

Wirtschaftliche Verwendung von Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton

Von Davorin Kolić, Pasching und Jure Radić, Zagreb

Mit 9 Abbildungen

(Eingelangt am 2. Februar 2004)



Dipl.-Ing. Davorin Kolić
M.Sc.



Prof. Dipl.-Ing. Dr.sc. Jure
Radić

Kurzfassung

Anwendungsgebiete von Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton befinden sich üblicherweise in der Spalte zwischen kontinuierten Hohlkastenträgern veränderlichen Querschnitts und bei Hängebrücken. Um die Grenzbereiche deren effektiver Anwendung zu bestimmen, wurden konstruktive und wirtschaftliche Faktoren analysiert, unter welchen Bedingungen die Anwendung solcher Strukturen attraktiv und erfolgreich sein wird. Analysen haben statische und dynamische Einflüsse auf die Konstruktion, sowie Einflüsse der Herstellungs- und Materialkosten auf das gesamte Objekt in Betracht genommen.

Summary

The application of cable stayed bridges is traditionally placed between continuous box-girder bridges and suspension bridges. Different parameters have been analyzed to define conditions that secure their structural successful application and economical competitiveness with other types of bridge structures. Performed analysis have taken in account static and dynamic influences on cable-stayed structures with concrete stiffening girder as well as construction costs of different construction methods and materials.

1. Einleitung

Die intensive Anwendung von Schrägseilbrücken in den letzten 50 Jahren berücksichtigend, können Beschlüsse über die Grenzbereiche deren erfolgreicher Anwendung gezogen werden. Eine der Formen in der Anwendung von Schrägseilbrücken sind Brücken mit Versteifungsträgern aus Beton, deren Entwurfs- und wirtschaftliche Annehmbarkeit weiterhin analysiert wird. Ähnliche Analysen im Bereich von Schrägseil- und Hängebrücken wurden mehrmals vorgenommen, mit dem Ziel die Bedingungen festzulegen, unter denen die Realisierung des gesamten Objekts im Vergleich zu anderen Typen von Brückenkonstruktionen mittlerer und größerer Spannweite annehmbar ist (1), (2), (4), (6) und (17).

In Leonhardts Werken (1), (6) findet man die Rechtfertigung der Baukosten von Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton ausgedrückt zunächst in Seilkosten, die zu dieser Zeit die Hauptkosten der gesamten Baukosten einer Brückenkonstruktion darstellten. Diese Analysen konzentrieren sich hauptsächlich auf die Obergrenze der mittleren Spannweite im Vergleich zu Hängebrücken (1). Weitere Überlegungen weisen darauf hin, dass die obere Spannweitengrenze wirtschaftlich annehmbarer Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton im Bereich außerordentlich konventioneller Trägerverbindungen ist (3), (5).

Eine der umfangreichsten Übersichten der Annehmbarkeitsbereiche von Schrägseilbrücken wurde vor etwas mehr als fünfzehn Jahren definiert und zwar wie im konstruktiven, so auch im wirtschaftlichen Sinne: «... sehr oft trifft man auf die Behauptung, dass Schrägseilbrücken nur für Spannweiten zwischen 100 und 400 Meter anwendbar sind. Diese Behauptung ist falsch, da bereits Fußgängerbrücken von nur 40 m Spannweite sehr schlank ausgeführt werden können, nur einige Seile benützend und mit einer Fußgängerplatte, ausgeführt aus Spannbeton, ausreichender Stärke von 25-30 cm. Straßenbrücken können bis 700 m Spannweite, Bahnbrücken bis 400 m Spannweite ausgeführt werden ...» (6).

Das Konkurrenzgebiet von Schrägseilbrücken versuchte man im Vergleich zu anderen Brückentypen zu bestimmen, und zwar vor allem mit Brücken mit Hohlkastenträgern, an unteren Spannweitengrenzen sowie mit Hängebrücken an der oberen Grenze der wirtschaftlichen Annehmbarkeit. Als Kriterium bei den angeführten Analysen wurden Verhältnisse angewendet wie: Veränderung des Gewichts eines Versteifungsträgers pro Einheit der Straßenfläche für verschiedene Überbrückungslängen ($L=100-1000\text{m}$), die gesamte Last der Seile für verschiedene Überbrückungsweiten, Betonvolumen des Versteifungsträgers pro Einheit der Brückenfläche nach Belastungssteigerung. Zu den Angeführten wurden auch viele andere Kriterien angewendet, die Veränderungen im Fortschritt der Bautechnologie, neue Baumaterialien und deren Preise sowie bereinigte Erfahrungen gesammelt während der intensiven Anwendung von Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern während der letzten 50 Jahre (20), (21), (22).

Als Folge der Optimierung des Versteifungsträgers, der Materialentwicklung, der Anwendungsart der Seile und der Entwicklung neuer Ausführungsmethoden, ist die wirtschaftliche Annehmbarkeit von Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton auch heute noch im statischen und dynamischen Verhalten dieser Brücken und vor allem in der Analyse der Seile selbst und deren Preisen (11). Genauso ist noch in Betracht zu ziehen, dass der Preisanteil der Seile in der Preisstruktur einer Schrägseilbrücke ein äusserst variabler Faktor ist, da auf heutigen Märkten große Unterschiede in Material- und Baupreisen bestehen (23).

Weitere Erörterungen vergleichen Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton mit anderen Brückenkonstruktionen-

typen und zwar im Bereich mittlerer Spannweite zwischen 200 m auf der unteren und 700 m auf der oberen Grenze. Hier werden zuerst konstruktorische und danach wirtschaftliche Faktoren bearbeitet, die die Form und Größe der Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton bestimmen und für unterschiedliche Verkehrsbelastungen, wie das der Fall bei Straßen, Bahn und Stadtbrücken ist. Zuletzt werden Resultate der Analyse in betracht gezogen und Gebiete definiert, wo für einzelne Typen von Verkehrsbelastungen und anderer Außeneinflüsse eine wirtschaftliche effektive Anwendung dieser Brückenkonstruktionstypen nach Kostenvergleich der Ausführung des gesamten Objekts.

