

NEUE TECHNOLOGIEN IM BRÜCKENBAU

Dr.-Ing. G. Girmscheid, Bilfinger + Berger Bau AG, Wiesbaden

1. Einleitung

Die Firma Bilfinger und Berger Bauaktiengesellschaft hat in den letzten Jahren drei Großprojekte in Segmentbauweise ausgeführt:

- Segmentbauweise mittels geklebter Paßfugen und interner Vorspannung
- Segmentbauweise mittels Feinmörtelfugen und interner Vorspannung
- Segmentbauweise mittels Trockenfugen und externer Vorspannung

Über die folgenden Aspekte der neuen Technologie - der Segmentbauweise mittels externer Vorspannung - wird hier berichtet:

- Konstruktionsprinzip, Tragverhalten, Tragkomponenten der extern vorgespannten Segmentbauweise
- Herstellungstechnik: Short versus long line match casting
- Prinzipielle Überlegungen zur Verlegetechnik
- Vor- und Nachteile der Konstruktion, Ausblick auf die möglichen Entwicklungen

2. Konstruktionsprinzipien, Tragverhalten und Tragkomponenten

2.1 System und Querschnitt der Brücke

Die Entwicklung der Segmentbauweise mittels externer Vorspannung ist neben der Entwicklung der Betonschrägseilbrücken einer der wichtigsten innovativen Trends im internationalen Brückenbau.

Konstruktionsprinzip:

Die Brückensysteme der extern vorgespannten Segmente mit Trockenfuge bestehen aus einfeldrigen, einzelligen Hohlkästen, die auf bewehrten Elastomerlagern gelagert sind.

Die externe Vorspannung wird auf das einfeldrige System aufgebracht. Danach werden die Einfeldsysteme durch Federplatten zu drei- bis vier-feldrigen Systemen verbunden, so daß Fahrbahnübergänge nur dort an den Enden dieser Systeme notwendig sind.

Die Spannweiten der einfeldrigen Hohlkästen betragen zwischen 24,85 - 48,45 m. Die Brückendeckbreite variiert zwischen 7 - 15,60 m.

Das einfeldrige Brückenlängssystem besteht aus folgenden typischen Standardsegmenten:

- 1) **Pfeilersegmente** jeweils an den Enden eines jeden Feldes mit dem Verankerungsschott für die Spannglieder (Bild 1).
- 2) **Normalsegmente** zwischen den Pfeiler- und Umlenksegmenten.
- 3) Die **Umlenksegmente** befinden sich ungefähr in den 1/3- bzw. 1/4-Punkten (Bild 1).

Die Pfeiler- und Umlenksegmente bilden die Schlüsselemente für die Dauerhaftigkeit der Betonkonstruktion.

Aus praktischen Gründen entschließt man sich zur Verwendung von nur wenigen Umlenkblöcken, mit einer relativ begrenzten Anzahl von großen Spanngliedern mit ca. 15 - 22 Litzen.

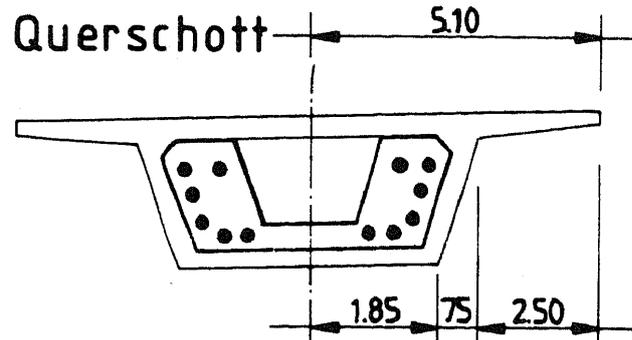
2.2 Vorspannung

Folgende Arten von Vorspannsystemen wurden verwendet:

- a) **Interne Vorspannung:**
 - Litzenspannglieder für das Quersystem der Fahrbahnplatte und
 - Spannstäbe für die Kräfteeinleitungsvorspannung im Pfeilersegment zur Überdrückung der Spreizkräfte
- b) **Externe Vorspannung des Längssystems**
 - Litzenspannglieder

