

Entwurfs- und Konstruktionsgrundsätze von extern vorgespannten Straßenbrücken in Segmentbauart, dargestellt am Bangkok Expressway, Thailand

Bilfinger + Berger, als Federführer, baute mit seinen thailändischen Partnern in Bangkok Thailand 35 km Spannbeton-Hochstraßen in Segmentbauart. Das allgemeine Tragverhalten sowie die Bemessungs- und Entwurfsgrundsätze der Segmentbauart mit externer Vorspannung und Trockenfuge werden beispielhaft an diesem Projekt dargestellt. Die Vor- und Nachteile dieser Bauart werden aufgezeigt.

Design Principles of External Prestressed Elevated Bridges in Segmental Construction – in reference to the Bangkok Expressway, Thailand. In 1993 Bilfinger + Berger and their Thai partners completed the construction of nearly 35 km of the Second Stage Expressway in Bangkok. This paper deals with the principal aspects of load carrying behaviour and the construction design methods which were adopted for this particular externally prestressed dry jointed segmental structure.

Advantages and disadvantages of this method of construction are described.

Principes d'étude et de construction de ponts routiers réalisés par segments à précontrainte externe, à l'exemple de la voie rapide „Bangkok Expressway“ en Thaïlande. La Sté. Bilfinger + Berger, responsable du projet, a construit avec son partenaire thaïlandais, 35 km de voie routière aérienne dans le centre de Bangkok, constituée de segments précontraints. Le comportement général quant à la portance de cet ouvrage, ainsi que les principes généraux qui ont régi le dimensionnement et l'étude de ce mode de construction – précontrainte externe et joints secs – sont démontrés par ce projet exemplaire. L'exposé présente les avantages et les inconvénients de ce genre de construction.

1 Einführung

Die Entwicklung der Segmentbauart mit externer Vorspannung und Trockenfugen ist neben den Beton-Schrägschleppbrücken eine der wichtigsten neuen Entwicklungen im internationalen Brückenbau [1].

Die externe Vorspannung geht zurück in das Jahr 1936 auf Franz Dischinger und Ulrich Finsterwalder. Die heutige Technologie wird in Frankreich und in den USA angewandt und ist international verbreitet.

Die erste Brücke dieser Konstruktionsart war die Long Key Bridge in den USA 1978, die von Jean Muller entworfen wurde. Das zur Zeit längste Hochstraßensystem der Welt in Segmentbauweise – der Second Stage Expressway in Bangkok, Thailand – wurde von Freeman und Fox, Singapore entworfen. Der Bauanteil von Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Mannheim, in Zusammenarbeit mit ihren thailändischen Partnern umfaßte 35 km Brückenbauwerke und wurde in der Rekordzeit von nur 17 Monaten gebaut. Das Bauwerk ist im April 1993 dem Bauherrn übergeben worden. In ihrer Aufgabe als bauausführende Firma erstellte Bilfinger + Berger die statische Berechnung für die Bauzustände von mehr als 800 Überbauten. Im folgenden werden die ausführungstechnischen und statischen Vor- und Nachteile dieser Bauart [2] analysiert.

Das Bauwerk besteht aus Einzelfragmenten, die in den Fugen trocken aneinandergepreßt sind. Die Einzelfragmente werden nur durch die Längsvorspannung zu einem Tragwerk zusammengefügt. Dabei werden die Spannglieder so angeordnet, daß im Querschnitt ein inneres Kräftepaar entsteht. Dieses besteht aus der Druckzone des Betonquerschnitts und den nicht im Verbund zum Beton stehenden Spanngliedern in der Zugzone. Dieses innere Kräftepaar wirkt dem äußeren Moment entgegen. Zudem erzeugt die Vorspannung eine Widerstandsreibungskraft in den Fugen, die zur Übertragung der Schubkräfte dient.

2 Allgemeines zum Konstruktionsgrundsatz und zur Tragwirkung

Die externen Spannglieder sind nur punktweise mit dem Tragwerk verbunden (siehe Bilder 3 und 4 in [2]).