2. Konkurrente Systeme für Schrägseilbrücken

Verschiedene Autoren haben in ihren Analysen ähnliche Bereiche dargestellt, in denen es zur Annehmbarkeit einzelner Brückenkonstruktionstypen kommt (2), (3), (16), (23). Diese Analysen entstanden während der letzten 50 Jahre und stellen bedeutende Unterschiede in Annehmbarkeitsgrenzen einzelner Brückentypen dar, verursacht durch Veränderungen bedingt durch Entwicklung von Materialien, der Bautechnologie, Veränderungen im Verhältnis des Materialpreises und der Arbeitskräfte, sowie dem Verhältnis der Preise auf dem Markt, auf dem die Brücke ausgeführt wurde.

Auf im Jahr 1966 (2) veröffentlichten Diagrammen ist zu sehen, dass der Annehmbarkeitsbereich für Hohlkastenträger kontinuierlicher Brücken sich für Längen mittlerer Spannweite im Bereich von 65 – 235 m befindet. Schrägseilbrücken wurden hier als konstruktive Lösungen dargestellt, wirtschaftlich annehmbar für mittlere Spannweiten von 175-325 m und Hängebrücken für mittlere Spannweiten von 325 m und mehr, wo die obere Annehmbarkeitsgrenze nicht definiert wurde, aber praktische Beispiele stellen unter Beweis, dass zu dieser Zeit bereits mittlere Spannweiten von 1298 m erreicht wurden, wie z.B. die Brücke Verrazano Narrows in New York, USA aus dem Jahr 1964 (24). Auf diesen Diagrammen unterscheidet man die verwendeten Materialien noch nicht, aber es ist sichtbar, dass die Hohlkastenträger aus Spannbeton gebaut wurden. Schrägseilbrücken haben manchmal Versteifungsträger aus Beton, aber auch aus Stahl, während Versteifungsträger bei Hängebrücken fast ausschließlich aus Stahlstruktur sind.

Detaillierter die Analyse der Anwendung von Hohlkastenträgern betrachtend, kann deren obere Annehmbarkeitsgrenze aufgrund von Analysen vom Beginn der 80-er Jahre näher bestimmt werden (3). Die Statistik weist auf, dass die größte mittlere Spannweite durch Freivorbau des Hohlkastenträgers veränderlichen Querschnitts erreicht werden kann und sich von 70 - 250 m bewegen, und heute weiß man, dass der Rekord der mittleren Spannweite auf der Brücke Stolmasundet 1998 mit 301 m erreicht wurde. Gesamte Systeme von Hohlkastenträgerbrücken werden bis zu etwa 800 m Länge ausgeführt, doch die Anwendung der vorgefertigten Träger kennt praktisch keine Grenzen, so können solche Strukturen in der gebrauchten Länge hergestellt werden. Bezüglich der Baugeschwindigkeit kann die größte Geschwindigkeit durch Anwendung von Segmenten im Freivorbau erreicht werden. Auf diese Art können sogar 60 m pro Woche geschafft werden.

Die Obergrenze der Anwendung von Hohlkastenträgerbrücken deckt sich gleichzeitig mit der unteren Annehmbarkeitsgrenze von Schrägseilbrücken.

Vergleicht man in einem Diagramm die Anwendung verschiedener Brückenkonstruktionen der üblichen Anwendung nach der Länge der mittleren Spannweite, die in den meisten Fällen auch die maximale Spannweite ist, findet man Schrägseilbrücken im Bereich zwischen 200 und 600 m (Abb. 1) auf einem Diagramm

aus dem Jahr 1993 (16). Der Autor dieses Diagramms versuchte auch ein Gebiet zwischen Schrägseilbrücken und Hängebrücken zu decken, mit einem neuen Typ sog. «Hybridkonstruktion», die mit ihren Elementen Teile von Schrägseilbrücken und Hängebrücken vereinigen. Obwohl dieser Vorschlag noch keine Anwendung fand, ist er interessant, weil er versucht, die unangenehmen Seiten beider Systeme in den Grenzanwendungsbereichen zu beseitigen: bei Schrägseilbrücken ist dies die Obergrenze der mittleren Spannweite, die derzeit bei 890 m über die Brücke Tatara liegt, die mit Hohlkastenträgern aus Stahl gebaut wurde und bei Hängebrücken ist dies die untere Grenze der mittleren Spannweite mit wirtschaftlicher Annehmbarkeit und voller Verkehrsbelastung von etwa 800 m.

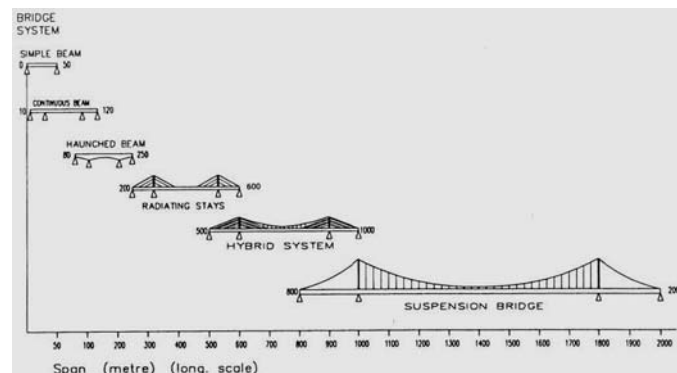


Abb. 1. Anwendungsgebiete von Brückenkonstruktionen ((16), Rhie, 1993).