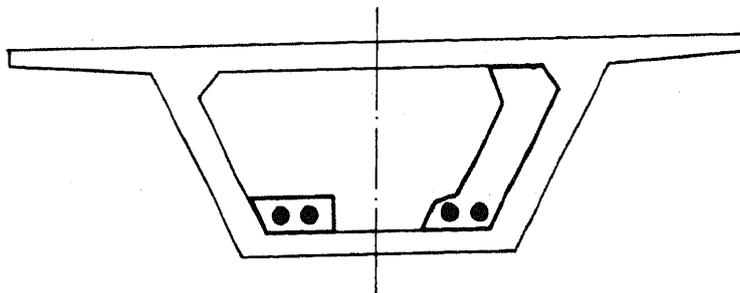
Für die externe Vorspannung werden aus den bereits erläuterten Gründen große B + BL-Spannglieder benutzt, mit 15 bis 22 Litzen. Die dazugehörigen Pressen haben ein Gewicht von ca. 500 - 800 kg. Die Spannanker werden daher immer auf dem vorderen Pfeiler in Baurichtung angeordnet.

PFEILERSEGMENT:



UMLENKSEGMENTE:

Sattel Rippe



BEMESSUNG EINES SATTELS : FACHWERKANALOGIE
: SCHUBVERSAGEN

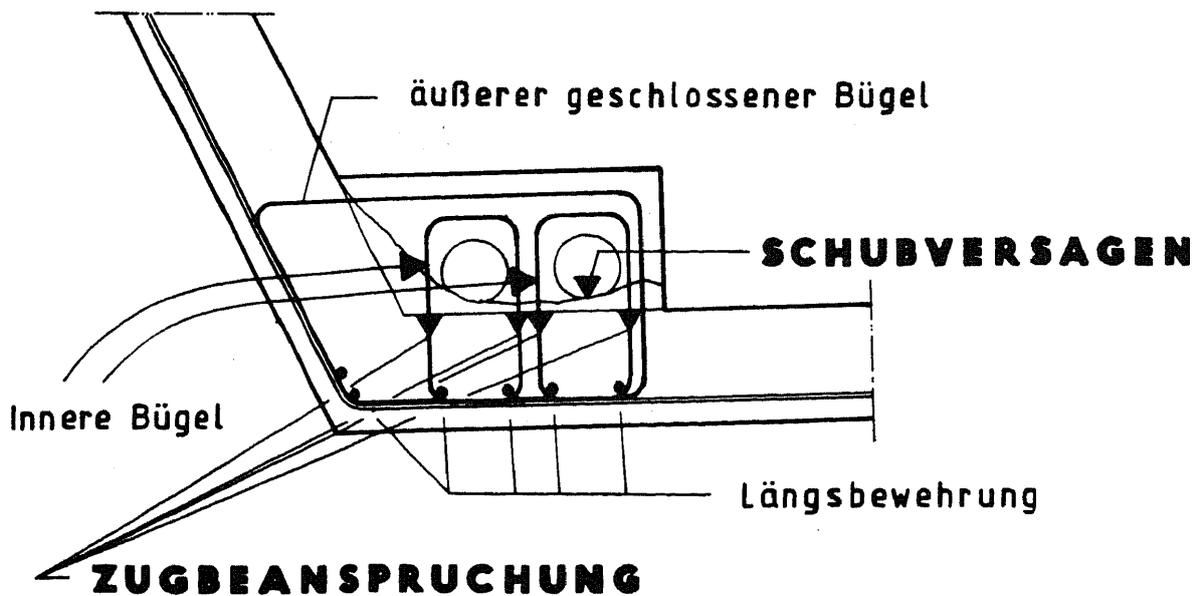


Bild 1: Pfeiler- und Umlenksegmente

Das auswechselbare Spannglied besteht aus zwei zusammengesetzten Komponenten, die nicht in die Pfeilersegmente einbetoniert sind und den Verankerungshüllrohren im Pfeilersegment, durch die die auswechselbaren Elemente zum Anker geführt werden.

Die auswechselbaren Komponenten bestehen aus einem langen und einem kurzen HDPE-Hüllrohr; das lange vom aktiven Anker zum hinteren Pier, das kurze am passiven Pier, bestehend aus geradem Rohr und konischem Endstück sowie Umlenkring.