Im folgenden werden die wichtigsten Aspekte und Trag-elemente der Bauweise, wie sie bei diesem Projekt angewandt wurden, erläutert:

- a) Einleiten der externen Vorspannung in die Betonkonstruktion,
- b) konstruktive Details der externen Spannglieder,
- c) Schubübertragung in der Fuge,
- d) Bruch- und Verformungsverhalten.

3 Externe Vorspannung

3.1 Einleiten der Vorspannung in die Betonkonstruktion

Die externe Vorspannung des Überbaus wird ausschließlich über die Pfeiler- und Umlenksegmente punktweise in das Tragwerk eingeleitet; sie sind deshalb für das Tragwerk entscheidend.

Im „idealen“ Entwurf wird die externe Vorspannung so angeordnet, daß die Umlenkkraft aus Vorspannung den aus ungünstiger Betriebsbelastung entstehenden Kräften (Querkraft und Biegemomente) entgegenwirken.

Da dies jedoch zu vielen kleinen Spanngliedern und Umlenkelementen führen würde, entschließt man sich aus praktischen Gründen zu vergleichsweise wenigen Umlenksegmenten mit einer begrenzten Anzahl von großen Spanngliedern [2]. Dies hat zur Folge, daß möglichst viele, leichte und einfache Standardsegmente eingebaut werden können, Kosten und Zeit durch Anspannen von wenigen Spann-

Dr.-Ing. Gerhard Girmscheid, Gruppenleiter Brückenbau, Technisches Büro Auslandsbereich, Bilfinger + Berger Bauaktiengesellschaft, Hauptniederlassung Ausland Wiesbaden, Gustav-Nachtigal-Straße 3, Postfach 1509, 65005 Wiesbaden.

	A : Ohne Sattel	B : Mit Sattel
Ausgangssystem		
System oberhalb der Gebrauchsbelastung		
	Üngünstig : Vorspannungswirkung verringert sich	Günstig : Vorspannungswirkung verringert sich nicht

Bild 1. Einfluß der Umlenker auf den Bruchzustand
Fig. 1. Influence of deviators regarding ultimate state
Fig. 1. Influence du diffuseur sur l'état de rupture

gliedern mit großer Spannkraft gespart und Spannglieder übersichtlich angeordnet werden können.

Neben der Anpassung an den Schnittkraftverlauf hat die externe Vorspannung mit Umlenksegmenten gegenüber ausschließlich horizontalgeführter, externer Vorspannung ohne Umlenker den Vorteil (Bild 1), daß die rückstellende Wirkung der Vorspannung erhalten bleibt.

Allerdings müssen Bemessung (Fachwerkanalogie) und Ausbildung der Pfeiler- und Umlenksegmente die Einleitung sehr großer Kräfte in das Bauwerk berücksichtigen.

Zur Überbrückung der Spaltzugkräfte im Einleitungsbereich der externen Längsvorspannung (Verankerungsschott) in den Pfeilersegmenten wurden in Bangkok paarweise kurze Spannstäbe (Bild 2) verwendet.

3.2 Statische Überlegungen zur externen Vorspannung

Für die externe Vorspannung wurden aus wirtschaftlichen Gründen Spannglieder mit großer Spannkraft benutzt, mit 12 bis 22 Litzen.

Die dazugehörigen Spannpressen haben ein Gewicht von 500 bis 800 kg. Die Spannanker werden daher immer auf dem vorderen Pfeiler in Baurichtung angeordnet, die passiven Anker am hinteren Pfeilersegment. Dies ermöglicht es, die schweren Pressen vor Kopf anzusetzen und gibt genügend Platz zum Einfädeln des Hüllrohrs und Spannglieds sowie zum Befestigen des Hebezugs und Setzen der Spannpressen auf die Anker. Aus diesen Gründen werden Einfeldsysteme bevorzugt, bei denen nach Fertigstellung eines Felds alle Spannarbeiten ohne Platzprobleme vor Kopf erledigt werden können [3]. Der erforderliche Vorspanngrad ergibt sich aus folgenden Kriterien:

Im Gebrauchszustand sollte der Querschnitt in allen betrieblichen Gebrauchslastfällen einschließlich Temperatur und Stützensenkungen sowie in den Bauzuständen überdrückt sein [4], [5]. Dies ist erforderlich, weil es bei Vorspannung ohne Verbund sonst bei geringem Vorspanngrad zu unkontrollierten Reißbreiten kommen kann. Einzelne Gelenkbildungen innerhalb der Segmentfugen mit weiten