In Leonhardts Werken wurde versucht die Annehmbarkeitsgrenzen von Schrägseilbrücken auf der oberen Grenze zu bestimmen, im Vergleich zu Hängebrücken (1). Analysen setzen voraus, dass das Gewicht sowie die Kosten des Fundaments, des Pylon und der Versteifungskonstruktion anzunehmen sind und aus bestehender Erfahrung von ähnlichen Konstruktionstypen bestimmt werden können. Daher wurde als Vergleichsfaktor die nötige Stahlmenge für Seile für drei Konstruktionstypen angewendet: Schrägseilbrücken in Fächer- und Harfeform und Hängebrücken. Die Art der Festlegung nötiger Seile und Kabeln für Aufhängung von Schrägseilbrücken, sowie für Hängebrücken gründet auf einigen Voraussetzungen wie:

1. Seitenspannfelder für alle 3 Systeme wurden als 40% der Länge der Spannweite behandelt
2. Das eigene Gewicht und die bewegliche Last wurden für alle 3 Systeme gleich behandelt, wo die bewegliche Last als 60% des eigenen Gewichts vorgegeben wurde
3. Die Brückenbreite ist für alle Systeme gleich (ca. 40 m) sowie die Materialfestigkeit der Seile

Endgültige Diagramme haben die Veränderung der gesamten Seilmenge für alle Systeme bestimmt, nach unterschiedlichen Längen mittlerer Spannweite. Die Diagramme bestimmen die Größen für die mittlere Spannweite bei Schrägseilbrücken und Hängebrücken von 400 - 1600 m, mit einem numerischen Resultat für die mittlere Spannweite von 3000 m, die der Brücke für die Überquerung der Meerenge bei Messina in Italien entsprechen würde. Obwohl theoretisch, diese Analysen haben die Annehmbarkeit der Schrägseilbrücken in Konkurrenz mit Hängebrücken auch für größere Spannweiten ausgewiesen. Dieser Behauptung entspricht auch das Beispiel der derzeit größten gebauten Hängebrücke Akashi Kaikyo mit der mittleren Spannweite von 1991 m, eröffnet für den Verkehr im Jahr 1998.

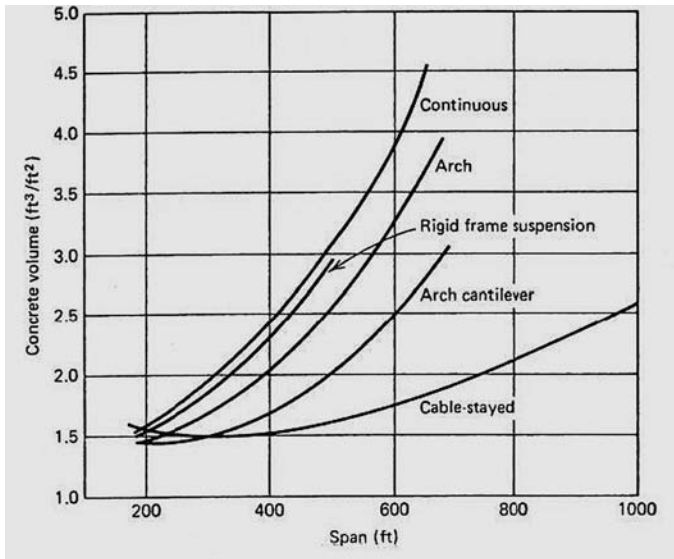


Abb.2. Volumenverhältnis pro Flächeneinheit des Versteifungsträgers nach Länge der mittlerer Spannweite (2), Podolny, Scalzi, 1976

Weitere Analysen Leonhardt's aus dem Jahr 1986 (6) berufen sich immer noch auf die Resultate aus dem Jahr 1972 (1), doch sie befassen sich weiterhin mit der Anwendung von Schrägseilbrücken im «erwartetem» Bereich: Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton für Straßenverkehr bis 700 m Spannweite in der mittleren Öffnung und für Bahnverkehr mit Spannweite der mittleren Öffnung bis 400 m. Neben dem Verbundträger könnten mittlere Spannweiten für den Straßenverkehr bis 100 m und für den Bahnverkehr bis 600 m ohne größere konstruktive Probleme angewendet werden. Diese Analysen weisen ungefähr auf die derzeitige Obergrenze der Annehmbarkeit von Schrägseilbrücken auf und die Überlappungsgebiete mit Hängebrücken für Bereiche mittlerer Spannweiten von 600 – 1000 m, je nach Typ der Verkehrsbelastung.

Um die Anzahl der Unbekannten einzuschränken, die weiterhin variieren werden, beschränken wir uns nur auf Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton. Vergleicht man nur Versteifungsträger aus Beton, bietet diese Analyse aus dem Jahr 1972 eine gute Übersicht der Verhältnisse. Es ist ersichtlich, dass die Betonmenge des Versteifungsträgers pro Einheit seiner Fläche bereits bei mittlerer Spannweite von 100 m am geringsten ist bei Betonträgern mit Schrägseilen, im Vergleich zu Bogenartigen, Hohlkasten und Rahmenkonstruktionen der Brücken.

3. Kostenvergleich im Brückenbau

Die gesamte Erfahrung in Betracht ziehend, haben sich nachfolgende Analysen zu Vergleichen gerichtet, die nicht die Kosten einzelner Brückenelemente oder Ausführungsmethoden analysieren, sondern gesamte Brückenkosten, normalisiert auf die Einheit der Fahrbahnfläche oder eine andere Einheitsgröße. Gründe für diesen Zugang sind:

1. Begrenzungen abzuweichen, die bei einigen Analysen durchgeführt worden sind, weil es praktisch war oder um die Arbeit an zahlreichen nötigen numerischen Analysen zu verringern
2. Alle bisher bekannten Vorteile jeden Typs der Brückenkonstruktion auszunutzen, im konstruktorischen und wirtschaftlichen Sinne, entwickelt durch Anwendung während eines längeren Zeitraums

3. Unterschiede einzelner Märkte bemerken sowie entsprechende Materialpreise und Baukosten, die bedeutend die Strukturänderung von einzelnen Brückenkosten beeinflussen.

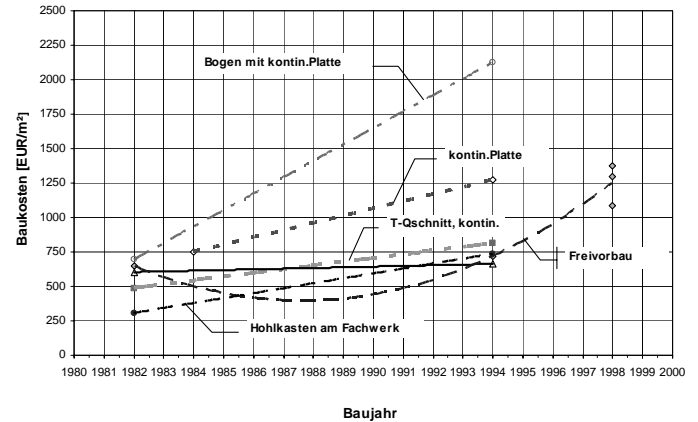


Abb.3. Brückenbaukosten in den letzten 20 Jahren in Mitteleuropa (23).