2.3 Die Schubverzahnung der Elemente mittels trockener Fuge

Bei der Elementbauweise mittels trockener Fuge wird die schlaffe Bewehrung nicht durch die Fuge geführt. Zur sicheren Übertragung der Querkräfte und Torsionsmomente wird hier die Schubreibungstheorie angewandt, bei der die Normaldruckspannung senkrecht zur Fuge nach der Coulombschen Theorie eine Widerstands-Reibungskraft aufbaut, die die wirkende Schubkraft infolge der äußeren Kräfte überträgt /3/.

Daher muß eine Mindestvorspannung vorhanden sein, die auch zwischen Gebrauchs- und rechnerischem Bruchzustand wirksam ist.

Die in den Stegen vorhandenen Nocken (Bild 2) dienen hauptsächlich zur Aufnahme der Querkräfte.

In den Stirnflächen der Fahrbahn - sowie Bodenplatte, sind horizontal längliche Nocken angebracht, und zwar mit den folgenden Aufgaben:

- a) Zum Einpassen der Elemente beim Verlegen
- b) Zur Aufnahme von Torsionsbeanspruchungen (Kastenwirkung)
- c) Zur monolithischen Wirkung der Fahrbahnplatte und zur Übertragung der Plattenquerkräfte.

Die Elemente müssen aus diesen Gründen paßgenau wie bei einem Positivabdruck aneinanderpassen. Daher wird bei trockener Fuge immer die Match-cast-Methode verwendet, d.h. das neue Segment wird gegen die Stirnfläche des vorherigen Elementes betoniert.

2.4 Bruch- und Verformungsverhalten

Das Bruchverhalten eines Trägers in Segmentbauweise mit externer Vorspannung ist von verschiedenen Forschern untersucht worden.

- Das Verhalten eines Trägers bis zum Erreichen des Dekompressionsmoments ist analog zu einem monolithischen Träger. Die Spannstahlspannung wächst linear.
- Beim Aufreißen des Querschnitts summieren sich die Dehnungen über die Segmentlänge, so daß normalerweise an den Fugen ein Spalt entsteht. Damit nimmt die Steifigkeit ab und die Verformungen nehmen eskalierend zu bis hin zur Gelenkbildung.
- Von der kompletten Gelenkbildung bis zum Bruch eskaliert die Verformung weiter.
- Die Spannglieder gleiten an den Umlenksätteln kurz vor dem Bruch, wenn die maximale Haftreibung überwunden wurde.

Das Verformungs- bzw. Rißverhalten kann nach Bild 3 ermittelt werden.

Zur Bestimmung der Verformung bzw. Zunahme der Spannstahlspannung werden bis heute meist nur empirische Formeln verwendet.

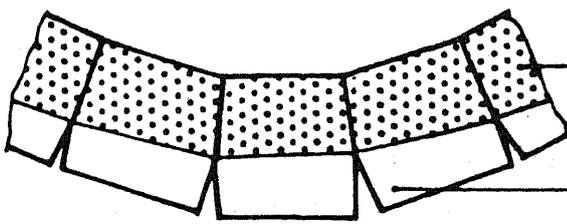
2.5 Bemessungsgrundlagen

Diese Bauweise ist noch nicht in der AASHTO /2/ zugelassen.

In den USA wird in Analogie zur externen Vorspannung unter Berücksichtigung der Anforderungen an die Segmentbauweise gemäß AASHTO der Bau im Einzelfall erlaubt.

Laut Naaman wird in der nächsten Überarbeitung der AASHTO die Segmentbauweise mittels Trockenfuge und externer Vorspannung berücksichtigt.

