. Die Linienführung der Spannriegel wurde hinsichtlich eines Minimums an Umlenkungen optimiert, so daß konzentrierte Querlasten aus Vorspannung auf die Segmente und große Reibungsverluste vermieden werden. Die sieben Spannriegel sind in der Mitte des Bootes gleichmäßig über den Umfang verteilt.

Die Spannriegel werden im Bug- und Hecksegment in Spannrinnen verankert ohne die Bootshaut zu durchdringen. Die konzentrierte Lastübertragung der Vorspannkraft in den Beton erfolgte über eine einbetonierte Ankerplatte. Zwischen den Segmenten 5 und 6 werden die Spannriegel gekoppelt.

Konstruktive Ausbildung der Segmente

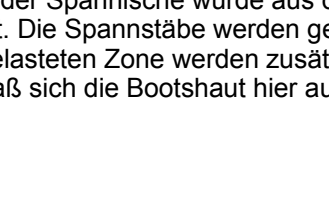
Schalenwirkung der Bootshaut

Das wesentliche Funktionselement des Segments ist die ca. 3mm dicke Bootshaut aus Feinbeton, die räumlich gekrümmt, als Schale wirkt. Sie gibt dem Boot die Form und sichert die Wasserundurchlässigkeit. Die Schalenänderer werden von einem umlaufenden, befestigten Randwulst begrenzt, der zur Massivbetonierung als Hornprofil ausgebildet wird.



Tragwirkung in Längsrichtung

Die Spannkanäle verlaufen in der Bootshaut und haben ein Lichtprofil von 5x5 mm, so daß sich die Bootswand hier verdrückt. Ebenso gibt ihnen die Form und sichert die Verstellung und verhindert ein vorzeitiges Ausbeulen der Bootshaut. Zugleich werden durch die erhöhte Querschnittsfläche die Umlenkkräfte besser eingeleitet.

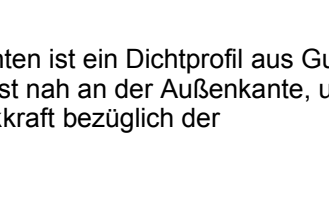


Tragwirkung in Querrichtung

Die Tragfähigkeit der Segmente in Querrichtung wird durch die entlang der Koppelfugen laufenden Randwülste (Querwulst) sichergestellt.

Bewehrung

Über die Spannkanäle werden 30 mm breite Bewehrungsstreifen gelegt und gut andgedückt, um die Kanten der Spannkanäle gegen das Ausbeulen zu sichern. Darüber liegt die einlagige Hauptbewehrung, die die Randwülste umfaßt und auf der Schale rückverankert wird. Die Querwülste wird zusätzlich an ihrem oberen Rand durch ein Glasfaserring-Ring verstärkt, der das negative Querschnittsmoment (Öffnen der Schale) aufnehmen soll.



Bug / Heck

In Bug und Heck werden die Spannriegel verankert. Die Geometrie der Spannriegel wurde aus dem Spannweg und dem Platzbedarf der Anker und Hilfsmittel abgeleitet. Die Spannriegel werden gegen einbetonierte, stählerne Ankerplatten vorgespannt. In dieser hochbelasteten Zone werden zusätzlich zur Hauptbewehrung mehrere Bewehrungslagen aufgebracht, so daß sich die Bootshaut hier auf bis zu 10mm verdickt.

Koppelsegmente

An der Koppelfuge der Segmente 5 und 6 weitet sich der Spannkanal auf, so daß die Koppelmuffe abgenommen werden kann. Die Länge der Aufweitung ist so gewählt, daß die Verschiebung der Koppelmuffe beim Vorspannen möglich ist. Das Mittelsegment weist diese Aufweitungen an beiden Enden auf.

Koppelfuge

In der Koppelfuge zwischen den Segmenten ist ein Dichtprofil aus Gummi angeordnet. Das Dichtprofil liegt möglichst nah an der Außenkante, um die Exzentrizität der zu übertragenden Druckkraft bezüglich der Schalenmittelfläche gering zu halten.