Die Kostenanalyse der gebauten Brücken in den letzten 20 Jahren in Mitteleuropa, wie auf Abb. 3 dargestellt, zeigt, mit welchem Tempo die Baukosten auf dem Markt gestiegen sind. Ersichtlich ist eine Erhöhung der Baukosten aller Objekte, die nicht mit einer normalen Erhöhung der Dienstleistungs- und Material und Arbeitskraftkosten auf dem Bauproduktmarkt zu rechtfertigen ist. Es ist jedoch interessant, dass die Intensität der Kostenerhöhung für verschiedene Konstruktionstypen unterschiedlich ist. Es ist ersichtlich, dass z.B. kontinuierliche Hohlkastenträger mit Querschnitt von einem Gerüst ausgeführt oder im Freivorbau, sowie Brücken aus montierten, vorgefertigten Elementen einen gleichmäßigen und mäßigen Kostenzuwachs hatten.

Im Unterschied dazu war die Kostenerhöhung von Bogenbrücken und kontinuierlichen Brücken mit Plattenträger unvergleichlich intensiver und binnen 20 Jahren sind die Baukosten dieser Objekte bei beiden Brückentypen um etwa dreimal gestiegen. Diese Kostensteigerung wurde bei einer begrenzten Musteranzahl in angeführtem geografischem Gebiet und während der vorgegebenen Zeit notiert, es ist jedoch interessant und es gibt eine Erklärung in der Erhöhung der Arbeitskraftkosten, sowie der größeren Forderung bezüglich der Form und Ausstattung von Brücken, besonders kontinuierlicher Plattenträger, die in Längen von bereits 20 m bis über 1000 m ausgeführt werden. Die Erhöhung des Einheitspreises ist besonders intensiv bei kurzen Brücken, die auch mehr gebaut werden, weil die Menge der zusätzlichen Ausstattung auf einer kurzen Brücke größer ist im Verhältnis zu ihrer Länge.

4. Konstruktorische Annehmbarkeitsfaktoren

4.1 Konstruktionssysteme

Bei Schrägseilbrücken mit relativ geringem Abstand zwischen den einzelnen Seilen benimmt sich der Versteifungsträger wie ein Balken auf elastischer Bettung. Die inneren Querkräfte und Längsbiegemomente sind gering und gleichmäßig aufgeteilt entlang des Trägers. Die innere Kraft dominanter Intensität im Versteifungsträger ist die Längskraft als Resultat horizontaler Kraftkomponenten in den Schrägseilen. Betrachtet man die Aufteilung der Innenkraft auf alle Konstruktionselemente kann festgestellt werden:

- | | |
|---|---|
| <ol style="list-style-type: none"> 1. Der Versteifungsträger: Große normale Druckkräfte, geringe Längsbiegemomente gleichmäßig aufgeteilt zwischen zwei Aufhänge 2. Die Hauptträgerplatte: Größtenteils unter druck normaler Kräfte des Versteifungsträgers 3. Seile: Zugkraft 4. Pylon: große normale Druckkräfte (gesamtes Brückengewicht und die Verkehrsbelastung), möglich sind geringere Biegemomente von der Auswirkung der asymmetrischen Verkehrsbelastung | <ol style="list-style-type: none"> 2. Hauptträgerplatte: Platte aus Stahlbeton statt Orthotroper mit vorgespannten Querträgern aus Stahl oder Beton 3. Seile: Seile aus hochwertigem Stahl 4. Pylon: aus Stahlbeton oder vorgespannt aus Beton |
|---|---|

4.2. Pylon

Pylon ist ein tragbares Element des Systems, das unter überwiegender Wirkung normaler Druckkräfte ist, die ins System durch vertikale Kraftkomponenten aus den Seilen eingeführt worden sind. Biegemomente im Pylon werden durch Einfluss der Bremskräfte, der Temperatur, des Windes und Erdbeben hervorgerufen. Für Systeme mit mehrfachen Aufhängungen in zwei Seilebenen anker beide Ebenen in drei Grundformen von Pylonen: Pylone mit frei tragenden Vertikalen, Pylone mit Querschnitt in «A»-Form sowie Portalpylone oder Pylone in «H»-Form. Der Pylon in «A»-Form geht aus der Optimierung der Baukosten hervor. Die Form des «A»-Pylon trägt der gesamten Drehsteifigkeit des Systems bei und ermöglicht damit die Ausführung des offenen und schlankeren Querschnitts des Versteifungsträgers.

Benutzt man entsprechende Eigenschaften einzelner Materialien an entsprechenden Teilen der Konstruktion, mit dem Ziel eine annehmbare wirtschaftliche Lösung zu erreichen, wird Beton auf Elemente, die hauptsächlich Druckspannungen ausgeliefert ist, angewendet, während Stahl die Lösung für Elemente ist, die hauptsächlich Zugspannungen ausgeliefert sind.

Betrachtet man dieses Konzept vom Standpunkt der wirtschaftlichen Optimierung des gesamten Systems, so ist dem leichten Versteifungsträger zu neigen, was auch die Querschnittsfläche einzelner Seile verringern wird. Dies wird weiterhin die Verringerung der Materialien als Folge haben, nicht nur des Versteifungsträgers und der Aufhängung, sondern auch des Pylons und des Fundaments. Es ist noch zu betonen, dass die Ausnutzung der Tragkraft einzelner Seile von der Spannweite der Spannungsdifferenz in den einzelnen Seilen abhängig ist. Im Falle dass der Versteifungsträger außerordentlich leicht ist, z.B. in Stahl ausgeführt, wird sein eigenes Gewicht der Intensität der Bewegungsbelastung gleichen.

In dem Fall wird die Spannweitedifferenz der Spannung gering sein, die zugelassene statische Tragbarkeit wird bedeutend verringert, wie das in den Vorschriften definiert wurde, und daher werden größere Querschnitte einzelner Seile nötig sein, was bedeutend die gesamten Kosten des Objekts erhöhen wird. Dazu ist die Ausführung des gesamten Systems in Stahl mit orthotroper Platte des Versteifungsträgers trotz deren geringen Gewichts sehr oft eine wirtschaftlich annehmbare Lösung. Stattdessen, besonders in letzter Zeit, werden Lösungen mit leichten Versteifungsträgern aus Beton oder Verbundträgern benutzt.