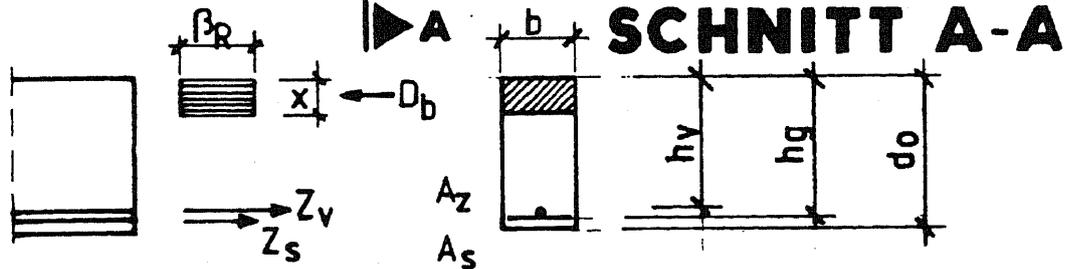
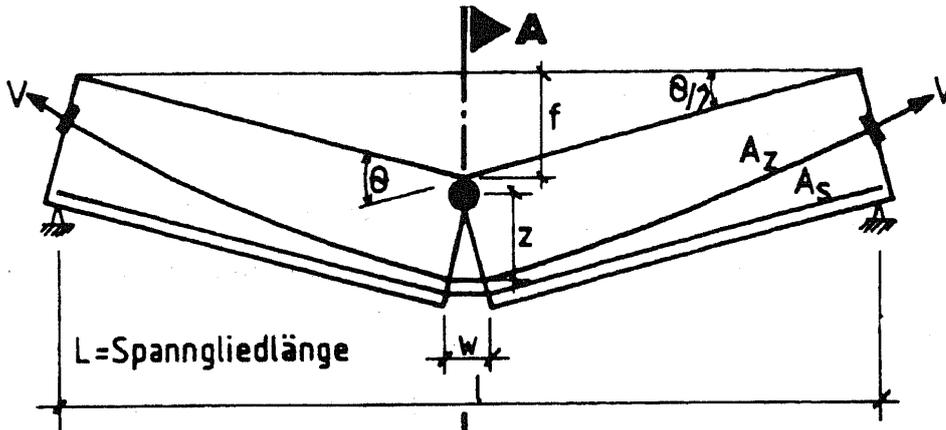
Im Eurocode 2 Teil 1D werden zur Zeit Bemessungsrichtlinien entwickelt, wie sie in USA und Frankreich durch Müller und Gregor praktiziert werden.



ZONE, DEREN STEIFIGKEIT M'RAD BEI DEN VERFORMUNGSBERECHNUNGEN BERÜCKSICHTIGT WIRD,

ZONE, DIE VERNACHLÄSSIGT WIRD

DER DEN VERFORMUNGSBERECHNUNGEN SEGMENTIERTER SPANNBETONTRÄGER ZUGRUNDEZULEGENDER BETONQUERSCHNITT



IM BRUCHZUSTAND GILT :

$$w = 2x \frac{\theta}{2} (h_v - x)$$

Rißöffnung in Spannliedhöhe

$$f = \frac{\theta}{2} \times \frac{l}{2}$$

Mittendurchbiegung

$$\Delta \epsilon^U = \frac{w}{L} = \theta (h_v - x) / L$$

Dehnungszuwachs im Bruchzustand

$$Z_S^U = A_s \times \beta_{z,s}$$

Zugkraft des Betonstahls

$$Z_V^U = A_z (\epsilon_v^0 + \Delta \epsilon^U) \times E_z \leq A_z \times \beta_{s,v}$$

Zugkraft der Spannbewehrung

MODELL, MECHANISCHE UND GEOMETRISCHE ZUSAMMENHÄNGE ZUR BESTIMMUNG DES DEHNUNGSZUWACHSES IM BRUCHZUSTAND

Bild 3: Bestimmung des Verformungsverhaltens /1/ zwischen Gebrauchs- und Bruchzustand

3. Herstellungsmethode der Segmente

Die Segmente werden beim Verlegen trocken und paßgenau aneinandergesetzt und verspannt. Diese Technik der trockenen Fuge verlangt, daß die Elemente an den Stirnflächen wie ein positiver bzw. negativer Abdruck aneinandepassen müssen. Kleine Abweichungen führen schon zum Abplatzen des Betons beim Vorspannen durch Spaltzugkräfte, die durch punktuelle Belastung entstehen.

Daher werden die Elemente nach der Match-cast-Methode im Short-Line oder Long-Line-Verfahren hergestellt (Bild 4).

Bei jedem dieser Verfahren wird das nachfolgende Element gegen die Stirnfläche des vorherigen Elementes betoniert.

Beim **Long-Line-Verfahren** wird das ganze Brückenfeld eingerüstet und zuerst alle Elemente mit ungerader Nummer und nach dem Erhärten alle Elemente mit gerader Nummer gegen die Stirnflächen der ungeraden betoniert.

Die Stirnfläche des fertigen Elements wird bei beiden Verfahren mit einem stark wirkenden Trennmittel behandelt.

