

Versteifungskonstruktion für die Hängebrücke über den Lillebaelt, Dänemark

Autor(en): **Ostenfeld, Chr. / Haas, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **IABSE reports of the working commissions = Rapports des commissions de travail AIPC = IVBH Berichte der Arbeitskommissionen**

Band (Jahr): **9 (1971)**

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-10373>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

IV

Versteifungskonstruktion für die Hängebrücke über den Lillebaelt, Dänemark

Stiffening Girder Construction Across Lillebaelt, Denmark

Construction de rigidité du pont sur le Lillebaelt, Danemark

CHR. OSTENFELD

Dr. techn.

Consulting Engineers
Copenhagen, Dänemark

G. HAAS

Dipl. Ing.

Die Hängebrücke über den Lillebælt [1] hat eine Hauptspannweite von 600 m und Seitenfächer von je 240 m; die Gesamtlänge der Brücke einschliesslich der Viaduktbauwerke über Land ist 1700 m. Das Bauwerk wurde im Herbst 1970 fertiggestellt.

Der Versteifungsbalken der Hängebrücke ist ein Stahlkasten von 3,0 m Bauhöhe und ca. 33 mm Gesamtbreite, dessen oberes Deckblech die Brückenfahrbahn bildet. Die Brücke überführt 6 Fahrspuren sowie je eine Standspur an den Fahrbahnseiten. Fig. 1 zeigt ein Bild des fertigen Bauwerks.

1. Konstruktiver Aufbau:

Die knapp 1700 m lange vollgeschweisste Konstruktion ist durchweg gleichartig aufgebaut, nur an den Fachenden ist der Kasten zur Überführung der Schnittkräfte in die Lager lokal verstärkt.



Fig. 1. Ansicht der fertigen Brücke.

Der laufende Hohlkasten, dessen Konstruktion aus Fig. 2 ersichtlich ist, besteht aus folgenden zusammenwirkenden Haupttrag-elementen:

- Die Kastenaussenbleche, im Fahrbahnbereich 12 mm stark und durch Trapezhohlprofile versteift, im übrigen Bereich durch Bulbribben versteifte Bleche von 9 mm Dicke.
- Ein weitmaschiges inneres Versteifungssystem in voller Trägerhöhe (dessen Flange die Deck- und Bodenbleche des Kastens sind), bestehend aus zwei Längsstegen (12 mm Blechdicke) nahe den Hängerlinien, zwei Längsfachwerken in den Drittelpunkten des Kastens, sowie Querschotte (8 mm Blechdicke) in Abständen von je 3,0 m.

Die Aufhängung des Versteifungsbalkens an die Hauptkabel erfolgt in Abständen von 12 m durch je 2 Hängerkabel, die in den Kasten hineingeführt und an den ribbenverstärkten Querstegen verankert sind. Wie aus dem Querschnitte hervorgeht, sind die Kasten-seiten mit schrägliegenden Blechen und gekrümmten Übergängen zu den Deck- und Bodenblechen nach aerodynamischen Prinzipien geformt.