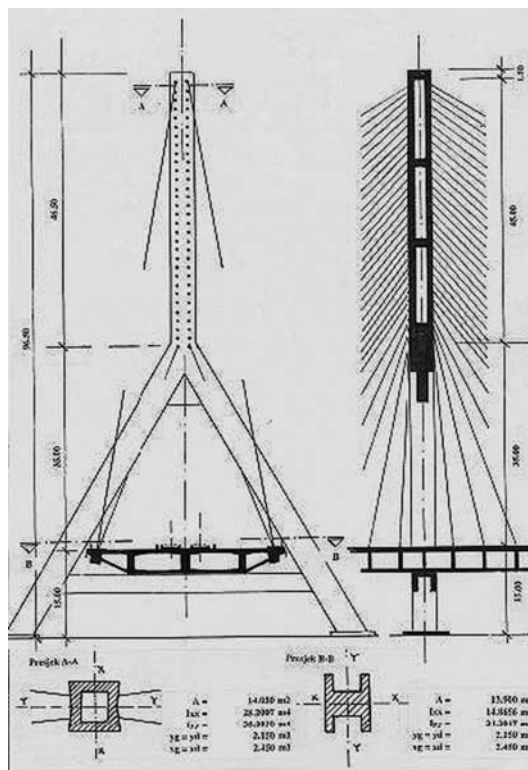


Abb.5. Pylon der Schrägseilbrücke mit Versteifungsträgern aus Beton über die Save in Zagreb, auf der Linie Draskoviceva Straße, Vorschlag aus der Arbeit (23)

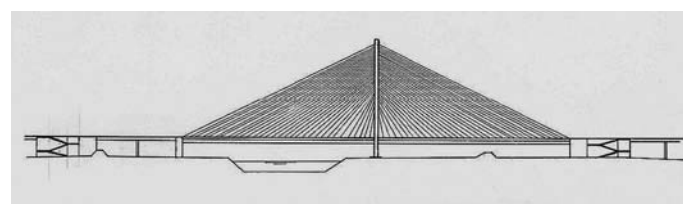


Abb.4. Disposition der Schrägseilbrücke mit Versteifungsträgern aus Beton über die Save in Zagreb, auf der Linie Draskoviceva Strasse, Vorschlag aus der Arbeit (23).

Im Sinne der Konzipierung der wirtschaftlich annehmbaren Lösung wirft sich die Auswahl der Ausführung einzelner konstruktiver Elemente wie folgt auf:

1. Versteifungsträger: Ausführung in Stahlbeton oder mit Hauptträgern aus Stahl als Teilen der Verbundkonstruktion

Je nach Pylontyp und Bautyp kann vorkommen, dass zusätzliche Spannungen in den Bauphasen nötig sind. Es ist wichtig zu betonen, dass Schrägseilssysteme in Haferform steifere Pylone verlangen als Systeme in Fächerform oder Verankerung der Seile an zusätzliche Pfeiler in den Randöffnungen. Die Ursache ist eine größere Deformabilität des Systems in Haferform, die bedingt ist durch einen geringeren Gesamtbetrag vertikaler Kraftkomponenten in den Seilen, die auf den Pylon wirken, was das Resultat gleicher Schrägung aller Seile ist.

4.3. Der Versteifungsträger

Die Aufgabe des Versteifungsträgers ist mehrfach, weil er Folgendes sicherzustellen hat:

1. Die Übertragung lokaler Belastung bis zum Verankerungsort einzelner Seile
2. Die nötige Steifheit des gesamten Systems bei globaler Belastungsaufteilung
3. Die Aufteilung konzentrierter Kräfte auf die Nachbarseile

Die im Einführungsteil betrachteten angeführten Schrägseilssysteme, bei denen die Seile ins System verankert sind, bzw. in den Versteifungsträger und Pylon. Horizontale Kraftkomponenten in den Seilen wirken mit Druckkraft auf den Querschnitt des Versteifungsträgers und dadurch belasten sie durch Druckspannung den ganzen Bereich zwischen den Seilen, die von einem Pylon herabgehen. So ist der Versteifungsträger längs vorgespannt, außer einem geringeren Teil in der Mitte der Hauptspannweite, zwischen den ersten zwei Seilen, die zu den zwei Seilebenen gehören, die von zwei Pylonen herabgehen. Bei Bedarf kann dieser Teil des Versteifungsträgers längs vorgespannt werden mit Kabeln für die Vorspannung, die bis ins nächste Feld zwischen den Seilen reichen kann.

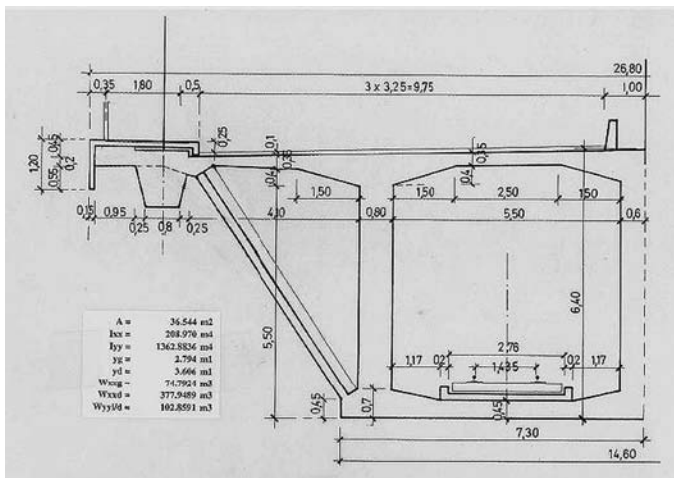


Abb.6. Querschnitt des Fahrbahnträgers der Betonbrücke mit Schrägseilen über die Save in Zagreb, auf der Linie Draskoviceva Straße, Vorschlag aus der Arbeit (23)

Längskräfte im Fahrbahnträger sind von größter Bedeutung, da die Biegemomente von eigenem Gewicht gering sind, und Biegemomente von der Bewegungsbelastung nur etwas größer. Die normale Druckkraft größerer Intensität wirkt auf den Fahrbahnträger aus Beton äusserst günstig, dabei die Zugbelastungen, die von eigenem Gewicht und der Bewegungsbelastung vorkommen annullierend. Dies ermöglicht weiterhin leichte Querschnitte im Beton, was auch ein erwünschter Effekt ist, damit alle Belastungen die teureren Seile übernehmen, die damit rechtfertigt und ausgenutzt wären.