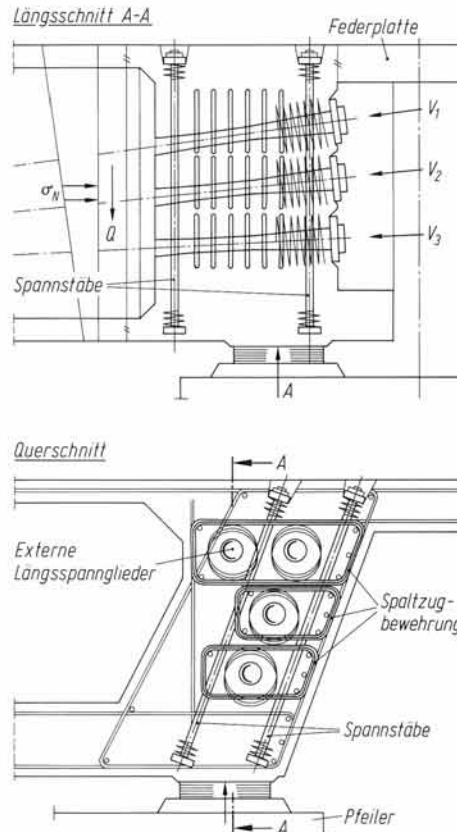


Bild 2. Vorspannung des Pfeilersegments
Fig. 2. Prestressing of pier segments
Fig. 2. Précontrainte d'un segment de pilier

Rissen und verhältnismäßig großen Verformungen könnten die Folge sein.

Die Tragfähigkeit der Tragwerke in Segmentbauart mit externer Vorspannung unterscheidet sich im Grenzzustand der Tragfähigkeit unwesentlich von monolithischen Tragwerken mit interner Vorspannung ohne Verbund. Die Spannungen im Spannstahl wachsen nur leicht, da das gesamte Spannglied für die mittlere Dehnung des Balkens zur Verfügung steht [6]. Allerdings können im Bruchzustand die Verformungen durch die Segmentfugen wesentlich größer werden als bei monolithischer Bauart.

Nach Überschreiten der Gebrauchslast ist der Querschnitt nicht mehr vollständig überdrückt, und damit entstehen klaffende Segmentfugen. Hierdurch kann es zu Einschnürungen in der Druckzone mit vorzeitigem Versagen sowie zu einer Abnahme der wirksamen Stegfläche bei Übertragung der Schubkräfte kommen.

Um den gesamten Steg für die Übernahme hoher Schubkräfte zu aktivieren, ist das Aufreißen der Fuge rechnerisch zu steuern. Im rechnerischen Bruchzustand sollte die Fuge noch mindestens zu 2/3 in der Höhe überdrückt sein [7].

Bei voller Vorspannung empfehlen sich Einfeldsysteme, da hier große Biegemomente und Schubkräfte an verschiedenen Stellen auftreten.

Bei Durchlaufsystemen treten hingegen über der Stütze große Biegemomente und Schubkräfte gleichzeitig auf. Hier müßte beim Aufreißen des Querschnitts die Schubkraft fast nur in der Druckzone übertragen werden. Dabei wirkt eine „übertolle“ Vorspannung bei Durchlaufsystemen günstig.

Hieraus folgt, daß Einfeldsysteme zu bevorzugen sind, da hierbei

die baupraktischen Fragen am besten zu lösen sind (Zugänglichkeit, Bauablauf),

die Unwägbarkeiten aus Zwangsbeanspruchung durch die eindeutige Überdrückung des Querschnitts unter Gebrauchslast ausgeschaltet werden.

3.3 Konstruktive Einzelheiten der externen Spannglieder

Externe Spannglieder sind durch wechselnde Einwirkungen Schwingungen ausgesetzt. Es muß sichergestellt werden, daß dabei die Spannglieder nicht in Resonanz geraten. Die Eigenfrequenz sollte 7 bis 10 Hz betragen [8]. Um Resonanzschwingungen zu dämpfen bzw. die Eigenfrequenz zu ändern, muß man z.B. Autostoßdämpfer oder Zwischenunterstützungen anordnen.