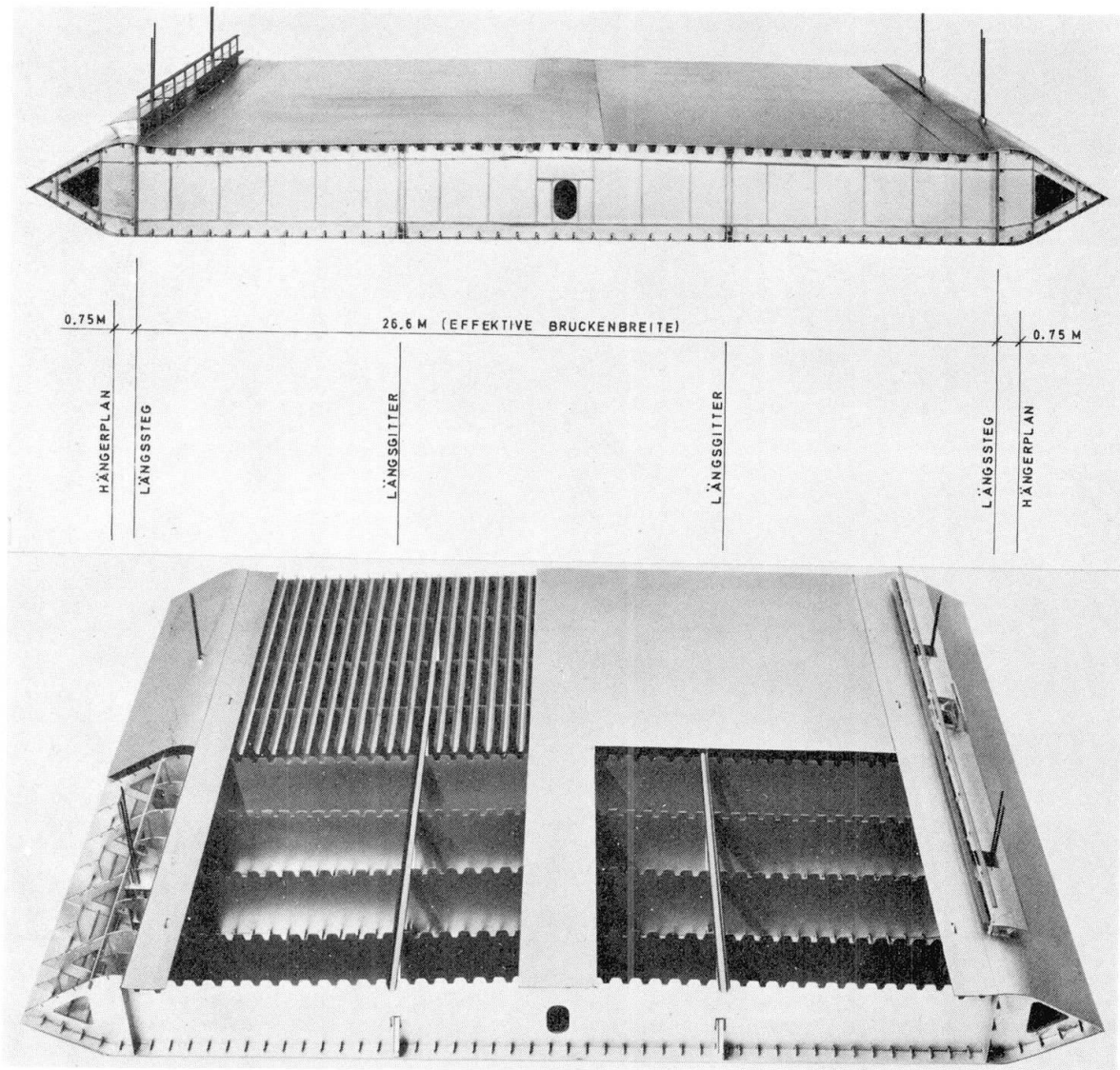


Fig. 2. Querschnitt und Aufbau des Stahlhohlkastens, Modell.

Die Projektausarbeitung erfolgte mit besonderem Hinblick auf eine rationelle Herstellung in werkstattgerechter Arbeitsfolge, u.a. war es wichtig die Möglichkeit einer weitgehenden Anwendung automatischer Schweissprozesse für die grosse Anzahl der längsorientierten Schweissnähte zu sichern. Alle Versteifungsribben der Aussenbleche und Längsstege sind kontinuierlich über die volle Kastenlänge geführt, wobei die Bleche der Querstege entsprechend ausgeschnitten wurden. Die mässig beanspruchten Querstege erhielten eine einseitige Aussteifung durch Flachstähle, die mit Rücksicht auf eine Minderung des Deformationszwanges in der fertigen Konstruktion sowie zur Vereinfachung von Herstellung und Zusammenbau nicht in die Deck- und Bodenelemente eingebunden sind (siehe Fig. 2).

Die Längsgitter, deren Diagonalen in Hohlribben an den Deck- und Bodenblechen eingebunden sind, wurden vollwandigen Stegblechen vorgezogen, um eine gleichmässige Steifigkeit über die gesamte Fahrbahntafel mit Rücksicht auf den Belag zu erhalten.