Der Fahrbahnträger aus Beton kann aus vorgefertigten Elementen oder aus Ortbeton ausgeführt werden.

In der Anfangsphase der Entwicklung der Baumethoden von Schrägseilbrücken wurden hauptsächlich vorgefertigte Elemente angewendet, nicht nur aus dem Grund der einfacheren Produktion und Einbau, sondern um den Kriechen- und Schwindeneinfluss auf die Veränderung der Kräfte in den Seilen zu verringern. Betrachtet man die Ausführung eines Versteifungsträgers, dauert der Bau etwa ein Jahr. Während dieser Zeit ist die Spannungserhöhung in den Seilen gleichmäßig und beim Bauabschluss ist der Kriechen- und Schwindeneinfluss bedeu-

tend verringert. In dem Moment können die Seile des Systems gespannt werden und zwar so, dass die Innenkräfte des Trägers der Aufteilung bei kontinuierten Trägern unter eigenem Gewicht entsprechen. Dazu beinhaltet der Versteifungsträger als Druckelement bedeutende Mengen Bewehrung in der Längsrichtung, was weiterhin die Verkürzung des Trägers durch den Kriechen- und Schwindeneinfluss verringert.

4.4. Seile und deren Verankerung

Seile sind die entscheidenden Trageelemente bei Schrägseilbrücken, die der gesamten Steifheit und Dämpfung des ganzen Systems beitragen. Heute werden bei der Ausführung regelmäßig vorgefertigte Seile angewendet, die mit endgültigem oder zeitweiligem Rostschutz ausgestattet sind. Man unterscheidet drei Grundtypen von Seilen, die heute angewendet werden: spiralförmige gedrehte Seile aus parallel gelegtem Draht oder Stäben und Seile aus einzelnen Stangen oder Stangenbündel aus hochwertigem Stahl. Bei Schrägseilbrücken werden meistens folgende Seiltypen angewendet:

1. Seile mit parallel gelegtem Draht oder Stäben
2. Spiralförmig gedrehte Seile
3. Seile aus einzelnen Stangen oder Stangenbündel aus hochwertigem Stahl

Seile Grenzen, in denen sich die Seilentfernungen bewegen hängen von der Fahrbahnbreite und der Größe der Bewegungsbelastung ab, so wird die Entfernung nach maximaler Kraft im Seil bestimmt, für Seile, die vorgefertigt auf die Baustelle gebracht werden können.

Seile sind empfindlich gegen Schwingungen wegen geringer Biegesteifheit, geringem Querschnitt im Verhältnis zur Länge des ganzen Seils und wegen der Spannungsgröße im Seil. Die Schwingung des Seils wird nach Karmans Schwingungstheorie bestimmt, verursacht durch Wirbelwind. Der Draht kann in freier Schwingung, ohne Dämpfung große Amplituden erreichen, damit ist auch das Resonanzgebiet größer. Deshalb wird beim Einbau von Seilen unbedingt eine der Dämpfungsart angewendet, die die Amplituden und das Resonanzgebiet so gering wie möglich halten wird. Die Dämpfung des Seils wird gewöhnlich ausgeführt wie folgt:

1. Einpressung von Zementemulsion in die Schutz PE Seilstangen
2. Einbau von Neoprenringen am Ende der Stahlstange am Ankerort in den Versteifungsträger und Pylon (dieser Ring verhindert auch Spannungen von Biegungen im Ankerkopf)
3. Einbau von Drosseln im Bereich der Seilverankerung in den Versteifungsträger bei Seilen, die nicht mit einer PE-Schutzstange längs des Seils geschützt sind (damit auch ohne Dämpfung)
4. Anwendung sog. «negativer» Seile für Stabilisierung der Seilebene.

Die Verbindung zwischen dem Pylon, den Seilen und Versteifungsträger wird durch Verankerung der Seile im Pylon und Versteifungsträger erreicht. Bei spiralförmigen Seilen sowie bei Seilen mit parallelen Drahten, größeren Querschnitts ist es äusserst wichtig das Biegen der Seile an der Stelle zu verhindern, wo sie aus dem Anker herauskommt. Häufiges Biegen an dieser Stelle führt zur verringerten Dauer des Ankerdetails. Für den Einbau und Befestigung der Seile gibt es einige Lösungen und Formen konstruktiver Lösung:

1. Unbewegliche Ankerköpfe im Anker ohne Vorspannungsmöglichkeit (es gibt auch Varianten dieser Verankerung mit Vorspannungsmöglichkeit)

2. Bewegliche Hilfsankerköpfe im Anker, die über einen Ring mit Gewinde von der Außenseite des Ankers vorgespannt werden können
3. Bewegliche Hilfsankerköpfe im Anker mit Verbindungsblech mit Öse am Ankerkopf, die vorgespannt werden durch Aufhängung zwischen zwei andere Verbindungsbleche mit Ösen und mit Bolzen befestigt werden.

Grundsätzlich wird die Seilkraft direkt in die Struktur eingeführt, was eine effektive konstruktive Lösung garantiert. Bereiche der Krafteinführung und unterschiedliche konstruktive Lösungen sind immer detailliert nummerisch zu analysieren und zu kontrollieren, besonders wegen der häufigen Spannungsänderungen und Festlegung der Sicherheit auf Ermüdung und weiterhin der Dauer.