Betonprojektierung

Zuschlag

Als Zuschlag kommt Liaver, ein Blähglas-Produkt aus Recyclingglas, hergestellt nach einem in Italien aufgeführten Verfahren, zum Einsatz. Liaver ist druckfest, formstabil und leicht und kann vollständig recycelt werden. Mit diesem Zuschlag sind Betondichten von 1,5 bis 1,8 g/cm³ möglich.

Betonentwurf

Die Untersuchungen zum Betonentwurf hatten folgende Ziele:

1. Einstellen einer spritzfähigen, verarbeitbaren Konsistenz des Feinbeton
2. Geringe Porosität, Wasserundurchlässigkeit des Feinbeton
3. Hohe Festigkeit und ausreichende Betondeckung bei Einsatz von Pigmenten

Dies wurde durch einen W/Bi-Wert = 0,33 und einen WZ-Wert = 0,36 erreicht.

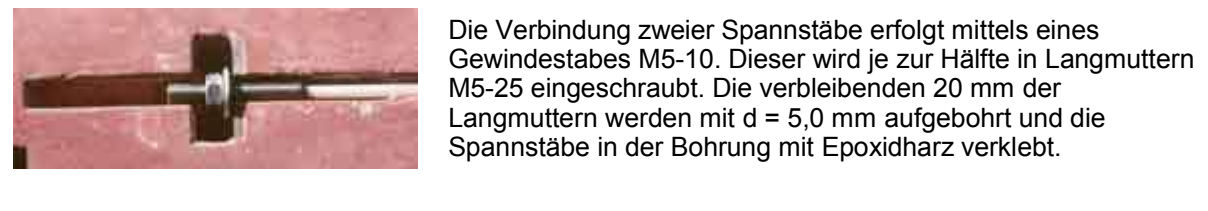
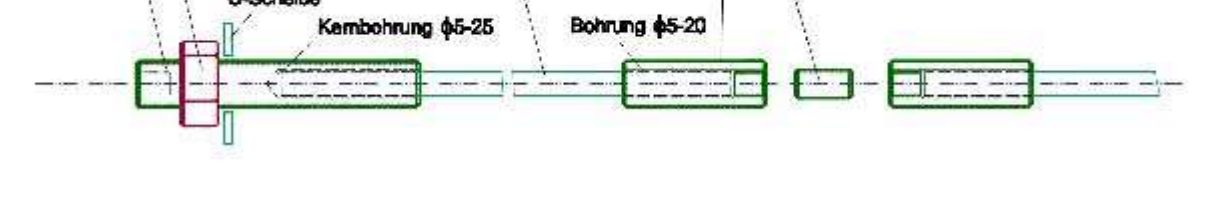


Bewehrung

Spannstäbelaufbewehrung

Die Spannstäbe sind polyestergebundene GFK-Rundstäbe mit einem Durchmesser von 4,75 mm. - Zugfestigkeit 1000 MPa - E-Modul 40000 MPa

Das Spannen der GFK-Stäbe erfolgt durch Aufdrehen einer Mutter auf eine mit dem GFK-Stab verbundene Madenschraube M8-50 aus Edelstahl. Die Verbindung zwischen Schraube und GFK erfolgt durch Verkleben der Enden des GFK-Stabes mit einer Kernbohrung $\phi = 5,25$. Die Mutter stützt sich gegen die einbetonierte Ankerplatte ab, die Madenschraube wird mit einem Innensechskant festgehalten um eine Torsion des Spannstabes zu verhindern. Der Betrag der Spannkräfte wird mit einem Drehmomentschlüssel kontrolliert. Der maximal erzielbare Spannweg je Schraube beträgt 43 mm.