Das Gewicht der gesamten Versteifungskonstruktion beträgt ca. 12.200 t, davon liegen 4.200 t in der Stahlfahrbahn, bestehend aus Deckblech und Hohlribben, in der mit Rücksicht auf die lokale Beanspruchung durch Verkehr der Stahl St 52-3 zur Verwendung kam. Für alle übrigen Teile des Kastens wurde ausschliesslich Stahl St 37-2 benützt.

2. Werkstattfertigung.

Für Fertigung und den Transport wurde die Konstruktion in Sektionen von 12 m Länge und voller Brückenbreite aufgeteilt. Die Herstellung der 93 Kastensektionen von je ca. 135 t Gewicht erfolgte auf einer Schiffswerft und umfasste alle Arbeiten bis zur schweissfertigen Ausführung, sowie die notwendige Nahtvorbereitung für die Sektionssamlungen (Querstösse) und den grössten Teil der Oberflächenbehandlung der Konstruktion. Zur Sicherstellung der

Passform der Sektionen an den Querstössen war eine successive Zusammenstellung der Kasteinheiten im Fertigungs-gang unerlässlich.

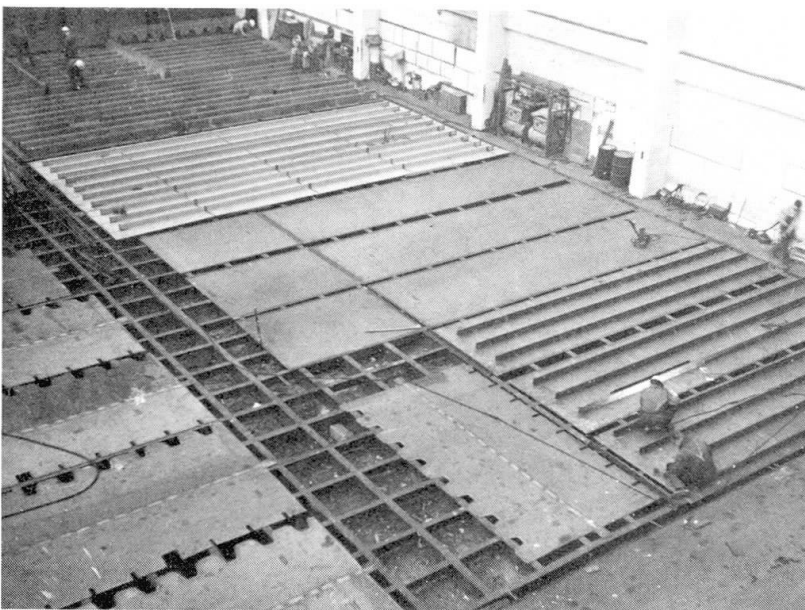


Fig. 3. Panelfertigung. Im Hintergrund Deck- und Bodenpaneele, im Bild vorne Längs- und Querstege ausgelegt.

Zur Vereinfachung der Anarbeitung und Stosspassung war schon im Projekt eine vollständig geradlinige Auslegung der Kastenkonstruktion vorgegeben. Die Einleitung der notwendigen Momente zur Erreichung der vorgesehenen Vertikalkrümmung des Versteifungsbalkens im Hauptfach der fertigen Brücke konnte bei dem schlanken Balken sehr einfach durch entsprechende Abstimmung der Hängerlängen an den Fachenden erreicht werden.



Fig. 4. Sektionsfertigung. Im Hintergrund: Zusammenbau und Kontrolle; Mitte: Malerstation (vor Errichtung der Anstrichhalle); im Vordergrund Verschiffung.

Eingehende Studien zur Festlegung des generellen Produktionsverlaufes, der Teilfertigung und des Zusammenbaues wurden von Werksseite aus durchgeführt.

Der voran beschriebene Aufbau des Kastens führt zu einer natürlichen Teilung der Werkstattarbeiten in Panelherstellung und den folgenden räumlichen Zusammenbau der Panele zur fertigen Konstruktion. Die überwiegende Anzahl dieser Panele hat ausschliesslich längsorientierte Ribben und Schweissnähte, ist also einer Serienfertigung leicht zugänglich.