Das von Bilfinger + Berger angewendete externe Spanngliedssystem ist auswechselbar. Es besteht aus zusammengesetzten, nicht in die Pfeilersegmente einbetonierten Hüllrohr-Komponenten und den Verankerungshüllrohren im Pfeilersegment, durch die die auswechselbaren Elemente zum Anker geführt werden.

Das auswechselbare HDPE-Hüllrohr besteht aus zwei getrennten Teilen. Jeweils an den Enden hat das Hüllrohr eine Krempe, die zwischen Ankerplatte und Lochscheibe eingeklemmt ist.

Da beim Anspannen das durchhängende Spannglied (Hüllrohr) gestrafft wird und die Längenänderung in Längsrichtung kompensiert werden muß, besteht zwischen den getrennten Hüllrohren eine Lücke. Diese wird nach dem Anspannen durch ein Überschieberrohr mit Schrumpfschläuchen gedichtet. Die Hüllrohre werden mit Zementmörtel verpreßt; deshalb können die Keile nicht mehr gelöst werden. Zum Auswechseln muß das Spannglied durch mecha-

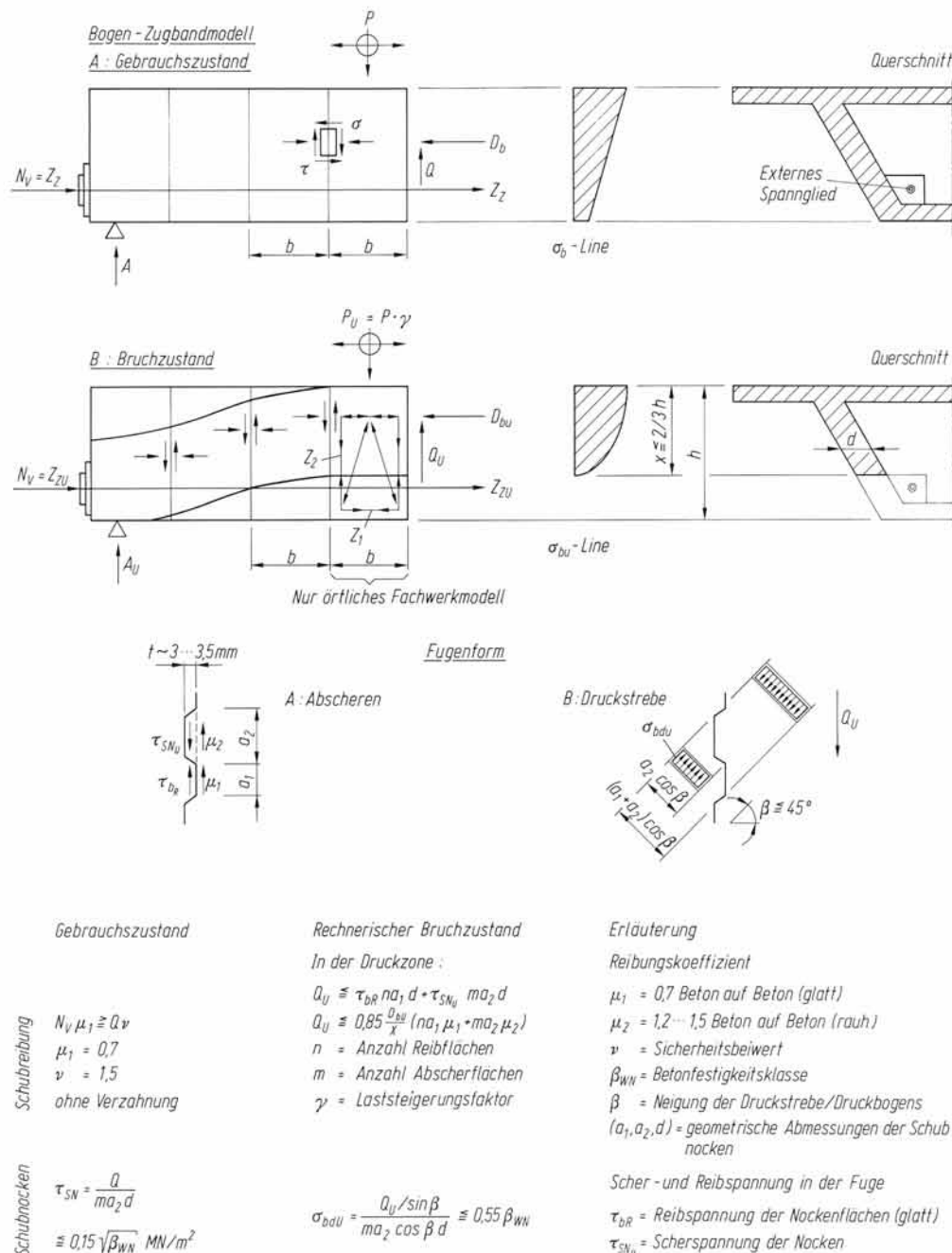


Bild 3. Schubkraftübertragung in der Fuge
Fig. 3. Shear transfer at segment joint

Fig. 3. Transmission des forces de poussée dans le joint

nisches oder thermisches Trennen entfernt werden. Weitere Ausführungsformen zum Spanngliedsystem können [9] entnommen werden.

4 Schubverzahnung der Elemente mit trockener Fuge

Bei der Elementbauart mit trockener Fuge ist die Fuge unbewehrt. Die sichere Übertragung der Querkkräfte und Torsionsmomente kann rechnerisch mit der Schubreibungstheorie nachgewiesen werden.

Die Normaldruckspannung baut dabei senkrecht zur Fuge nach der *Coulombschen* Theorie eine Widerstandskraft auf, die die wirkende Schubkraft infolge der äußeren Kräfte überträgt. Eine Mindestvorspannung muß die Wirksamkeit im Gebrauchs- und rechnerischen Bruchzustand sicherstellen.