Passive Bewehrung

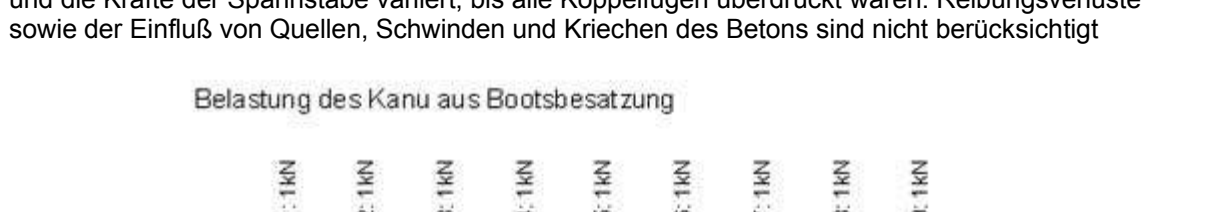
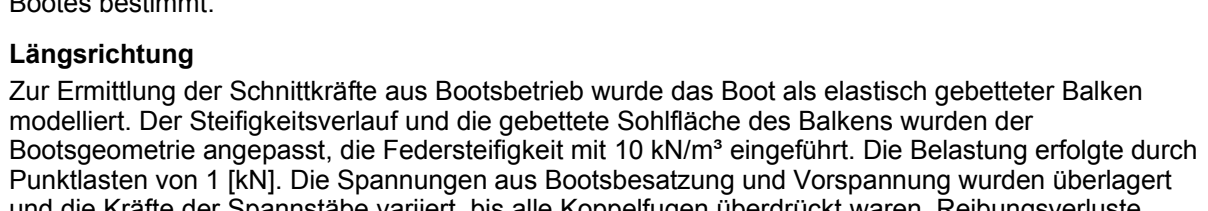
Die textile Hauptbewehrung der Segmente des Bootes **SEGMENTA** ist ein quadraxiales Gelege aus aktivierten Glasfasern. Kett- und Schußfasern kreuzen sich unter 90° in einer 45° Diagonalen eingelegt. Die Rovings aller 4 Richtungen sind von gleicher Stärke (620 tex). Der Bewehrungsstreifen über den Spannriegel ist ein orthogonales Gewirke, mit einer Stärke von jeweils 810 tex. Die Querwülste entlang der Koppelfugen sind mit einem AR-Glas-Roving von 2600 tex verstärkt. Beim Boot **EXTERNIA** wird ein Mischgewebe aus AR-Glasfasern und Kohlestofffasern als Hauptbewehrung verwendet. Die Querwülste werden mit Kohlestofffasern der Stärke 7200 tex verstärkt. Die textile Bewehrung wird zu Forschungszwecken am Institut für Textil- und Bekleidungslehre der TU Dresden hergestellt.

Berechnung

Nach Festlegung der Geometrie des Kernbootes wurde näherungsweise die nötige Vorspannkraft, die zur Sicherung der Quertagwirkung erforderliche Bewehrung und die maximale mögliche Länge des Bootes bestimmt.

Längsrichtung

Zur Ermittlung der Schnittkräfte aus Bootsbetrieb wurde das Boot als elastisch gebetteter Balken modelliert. Der Stützgebäude und die gebettete Schicht des Balkens wurden der Bootsgeometrie angepasst. Die Federsteifigkeit mit 10 kN/m² eingehört. Die Belastung erfolgte durch Punktlasten von 1 kN. Die Spannungen aus Bootsbetrieb und Vorspannung wurden überlagert und die Kräfte der Spannstäbe variiert, bis alle Koppelfugen überdeckt waren. Reibungsverluste sowie der Einfluß von Quellen, Schrumpfen und Kriechen des Betons sind nicht berücksichtigt.



Die durch die Berechnung ermittelten Spannkräfte in kN betragen:

| Kanal | 1 / 7 | 2 / 6 | 3 / 5 | 4 |
|-------------------------|-------|-------|-------|-----|
| Kernboot | 1,8 | 0,9 | 0,9 | 0,9 |
| Kernboot + 5xMittelteil | 2,5 | 1,0 | 1,0 | 1,0 |

Querrichtung

Für ein Mittelsegment wurden Belastungen aus Wasserdruck und Lastangriff auf die obere Randwulst der Bausteine, der Vorspannung, der Querschnittsflächen und Fugenbetrieben vor Spannbeginn kann die maximale Anzahl der zusätzlichen Mittelsegmente bestimmt werden. Bei den getroffenen Annahmen können bis zu 5 Mittelsegmente eingefügt werden.



Spannwege

Durch die Länge der Spannschrauben ist der Spannweg begrenzt. Mit der Kenntnis der E-Moduli der Bausteine, der Vorspannung, der Querschnittsflächen und Fugenbetrieben vor Spannbeginn kann die maximale Anzahl der zusätzlichen Mittelsegmente bestimmt werden. Bei den getroffenen Annahmen können bis zu 5 Mittelsegmente eingefügt werden.