Das Long-Line-Verfahren wird rationell anwendbar, wenn:

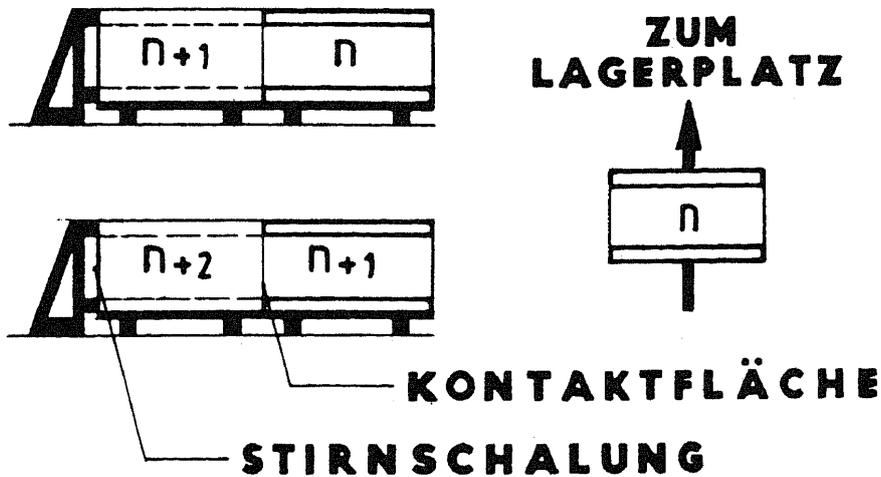
- 1) viele gleiche Felder hergestellt werden müssen.
- 2) keine veränderlichen horizontalen Krümmungen in der Streckenführung vorhanden sind.
- 3) ein konstanter Gradientenradius vorhanden ist.

Beim **Short-Line-Verfahren** werden jeweils nur einzelne Elemente hergestellt. Dabei wird das vorherige Element immer als Stirnschalung benutzt, um die Fugenpaßgenauigkeit sicherzustellen.

Mit diesem Verfahren lassen sich die Elemente polygonal allen Entwurfselementen der Straßenplanung in der Gradienten- und Streckenführung anpassen.

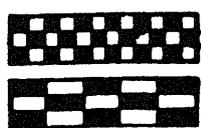
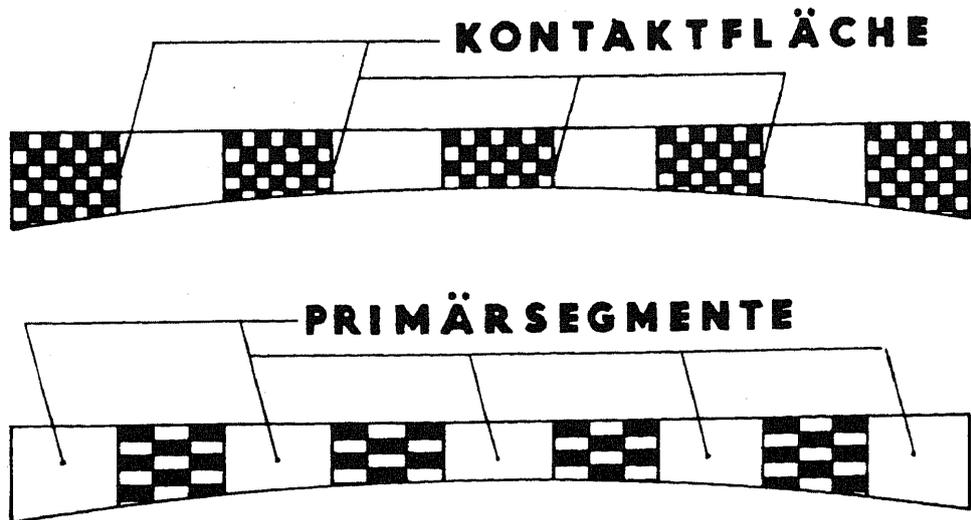
Segmentfertigung in ortsfester **SCHALANLAGE**

(short - line - method)



Segmentfertigung auf **BETONIERBAHN**

(long - line - method)



PRIMÄRSEGMENTE
SEKUNDÄRELEMENTE GEGEN KONTAKTFLÄCHEN der PRIMÄRELEMENTE

Bild 4: Segmentherstellungsmethode (match casting method)

Allerdings verlangt dies ein technologisch anspruchsvolles System von:

- verstellbarer Schalung in vertikaler/horizontaler Richtung sowie variabler Anpassung der vorderen Stirnschalung und
- ein ausgeklügeltes EDV-Programm zur Berechnung der Einstellmaße für die Schalung aus den globalen Absteckdaten
- sowie eine sorgfältige Einmessung der Schalung im Fertigteilwerk.