Neben dieser *Coulombschen* Komponente wird das für den Stahl- und Spannbetonbau charakteristische Verzahn der Zuschläge im Riß in einer Fuge durch die Schubnocken übernommen. Dadurch erhöht sich auch die Schubkraft-Übertragungskapazität in den Fugen. Die Übertragung der Schubkraft über die unbewehrte Fuge wird gemäß Bild 3 nachgewiesen. Zur Berechnung der kombinierten Beanspruchung aus Torsion und Querkraft wird auf [7] verwiesen.

Die in den Stegen vorhandenen Nocken dienen hauptsächlich der Aufnahme der Querkkräfte (Bild 4). Auf der Stirnfläche von Fahrbahn- sowie Bodenplatte werden aus folgenden Gründen waagerechte, längliche Nocken angebracht

zum Einpassen der Elemente beim Verlegen,

zur Aufnahme von Torsionsbeanspruchungen (Kastenwirkung),

zur monolithischen Wirkung der Fahrbahnplatte bei der Übertragung der Plattenquerkkräfte.

Für das genaue Aneinanderpassen der Elemente wird bei trockener Fuge immer das neue Segment gegen die Stirnfläche des vorherigen Elements betoniert [10].

Zur Übertragung der Schubkräfte im Bruchzustand ist auf eine gute Verbügelung der Segmentstege zu achten. Die untere Längsbewehrung in den Stegen der Segmente sollte aufgebogen werden. Dies ist notwendig, damit im Lasteinleitungsbereich des jeweiligen Segments die Querkkräfte großer Einzellasten (Achslasten usw.) entsprechend dem Fachwerkmodell in die Druckzone des Bogen-Zugbandmodells gelangen können (siehe Bild 3, Bruchzustand). Die Querkraft wird dann durch die Druckzone des Bogen-Zugbandmodells (über die Fugen) zum Auflager geführt.

5 Bruch- und Verformungsverhalten

Das Bruchverhalten eines Trägers in Segmentbauart mit externer Vorspannung ist von verschiedenen Forschern [8] untersucht worden (Bild 5):

Das Verhalten des Trägers bis zum Erreichen des Dekompressionsmoments entspricht dem eines monolithischen Trägers (Punkt B–C). Die Spannstahlspannung wächst linear.