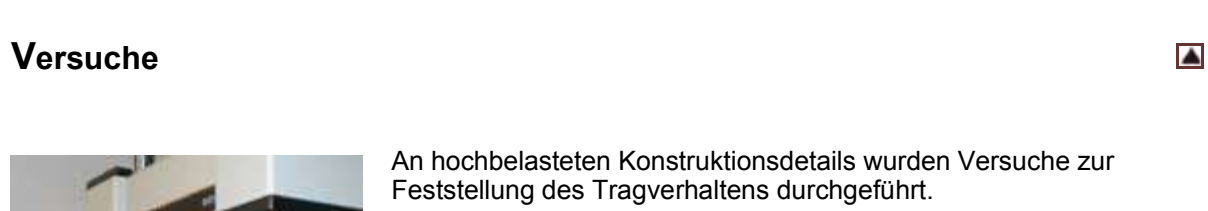
Versuche

An hochbelasteten Konstruktionsdetails wurden Versuche zur Feststellung des Tragverhaltens durchgeführt.

Verbindung GFK-Spannstäbe / GFK-Koppelmuffe
Mit Zugversuchen wurden die Bruchkräfte der Spannstäbe und Koppelmuffen ermittelt. In allen Fällen versagte die Koppelfuge an der Spannschraube ab 6,7 kN, an der Koppelmuffe ab 4,8 kN. Der GFK-Stab wird so nur zu 1/3 seiner Bruchfestigkeit ausgenutzt.

Spannschraube
Die Ermittlung der Tragfähigkeit der Spannschraube wurde an einem dafür angefertigten Prüfmittel vollzogen. Der Bruch wurde durch Verschiebung der Koppelfuge an der Spannschraube erreicht. Die Bruchlast des Betons an der Spannschraube konnte nicht bestimmt werden.

Segmente
Ein Mittelsegment wurde zur Feststellung der Tragfähigkeit geprüft. Die Druckkraft der Prüfeinrichtung wurde im Schwerpunkt des Querschnittes eingebracht und mit Lastplatten verfaßt. Das Versagen des Segmentes erfolgte durch lokales Ausweichen der Bootshaut und nachfolgenden Bruch. Die erreichte Prüflast betrug 36 kN. Die zugehörige Normalspannung im Beton von ca. 9 MPa liegt deutlich unter den Werten der Druckfestigkeit des Feinbetons.



Zur Ausbildung der Spannkanäle wurden Holzleisten 5x5 mm eingesetzt. Für die Spannrinnen und Koppelmuffen wurden PVC-Formteile verwendet. Alle Teile wurden mit von außen zugänglichen Holzschrauben an der Wandung der Bootshaut befestigt.

Die Geometrie der künftigen Koppelfugen wurde durch eingelegte Gummistreifen gebildet. Der Gummi schmiegt sich an die Bootshaut an, so daß sich die künftige Koppelfuge annähernd senkrecht zur Schalenmittelfläche ausbildet. Der Querschnitt der Streifen erfolgte mittels Wasserstrahl, um eine exakte Kantengeometrie zu erreichen.

Damit kein Zementleim zwischen die profangebundenen Holzleisten und die Formwand gelangt wurden alle Ritzen mit Silikon verfüllt. So ist die Entschalbarkeit der Formteile sichergestellt. Für die Mittelsegmente wurde eine neue Form nach gleichem Prinzip angefertigt und die Ösen für die Befestigung der Auftriebskörper im Querwulst verankert.