4. Verlegetechnik der Segmente

Die prinzipielle Entscheidung für einen unten- bzw. obenliegenden Gerüsttyp ergibt sich aus der Fahrgeometrie bzw. Zugänglichkeit der Trasse.

- **Untenliegende Gerüste** werden bei gerader Streckenführung im Grundriß (tangentielle Verschiebung) und bei Zugänglichkeit der Pfeiler verwendet (für die Gleitbahnunterstützung).
- **Obenliegende Gerüste** werden bei variabel gekurvten und geraden Strecken verwendet.

Das untenliegende Gerüst beansprucht nur die Unterbauten.

Das obenliegende Gerüst beansprucht dagegen während der Überfahrt die gesamte, endgültige Brückenkonstruktion. Zudem sind die Lasten an den Unterstützungen des Gerüsts wesentlich schwerer als die Einzellasten der Verkehrslasten (jedoch die Gesamtverkehrslast ist größer als das Gesamtgewicht des Gerüsts).

Ziel der statischen Untersuchung der Bauzustände war es, ein Konstruktions- und Betriebskonzept für das Gerüst zu entwickeln, ohne permanente Zusatzverstärkungen für das Endsystem sowie Festlegung des Betriebskorridors, der Randbedingungen und der begrenzten wiederverwendbaren Hilfsmaßnahmen bzw. -konstruktionen.

Die Verlegetechnik untergliedert sich in folgende Phasen:

1. Antransport mit Tieflader
2. Übernahme durch Gerüstkatze
3. Transport am Gerüst in Verlegeposition
4. Umhängen an Gerüsthänger
5. Ausrichten der Segmente
6. Einführen der HDPE-Hüllrohre
7. Einschließen der Litzen
8. Vorspannen
9. Absetzen des Überbaus
10. Vorfahren des Gerüsts ins nächste Feld

5. Vor- und Nachteile der Konstruktion sowie Ausblick und Entwicklung

5.1 Vor- und Nachteile der externen Vorspannung mittels Trockenfuge

1. Vorteile

Bau- und Unterhaltungskosten:

- Reduktion des Konstruktionsgewichts (konstruktiver Platzbedarf bei Spanngliedern)
- Überbauung von unzugänglichem Gelände
- Schneller Bauablauf

Verbesserung der Bauwerksqualität

- einfache Spanngliedführung, mit Lagekontrolle
- Verringerung der Reibung
- Vereinfachung des Betonierens und Verdichtens
- einfache Verstärkung der Brücke

2. Nachteile

- Teure Hüllrohre und Hüllrohraccessoires (HDPE)
- Entwicklung neuer Trompeten mit Umlenkring
- mögliche Schwingungen der Spannglieder
- geringerer Hebelarm der Spannglieder
- Aufwendige Ausrichtung der Segmente in der Schalung

5.2 Entwicklungstendenzen der Segmentbauweise mit externer Vorspannung

Die externe Vorspannung geht zurück ins Jahr 1936 auf Franz Dischinger und Ulrich Finsterwald. Die heutige Technologie wird von Jean Müller getragen und in Frankreich und in den USA angewandt und international verbreitet.

Die erste Brücke dieser Konstruktion war die Long Key Bridge in den USA 1978, die von Jean Müller entworfen wurde.

Der innovative Schub wird in Verbindung mit wirtschaftlich herstellbarem hochfestem Beton und der daraus resultierenden Gewichtsverringerung der Konstruktion durch nicht korrodierende (oxidierende) Spannglieder wesentlich verstärkt.

Literatur

- /1/ Vielhaber, J.: Vorspannung ohne Verbund im Segmentbrückenbau. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau TU Berlin, Heft 8, Berlin, 1989.
- /2/ AASHTO, 1989: Standard Specifications for Highway Bridges, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C., 1989.
- /3/ Falkner, H.; Teutsch, M.; Huang, Z.: Segmentbalken mit Vorspannung ohne Verbund aus Torsion, Biegung und Querkraft. Erscheint demnächst in Beton- und Stahlbetonbau.