Bei weiterer Laststeigerung reißt der Querschnitt an den trockenen Fugen auf, da sich die Dehnungen entlang der Segmente summieren. Somit entsteht meist an den Fugen ein Spalt. Damit nimmt die Steifigkeit ab, und die Verformungen wachsen an bis zur Gelenkbildung.

Von der Gelenkbildung bis zum Bruch schreitet die Verformung durch die Einschnürung der Druckzone weiter fort.

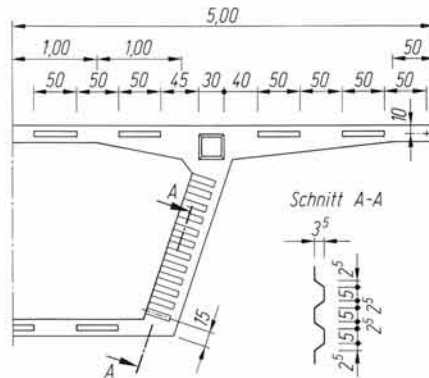
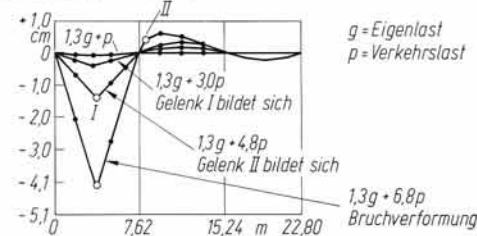


Bild 4. Schubnocken des Fertigteilsegments

Fig. 4. Segment with shear keys

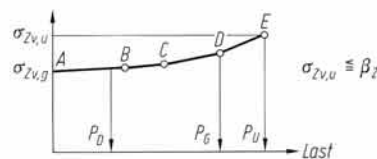
Fig. 4. Créniaux de poussée du segment pré-fabrique

a) Verformung des Trägers



g = Eigenlast
 p = Verkehrslast

b) Spanngliedspannung



c) Betonspannung

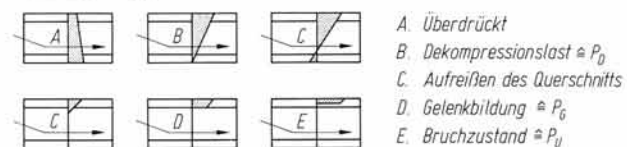


Bild 5. Bruch- und Verformungsverhalten

Fig. 5. Stress and deflection interaction

Fig. 5. Comportement de rupture et de déformation

Wenn die Haftreibung am Umlenker kurz vor dem Bruch überwunden wird, gleiten die Spannglieder.

Zum Nachweis der Grenzzustände der Tragfähigkeit sowie des Gebrauchs Zustands im Bauzustand werden die Schnittgrößen und Verformungen nach der Elastizitätstheorie im Zustand I ermittelt. Dieses Verfahren führt im allgemeinen zu hinreichend genauen Ergebnissen.

Genauere Berechnungsverfahren, die das Verhalten der externen Vorspannung ohne Verbund sowie die veränderlichen Steifigkeiten des Trägers – nichtlineares Verfahren – durch Öffnen der Fuge bei steigender Belastung berücksichtigen, sind von J. Muller und A. E. Naaman [8] entwickelt worden.

Tabelle 1. Entwurfskriterien**Table 1.** Design criteria**Tableau 1.** Critères d'études

Zustand	
Gebrauch	Bruch
Betrieb	$S_g + S_p + S_{ZF} + S_v \leq R_G$
	$1,3 (S_g + 1,67 S_p + S_{ZF} + S'_v) \leq \varphi (R_u + S_v^o)$
	$S_g + S_p + S_{ZF} + 0,3 S_W + S_v \leq 1,25 R_G$
Bauzustand	$1,3 (S_g + 2,2 S_p + S'_v) \leq \varphi (R_u + S_v^o)$
	$1,3 (S_g + S_p + S_{ZF} + 0,3 S_W + S'_v) \leq \varphi (R_u + S_v^o)$
	$S_G + S_{Bau} + S_W + S_v \leq 1,25 R_G$
Randzugspannung	
$\sigma_{bz} \leq 0$	
$S_v = S'_v + S_v^o$ = Schnittkraft aus Vorspannung S'_v = statisch unbestimmter Anteil S_v^o = statisch bestimmter Anteil	

Mit finiten Elementen untersuchte J. Eibl [11] solche Bauteile. Das Aufreißen der Fuge wird durch entsprechende Randbedingungen an den Elementgrenzen berücksichtigt.