Die Panelfertigung erfolgte in Schneid- und Schweisshallen (Fig. 3), für den Zusammenbau und die Verschiffung zur Baustelle wurde innerhalb des Werftgeländes eine spezielle Anlage errichtet, die in eine zentrale Fertigungsstrasse auslief, auf der die abschliessende Kontrolle, das Zusammenpassen der Sektionen sowie die Oberflächenbehandlung vorgenommen wurde (Fig. 4).

Fig. 5 gibt eine Übersicht der Anlage und zeigt den Arbeitsablauf beim Zusammenbau. Die Panelelemente, deren Länge einer vollen Sektionslänge entsprach, wurden vorerst zu 7 Teilsektionen gesammelt und in der Folge zur fertigen Einheit verschweisst. Die Sektionen wurden sodann abwechselnd von beiden Seiten in die zentrale Spur eingeschoben, wo die Zusammenpassung von jeweils zwei Sektionen erfolgte.

Hierbei mussten die Bleche an der Stossfuge der Sektionen entlang der ganzen Kastenperipherie innerhalb von 1 mm zum Fluchten gebracht werden. Weiterhin war die Nivellette über beide Sektionen innerhalb von knapp 4 mm Abweichung zu halten, um eine unacceptable Aufsummierung von Verdrehungen des torsionssteifen Querschnittes über die Fachlänge auszuschalten. Die Kontrollmessungen mussten in den Nachtstunden bei Temperaturgleichgewicht in der Konstruktion vorgenommen werden. Die geforderte Genauigkeit konnte dank laufen-

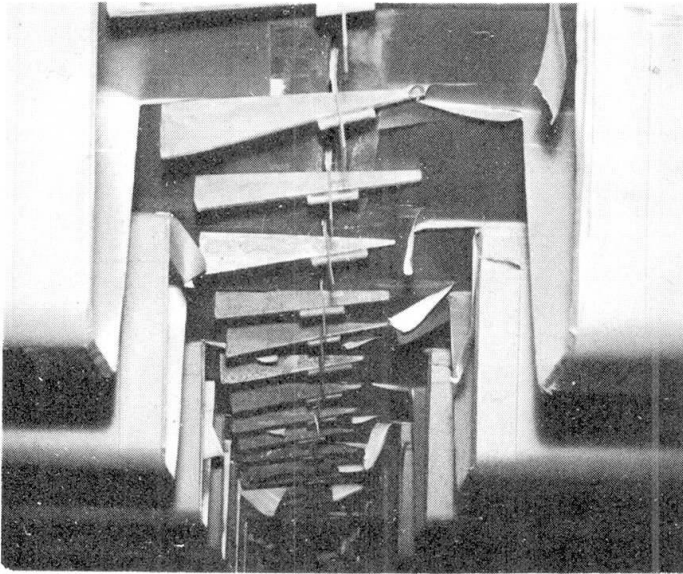


Fig. 8. Fixierung der Deckbleche im Sektionsstoss.

Elektroschlackeschweissung mit seitlich angeordneten Kupferbakken stossverbunden. Die gewählten Methoden hatten sich sowohl in einer Reihe von Vorversuchen als auch in der Ausführung als wirtschaftlich und geeignet erwiesen.

Für alle Schweissungen der Kastenkonstruktion wurden – von wenigen Ausnahmen abgesehen – basische Elektroden benützt. Wegen der beschränkten Blechdicken war ein Vorwärmen beim Schweissen in den Teilen der laufenden Konstruktion nicht erforderlich.

Alle Stumpfschweissungen mussten mindestens dem Charakter 4 nach IIW-Röntgenatlas genügen, doch wurden in gewissen Nähten Porenfehler bis Charakter 3 akzeptiert.