Ausschalen und Nacharbeiten

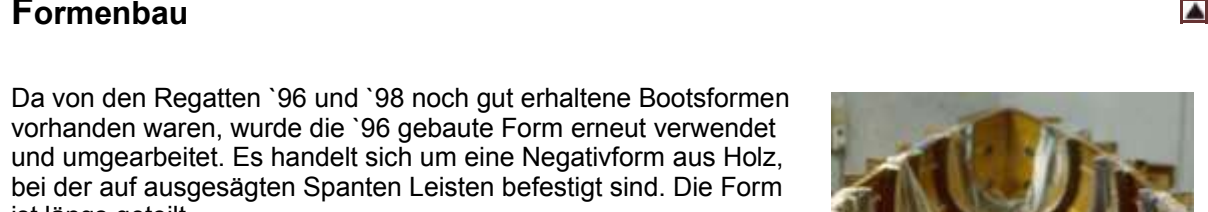
Nachbehandlung
Nach dem Betonieren werden die Segmente mit feuchtem Tuchern abgedeckt und nach dem Anstellen dreiviertel getrocknet. Die Teile werden mindestens 7 Tage lang feucht gehalten.

Ausschalen

Vor dem Ausschalen werden alle Schrauben, mit denen die profangebundenen Elemente an der Form befestigt sind, entfernt. Nach dem Ablösen einer Hälfte der Form werden die im Beton verbliebenen, nun sichtbaren Formteile entfernt. Die abgelösten Formteile wird zur Lagerung wieder an die Segmente geschoben und es wird mit der anderen Seite in gleicher Weise verfahren.

Nacharbeiten

An einigen Segmenten mußten Fehlstellen an den zahlreichen Kanten behohlet werden. Von der Oberfläche des Bootes wurden mit einem harten Schwamm Kalkausblühungen entfernt. Der Nameszug wird mit Acryl-Farbe aufgetragen.



Aussteifung / Auftriebskörper

Die Randglieder, Rippen und die räumlich gekrümmte Bootshaut sind die einzigen Aussteifungen des Kanus.

Die notwendige Auftriebskraft, einschließlich Sicherheit wurde berechnet und ist durch die lastverteilenden Untergrößen und Sitzmöglichkeiten für die Kanuten sichergestellt.

Im Boot wurden 1,10 kg Kunststoff eingebaut. Die Masse der Spannriegel mit Spannschrauben und Koppelmuffen beträgt 1,25 kg, die der einbetonierten Ankerplatten 0,3 kg.

Spannen der Segmente

Das Boot wird mittels Spannstäben aus Glasfaser zusammengefasst. Die Glasfaserstäbe liegen in Vertiefungen der Bootshaut und werden an Bug und Heck verankert.

Zuerst werden die einzelnen Segmente so aneinandergereiht, daß sich das Boot in der gewünschten Länge ergibt. Da der Randwulst nicht in einer Ebene liegt, muß ein Höhenausgleich mit Keilen vorgenommen.

Die Spannriegel werden eingelegt, beginnend am Kielschwein, sich zum Rand hin bewegend. Die Vorspannkraft wird sukzessive aufgebracht und mittels eines Drehmomentschlüssels kontrolliert. Nach Aufbringen von etwa der Hälfte der Vorspannkraft wird das Boot kurz angehoben um die Reibungskräfte zwischen Untergrund und Segmenten zu überwinden und so den Segmenten die Möglichkeit zu geben "nachzuschwimmen".

Dankagung / Sponsoren



Der Bau des Bootes fand im **Baustofflabor der TU Dresden** statt. Wir möchten uns herzlich bei Herrn Hempel und seinem Team des Baustofflabors für die uns zur Verfügung gestellten Techniken und Räumlichkeiten, sowie für die Betreuung bei der Vorbereitung und Ausführung der Arbeiten bedanken. Ebenso gilt unser Dank dem **Lehrstuhl für Textil- und Bekleidungslehre der TU Dresden** für die Bereitstellung der AR-Glasfaser- und Kohlestoffgewirke.

Wir möchten uns an dieser Stelle auch bei unseren universitären Sponsoren, dem **Lehrstuhl für Baustoffwissenschaften**, und der **Arbeitsgruppe Projektmanagement der TU Dresden** für die finanzielle Unterstützung danken.

Außerdem möchten wir uns bei folgenden Firmen für die finanzielle und logistische Unterstützung bedanken, denn ohne ihre Unterstützung wäre das Projekt nur schwer finanzierbar gewesen.

- Readymix Baustoffgruppe** (Hauptsponsor 2000)
- BILFINGER+BERGER AG** (logistische Unterstützung)
- WOERMANN GmbH & Co KG** (finanzielle Unterstützung)