6 Bemessungsgrundlagen

Diese Bauart ist bisher in Europa weder in BS 5400 noch in DIN 1075 zugelassen. In den USA wurde 1989 die AASHTO durch eine „Guide Specification“ [5] für die Belange der Segmentbauart erweitert.

Im Eurocode 2 Teil 1D [12] werden zur Zeit Bemessungsrichtlinien entwickelt, wie sie in den USA und in Frankreich benutzt werden.

Die Bauzustände der Segmentbrücken wurden gemäß AASHTO bemessen. Die Nachweise wurden durch Gegenüberstellung der Einwirkungen (Tabelle 1) und den charakteristischen Bemessungswerten (Tabelle 2) auf der Widerstandsseite geführt. Die Teilsicherheitsbeiwerte wurden auf der Einwirkungs- und auf der Widerstandsseite berücksichtigt.

7 Vor- und Nachteile der Bauart

Die Segmentbauart wird anderen Bauverfahren immer dann vorgezogen, wenn keine einfache Ortbetonrüstung aufgestellt werden kann und eine möglichst große Anzahl von gleichartigen Feldern in kurzer Bauzeit hergestellt werden muß.

7.1 Vorteile

Bau- und Unterhaltungskosten:

Verminderung des Konstruktionsgewichts durch dünnere Stege,

einfache Unterhaltung durch Austausch der Spannglieder, keine Korrosion der Spannglieder, wenn unter unberücksichtigtem Zwang die Fuge klafft,

Vorspannung kann vermindert werden (bis $\sigma_z = 0$ im Querschnitt),

Tabelle 2. Lastkombination**Table 2.** Load combination**Tableau 2.** Combinaison des charges et contraintes

Bemessungsfall		Kriterien
Beton	Gebrauchszustand:	$\sigma_{bz} < 0$ (N/mm ²) $\sigma_{bd} \leq 0,4 \beta_{CN}$
	Hohlkasten Zug Druck	
Spannstahl	Gebrauchszustand:	$\sigma_{zi} \leq 0,9 \beta_s$ $\sigma_z \leq \text{Min } (0,7 \beta_z; 0,8 \beta_s)$
	Anspannen	
	Nach Verkeilen	
Schub	Bruchzustand:	$\sigma_{zi} \leq \sigma_z + 100 < \beta_s$ (N/mm ²)
	Zur Ermittlung des Bruchmoments	
Schub	In der Fuge	Als äußere Beanspruchung
	Innerhalb des Segments	Wie bei monolithischer Bauweise

Überbauung von unzugänglichem Gelände, schneller Bauablauf.

Verbesserung der Bauwerksqualität:

einfache Spanngliederführung mit Lagekontrolle der Spannglieder,

Verringerung der Reibung,

Vereinfachung des Betonierens und Verdichtens (der Stege, Platten ohne Spannglieder),

einfache Verstärkung der Brücke,

Verbesserung der Verpreßqualität bzw. Kontrolle.

7.2 Nachteile

Teure Hüllrohre und Hüllrohrzubehör (HDPE),

Entwicklung neuer Trompeten mit Umlenkern,

mögliche Schwingungen der Spannglieder und Rißbildung im Verfüllmörtel

geringerer Hebelarm und geringere Spannungs-Ausnutzung der Spannglieder als bei interner Vorspannung,

aufwendige Ausrichtung der Segmente in der Schalung.

8 Zusammenfassung

Durch die Segmentbauart mit externer Vorspannung und Trockenfuge werden die Prinzipien, Erkenntnisse und Erfahrungen der monolithischen Bauart fortentwickelt. Die Segmentbauarten mit Feinbetonfuge bzw. Klebefuge und interner Vorspannung waren Vorläufertechniken.