Die Kontrolle der Schweissnähte erfolgte durch Röntgen, Ultraschall und Magnetoflux. Die Blechstumpfnähte wurden mit insgesamt ca. 4000 m Röntgenfilm geprüft, verteilt entsprechend der Beanspruchung der Nähte. Die Röntgenkontrolle wurde durch Ultraschall ergänzt und zudem überlappt, um durch Vergleich mit den Filmen eine entsprechende Qualitätsbeurteilung nach dem Schallbild laufend zu sichern. Die Röntgenkontrolle umfasste ca. 5% die Ultraschallprüfung ca. 25% der Gesamtlänge der Stumpfnähte. Die Prüfung der Kehlnähte erfolgte stichprobenweise mit Magnetoflux.

4. Toleranzen.

Neben den bereits genannten Masstoleranzen beim Zusammenstellen der Kastensektionen war für alle Aussenbleche und Längsstege die maximale Abweichung aus der Ebene innerhalb von 4x4 m Feldern in der fertigen Brücke auf 5 mm begrenzt, gemessen als Distanz von einschliessenden parallelen Ebenen. Die erzielte Genauigkeit entsprach – bis auf ganz wenige Ausnahmen – sehr gut den gestellten Forderungen. Bei den Querstegen wurden Abweichungen in den freien Blechfeldern zwischen den Aussteifungen bis 8 mm akzeptiert. Die Tendenz zu grösseren Abweichungen bei Beginn der Produktion konnte durch passende Massnahmen eliminiert werden. Felder mit Ubertoleranzen wurden durch zusätzliche Steifen stabilisiert.

3. Schweissarbeiten und Schweisskontrolle.

Die Bleche wurden mit optisch gesteuerten Schneidbrennern bearbeitet nach massfesten Zeichnungen 1:10 als Grundlage. Alle Längsstumpfnähte in den Panelblechen wurden von beiden Seiten bei Wenden der Tafeln mit UP-Automaten geschweisst. Für die Oberseite der Fahrbahn war mit Rücksicht auf den Asphaltbelag der Nahtüberwulst auf maximal 1,2 mm begrenzt und erforderte somit eine sehr gleichmässige Nahtführung.

Ein besonderes Problem bot die Schweissverbindung der Trugribben mit dem Deckblech. Aus Beanspruchungsgründen war für die torsionssteifen Ribben eine möglichst volle Durchschweissung der Ribbenblechtiefe von 6 mm gefordert, dabei musste jedoch ein Durchlaufen von Schweissgut, das zu Bindungsfehlern führen kann, verhindert werden. Nach einer Reihe von Versuchen

mit Automaten sowie mit Handschweissung und anschliessender Prüfung der Nähte unter statischer und pulsierender Belastung, konnte ein passender Parametersatz für den vorhandenen Doppelkehlnaht-Pulverautomaten erstellt werden, der die gesetzten Bedingungen erfüllte. Alle Nähte dieser Art von insgesamt ca. 85 km Länge wurden unter ständiger Kontrolle und ohne Beanstandung automatgeschweisst (Fig. 7).

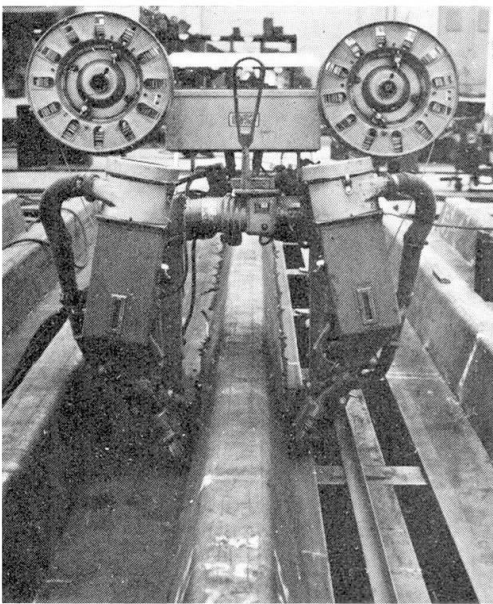


Fig. 7. Verschweissen der Hohlrippen mit Deckblech.

fertigen Sektionen, der viele Stellungsschweissungen (lotrechte und Überkopfnähte) enthielt, wurde vornehmlich von Hand, die Füllnähte im Deckblech jedoch mit Automaten geschweisst.