5. Wirtschaftliche Annehmbarkeitsfaktoren

Bei Analysen wirtschaftlicher Annehmbarkeit von Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton hat die Kostenschätzung der Ausführung mit der Zerlegung der Schrägseilbrücke auf die im Kapitel 4 dargestellten Elemente begonnen. Da dieser Brückentyp mehrere Untertypen hat und genauso eine Optimierung der Ausführung und Anwendung einiger Brückenelemente möglich ist, wurden konstruktorische Elemente vor allem so analysiert, dass deren Anwendung unter maximaler Ausnutzung deren Besonderheiten bestimmt, wird unter einfacher Ausführung und so geringer Materialverwendung wie möglich.

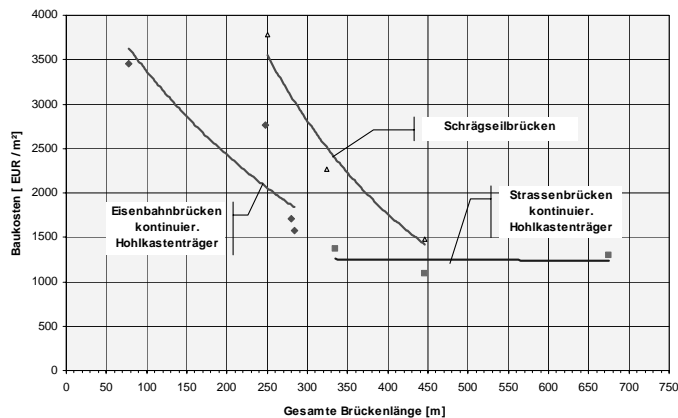


Abb.7. Bereiche der Ausführungskosten konventionell (kontinuierliche Träger) gebauter Straßen- und Bahnbrücken sowie der Schrägseilbrücken

Die so optimierte konstruktive Form hat weiterhin die Ausführungskosten des Objekts definiert und durch Analyse aller Elemente und deren Ausführungskosten bekommt man endlich den Gesamtpreis des ganzen Objekts.

Die gleiche Analyse wurde auch für andere, konkurrente Brückenkonstruktionstypen durchgeführt, die vor allem kontinuierliche Hohlkastenträger waren. Solche analysierte und ausgeführte Preise wurden weiterhin mit bekannten Ausführungskosten wirklicher und ausgeführter Objekte verglichen und es wurde eine Kalibrierung der Kostenbudgetmethode vorgenommen. Nach den so überprüften Kosten konnte weiterhin auch die Kostenspanne, ausgeführt für Schrägseilbrücken geprüft werden. Resultate vergleichener Beispiele sind auf Bild 7 dargestellt, wo auch grobe, lineare Darstellungen der Kostenbewegungstendenz für drei Brückentypen, bestimmt nach der „Least-Square-Method“ dargestellt wurden. Die Durchschnittslinien, die die Entwicklungsrichtung der Größe der Einheitspreise

in der Abb. 7 aufweisen, zeigen, dass die Kosten für Straßenbrücken mit Hohlkastenträgern mit der Erhöhung der gesamten Brückenlänge konstant sind, während die Kosten für Bahnbrücken mit kontinuierlichen Hohlkastenträgern und Schrägseilbrücken sinken.

6. Annehmbarkeitsbereiche

Laut Analysen der Ausführungskosten wurden weitere Beobachtungen durchgeführt, die auf Bereiche hinweisen sollten, in denen die Anwendung von Schrägseilbrücken günstig und empfehlenswert scheint.

Mehrere durchgeführte Beispiele numerischer konstruktiver Baukostenanalysen beobachtend, kam es zum Diagramm in Abb. 8.

Dieses Diagramm zeigt, dass der Einheitspreis von Bahnbrücken nach der gesamten Brückenlänge von etwa 500 m konstant ist und sich nicht bedeutend ändern wird mit der Verlängerung der Brücke. Sie begrenzt sich auf kontinuierliche Hohlkastenträger, den den Forderungen des Bahnverkehrs für eingleisige Bahnen entspricht. Dieser stabilisierte Preis ist im Vergleich zu den anderen Brückentypen bedeutend höher.

Straßenbrücken weisen auch eine Regelmäßigkeit auf, die nicht bedeutender von der Anzahl der Fahrspuren auf der Brücke abhängen wird. Die Kurve der Kostenentwicklung erreicht das Minimum in der Gesamtbrückenlänge von etwa 450 m und steigt danach wieder. Im Vergleich zu Bahnbrücken gleichen konstruktiven Typs ist der Einheitspreis eine Straßenbrücke bedeutend geringer (17), (19).

Schrägseilbrücken dargestellt auf Bild 8 sind mit zwei blauen Linien dargestellt, dabei bezieht sich die Obere (Teuere) auf Bahnbrücken und die Untere (Günstigere) auf Straßen-Schrägseilbrücken aus Beton. Offensichtlich sind Punkte, bei denen die Annehmbarkeit dieser Strukturen beginnt, die auf die Annehmbarkeitsgrenze für Straßenbrücken hinweisen, die bei etwa 550 m der gesamten Brückenlänge beginnt, während für Bahnbrücken diese bei 600-650 m der gesamten Brückenlänge liegt.

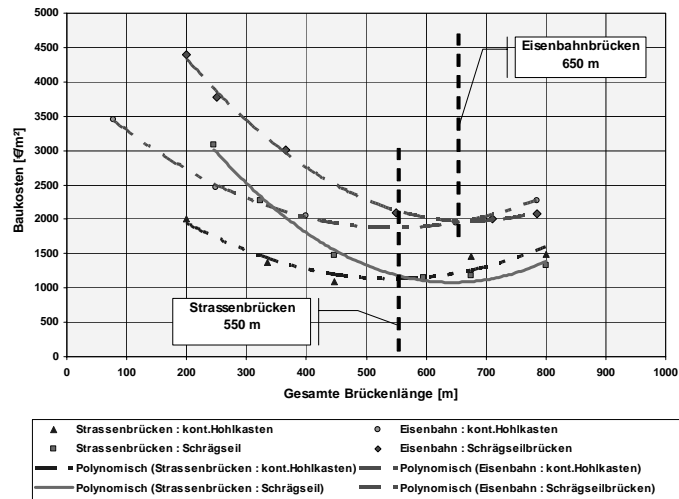


Abb.8. Schätzung der Baukostenbereiche von Betonbrücken als kontinuierlichen Hohlkastenträgern oder Schrägseilbrücken (23).