Aus der Entwicklung betrachtet war dies der vorsichtige Versuch, die Prinzipien und Erkenntnisse der monolithischen Bauart nicht gänzlich preiszugeben.

Heute sind wir dank unserer Erkenntnisse bei dem Bemühen, Nachteile durch systematische Fehleranalysen zu verbessern, weiter fortgeschritten. Sicherlich muß bei der Segmentbauart das kombinierte Verhalten zwischen Biegung, Normal-, Querkraft und Torsion in der Fuge weiter erforscht werden [7]. Weitere grundsätzliche Forschungsergebnisse können aus [13] bis [17] entnommen werden.

Der innovative Schub wird in Verbindung mit wirtschaftlich herstellbarem hochfestem Beton [18] und der daraus resultierenden Gewichtsverminderung der Konstruktion sowie durch nicht oxidierende Spannglieder wesentlich verstärkt [19].

Literatur:

- [1] Girmscheid, G.: Entwicklungstendenzen und Konstruktionselemente von Schrägseilbrücken aus Stahlbeton und Verbundkonstruktion. Bautechnik 91 (1987) H. 8, S. 256–267.
- [2] Girmscheid, G.: Spannbeton-Hochstraße in Bangkok – Planung der Ausführung. Beton- und Stahlbetonbau 88 (1993), H. 6, S. 161–166.
- [3] Girmscheid, G.: Neue Technologien im Brückenbau. Tagungsband Neue Technologien im Bauwesen. TU Braunschweig 1992.
- [4] AASHTO, 1989: Standard Specifications for Highway Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D. C., 1989.
- [5] AASHTO, 1989: Guide Specification for Design and Construction of Segmental Concrete Bridges. American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington D. C., 1989.
- [6] Rüschi, H., Kordina, K., und Zelger, C.: Bruchsicherheit bei Vorspannung ohne Verbund. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 130. Berlin: Ernst & Sohn 1959.
- [7] Falkner, H., Teutsch, M., und Huang, Z.: Segmentbalken mit Vorspannung ohne Verbund unter kombinierter Beanspruchung aus Torsion, Biegung und Querkraft, (Veröffentlichung in Vorbereitung).
- [8] Naaman, A., und Breen, J.: External Prestressing in Bridges. ACI SP-120. Detroit (USA), ACI Publication, 1990.
- [9] Jungwirth, D., und Hochreither, H.: Externe Vorspannung – Zeitgeist oder technischer Fortschritt. Bauingenieur (1992) S. 157–165.
- [10] Muller, J. M., und Podolny, W.: Construction and Design of Prestressed Concrete Segmental Bridges. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1982.
- [11] Eibl, J.: Brücken mit externer Vorspannung. DBV-Arbeitsstagung: Fortschritte im Spannbeton. Deutscher Beton-Verein Wiesbaden 1992.
- [12] Eurocode No 2 Part 1D: Unbonded and external tendons buildings, Draft, Luxemburg, 1992.
- [13] Vielhaber, J.: Vorspannung ohne Verbund im Segmentbrückenbau. Berichte aus dem Konstruktiven Ingenieurbau TU Berlin, H. 8, Berlin 1989.
- [14] Guckenberger, K., Daschner, F., und Kupfer, H.: Segmentäre Spannbetonträger im Brückenbau. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 311. Berlin: Ernst & Sohn 1980.
- [15] Kupfer, H., Guckenberger, K., und Daschner, F.: Versuche zum Tragverhalten von segmentären Spannbetonträgern. Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 335. Berlin: Ernst & Sohn 1982.
- [16] Kordina, K.: Schriftenreihe Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 350. Berlin: Ernst & Sohn 1984.
- [17] Naaman, A. E.: External Prestressing for Rehabilitation: Analysis and Design Implications. Bridge Rehabilitation, Proceedings of 3rd International Workshop TH-Darmstadt. Berlin: Ernst & Sohn 1992.
- [18] Hochfester Beton: Darmstädter Massivbau-Seminar, Band 6. TH Darmstadt 1992.
- [19] Rostasy, F., S., Budelmann, H., und Hankers, C.: Faserverbundwerkstoffe im Stahlbeton- und Spannbeton. Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992) H. 5, S. 123–129, H. 6, S. 152–154.