Beim Zusammenbau der Panele zu

Spezielle Anforderungen stellten die Schweissammlungen der Sektionen untereinander, die im Zuge der Montage teils am Lagerplatz an der Baustelle teils in der Luft ausgeführt wurden. Diese Querstösse umfassen alle langgehenden Konstruktionselemente und werden im fertigen Bauwerk unter äusserer Belastung hoch beansprucht. Um ein einwandfreies Schweissen der Aussenbleche zu sichern waren alle Trug- und Bulbprofile im Stossbereich ausgespart. Nach Fertigschweissung und Kontrolle sowie eventuellen Reparationen der Blechnähte wurden die fehlenden Ribbenstücke eingeschweisst. Die Fixierung der Blechkanten für die Heftungen erfolgte durch dichtgesetzte Verspannungsanordnungen ("Fliegen" und Springkeile) über die ganze Kastenperipherie ohne temporäre Beschlagschweissungen (Fig. 8).

Nach Ausführung der unteren Schweissstränge von Hand überkopf, erfolgte die Auffüllung der Nähte im Deck- und Bodenblech von Kastenmitte her nach aussen durch Pulverautomaten. Beim abschliessenden Einbau der Ribbenstücke kam an den Hohlribben CO₂-Schweissung mit Drahtelektrode zur Verwendung, die Bulbribben wurden mittels

5. Schluss.

Ein Kostenvergleich zwischen der zur Ausführung gekommenen Kastenkonstruktion und einer traditionellen Gitterkonstruktion war durch die parallele Ausschreibung beider Lösungen möglich. Er zeigte für die Kastenlösung eine Kostenersparnis von über 20%. Von wesentlichem Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit der Kastenlösung war die Zugänglichkeit der Konstruktion für rationelle und arbeitssparende Fertigungsmethoden, die vom Hersteller durch intensive Planlegung genutzt wurde.

Bauherr:

Ministerium für öffentliche Arbeiten in Dänemark.

Gesamtprojekt und Bauleitung samt ökonomische Administration:

Chr. Ostenfeld & W. Jønson, beratende Ingenieure, Kopenhagen.

Ausführung des Stahlüberbaues: Monberg & Thorsen A/S, Kopenhagen.

Fertigung der Kastensektionen in Unterentreprise: Nakskov Skibsværft, Nakskov.

Anstricharbeiten in Unterentreprise: Bjerring Andersen & CO.A/S, Kopenhagen.

ZUSAMMENFASSUNG

Der Versteifungsbalken für die Hängebrücke über den Lillebaelt in Dänemark ist ein vollgeschweisster Hohlkasten von 3 m Höhe und ca. 33 m Breite mit einer Gesamtlänge von knapp 1100 m, der aus 93 gleichartig aufgebauten Sektionen zusammengesetzt wurde. Die grosse Anzahl identischer Sektionen ermöglichte eine Werkstattfertigung nach modernen Methoden in kontinuierlichem Arbeitsprozess. Im Vergleich mit der parallel ausgeschriebenem traditionellen Gitterlösung ergab sich eine Kostenersparnis von über 20%.

SUMMARY

The stiffening girder for the suspension bridge across Lillebaelt in Denmark is an all-welded, hollow box section of 3,0 m height and approx. 33 m width. The total length is near 1100 m, made up by 93 almost identical units. The large amount of similar units allowed fabrication in continuous operation, utilizing modern workshop methods. By this solution a saving of more than 20 per cent was achieved compared with the traditional lattice girder solution, for which alternative tenders were called.

RESUME

La poutre de rigidité du pont suspendu sur le Lillebaelt au Danemark est une poutre en caisson entièrement soudée, de 3,0 m de hauteur et de 33 m de largeur environ, et d'une longueur totale de près de 1100 m constituée par 93 éléments identiques rendit possible le façonnage en atelier selon les méthodes modernes de fabrication continue. Une économie de plus de 20% comparée à la solution traditionnelle en treillis mise parallèlement en adjudication fut ainsi obtenue.