7. Beschluss

Laut in dieser Arbeit dargestellten Analysen wiederholt die direkte Beziehung zwischen der konstruktiven Idee, dem Bau und den Objektkosten bewiesen. Optimierung wurde für eine begrenzte Form von Brückenstrukturen vorgenommen: Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton und es hat sich erwiesen, dass einfache Formen und technische Lösungen

auch zu optimalen Ausführungskosten führen werden. Zu dem Zweck wurden verschiedene Schrägseilbrückentypen deriviert und es hat sich herausgestellt, dass gerade Brückentypen dargestellt im Kapitel 4 auf Bild 4, 5, 6 und 9 der Typ ist, der konkurrenzfähig den anderen Brückenkonstruktionstypen sein wird, und zwar für Straßenbrücken über 550 m Gesamtlänge und für Bahnbrücken über 600–650 m Gesamtlänge. Die Obergrenze der Annehmbarkeit diesen Typs von Schrägseilbrücken ist nicht bestimmt und sollte im Vergleich zu Hängebrücken und hybriden Hängebrücken bestimmt werden



Abb.9. Optimierte Form der Schrägseilbrücke mit Versteifungsträger aus Beton und Stahl Normady Brücke, Frankreich.

Die vorgelegten Analysen weisen auch eine große Kapazität für die weitere Entwicklung vorgelegter Strukturen auf, die hier nicht umfasst werden konnten, und befasst sich mit der Anwendung moderner Materialien, wie z.B. Seile aus Kohlenstofffaser und Anwendung leichten und Betons hoher Festigkeit (11, 14, 15, 24).

8. Quellennachweis

- [1] Leonhardt F., Zellner W.: „Vergleiche zwischen Hängebrücken und Schrägkabelbrücken für Spannweiten über 600 m“, IVBH Abhandlungen 32-I, 1972, S.127-165
- [2] Podolny W. Jr, Scalzi J.B.: „Construction and Design of Cable Stayed Bridges“, New York 1976, J.Wiley & Sons
- [3] Schlaich J., Scheef H.: „Concrete Box Girder Bridges“, Structural Engineering Documents 1e, Zürich 1982
- [4] Gimsing N.J.: „Cable Supported Bridges – Concept and Design“, Chichester 1983, J.Wiley & Sons
- [5] Walther, Moia, Isler, Houbert: „Schrägseilbrücken“, Loussane 1985, Beton-Verein
- [6] Leonhardt F.: „Cable Stayed Bridges“, X Congress FIP'86, New Delhi, Vol.4, pp.255-298

- [7] Girmscheid G.: „Entwicklungstendenzen und Konstruktionselemente von Schrägseilbrücken“, Bautechnik 8/1987, S.256-267
- [8] Girmscheid G.: „Vordimensionierung der Haupttragwerkproportionen von Schrägseilbrücken“, Bautechnik 9/1987, S.313-317
- [9] Girmscheid G.: „Statische und dynamische Berechnung von Schrägseilbrücken“, Bautechnik 10/1987, S.340-347
- [10] Herzog M.: „Näherungsberechnung von Schrägseilbrücken“, Bautechnik 10/1987, S.348-356
- [11] Jungwirth D.: „Hochleistungsfähige Schrägseile aus der Sicht des Betonbauers“, Beton- und Stahlbetonbau 83 (1988), H.11, S.290-296 und H.12, S.334-338
- [12] Muller J.M., Dutoit D.R.: „Recent Developments in Concrete Cable-Stayed Bridges“, Gradevinar 40 (1988), 1, pp.1-9,
- [13] Candric V.: „Schrägseilbrücken mit Versteifungsträger aus Beton“, Gradevinar 41 (1989), S. 279-292 ,(auf kroatisch)
- [14] Held M., König G.: „Hochfester Beton bis B125 - Ein geeigneter Baustoff für Hochbelastete Druckglieder“, Beton- und Stahlbetonbau 87 (1992), H.2, S.41-45; H.3, S.74-76
- [15] Meier U.: „Carbon Fiber-Reinforced Polymers : Modern Materials in Bridge Engineering“, IABSE SEI Journal 1/92, pp. 7-12
- [16] Rhie S.R.: „Brückenbausysteme für mittlere Spannweiten“, Wien 1993, Springer-Verlag
- [17] Engelsmann S., Feix J., Kupfer H.: „Wirtschaftlichkeitsstudie zum Einsatz hybrider Konstruktionen für Versteifungsträger weitgespannter Schrägkabelbrücken“, Bauingenieur 68 (1993), S.513-517
- [18] Herzog M.: „Vereinfachter Nachweis der aerodynamischen Stabilität von Schrägseilbrücken“, Stahlbau 63, Heft 7, (1994), S.206-214
- [19] Saul R.: „ Kap Shui Mun Bridge“, XIII FIP Congress, Amsterdam May 23-29,1998, pp.237-240
- [20] Hollinghurst H.: „Aesthetic and Technical Aspects of the Dee Bridge : A Juxtaposition of Art and Engineering“, XIII FIP Congress, Amsterdam May 23-29,1998, pp.259-263
- [21] Mauhoudt J.H.J.: „The Martius Nijhoffbridge (Waalbridge), Zaltbouwel“, XIII FIP Congress, Amsterdam May 23-29,1998, pp.289-294
- [22] Combault J.: „Competitivity of Concrete Bridges“, XIII FIP Congress, Amsterdam May 23-29,1998, pp.411-418
- [23] Kolic D.: „Konstruktorische und wirtschaftlicher Annehmbarkeitsfaktoren der Schrägseilbrücken mit Versteifungsträgern aus Beton“, M.Sc Thesis, Fakultät f.Bauwesen, Universität Zagreb, 1998, S.149, (auf kroatisch)
- [24] Radic J.: „Brücken“, Verlag „Dom i svijet“, Zagreb 2002., (auf kroatisch)

Dipl.-Ing. Davorin Kolic, M.Sc.
Neuron ZT/TB
Pelikanstraße 18
4061 Pasching
Prof. Dipl.-Ing. Dr.sc. Jure Radic
Fakultät für Bauwesen
Universität Zagreb
Fra Andrije Kacica Miosica 26
10 000 Zagreb