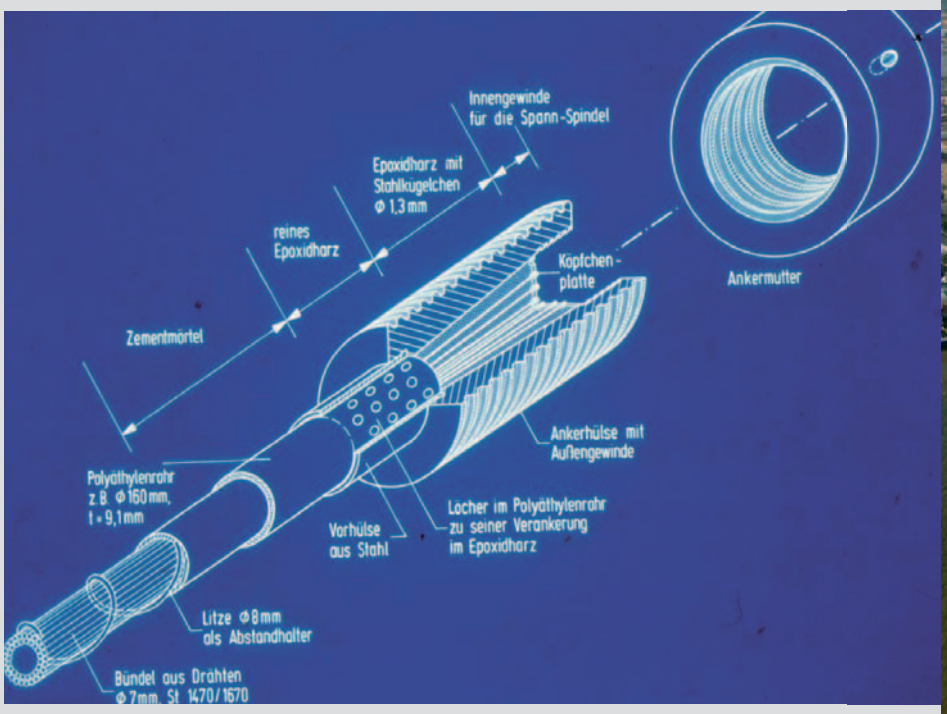
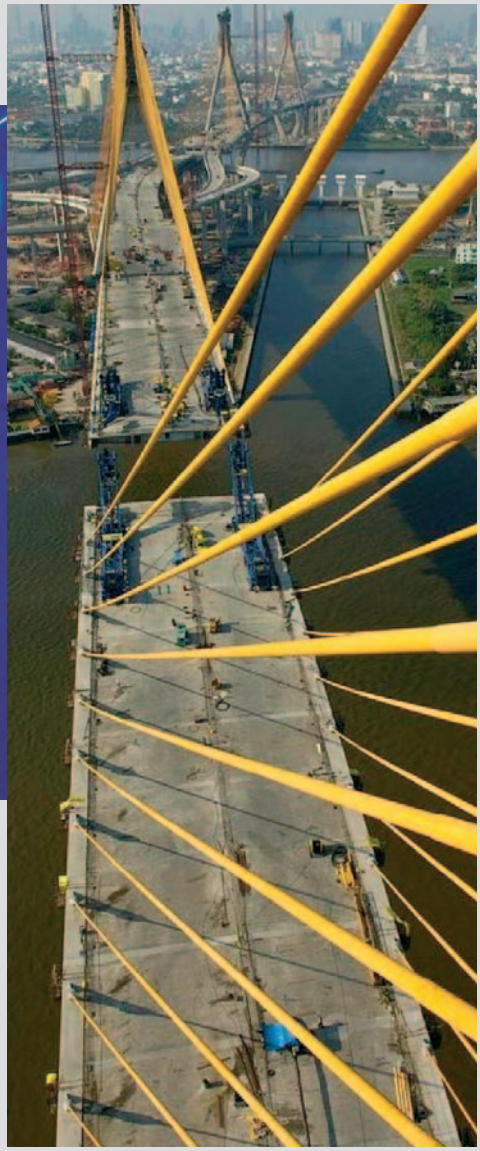
3 Kabel und Seile





3.1 Allgemeines

Die heute gebräuchlichen Kabelsysteme sind in Bild 3.1 dargestellt:

- *Vollverschlossene Seile:* traditionell in Deutschland benutzt, komplett werkgefertigt, erlauben Montage nach Geometrie.
  Vorteile: gute und einfache Unterhaltung
  Nachteile: geringere Steifigkeit und Kriechen, geringere Festigkeit und Dauerfestigkeit.
- *Paralleldrahtkabel:* von LAP in den 1960ern aus BBR-Spannsystem entwickelt, um die Nachteile der bis dahin ausschließlich verwendeten verschlossenen Seile zu überwinden; auch sie werden komplett werkgefertigt.
  Vorteile: hohe Steifigkeit, kein Kriechen, hohe Festigkeit und Dauerfestigkeit (Hi-Am Verankerung)
  Nachteil: komplexer Korrosionsschutz aus mehreren Komponenten.
- *Parallellitzenkabel:* Sie wurden aus Litzenspanngliedern entwickelt, um die höhere Festigkeit und bessere Verfügbarkeit von Litzen auszunutzen und Kabel auf der Baustelle fertigen zu können.
- Vorteile: kostengünstig, Baustellenfertigung, Austauschen einzelner Litzen
- Nachteil: etwas niedrigere Steifigkeit und Dauerfestigkeit.

Alle diese Systeme werden laufend weiterentwickelt. Daneben gibt es noch das Parallelstabsystem, das aus den Stabspanngliedern entwickelt und nur wenige Male eingesetzt wurde. Die modernste Entwicklung sind *Kunststoffspannglieder*, insbesondere aus Carbonfasern, die sich noch in der Entwicklung befinden.

Vorteil: keine Korrosionsanfälligkeit, leicht.
Nachteile: teuer, Verankerung schwierig.

Characteristics		Modern locked coil rope	Parallel wire cable	Parallel strand cable
$E \cdot 10^{-6}$	[N/mm²]	0,170	0,205	0,195
fu	[N/mm²]	1470	1670	1870
$\Delta\sigma$	[N/mm²]	150	200	200

Bild 3.1 Übersicht gebräuchliche Kabeltypen

3.2 Vollverschlossene Seile

3.2.1 System

Bei allen frühen deutschen Schrägkabelbrücken wurden verschlossene Seile benutzt. Sie wurden ursprünglich als schweres Hebezeug für Seilbahnen und Förderseile im Untertagebau entwickelt. Die Zuverlässigkeit von verschlossenen Seilen hat – nicht zuletzt durch Lehren aus Schadensfällen – einen hohen Stand erreicht. In Deutschland werden sie weiterhin angewendet. Allerdings sind bei den letzten zwei großen Schrägkabelbrücken über den Strelasund und über den Rhein bei Wesel Parallellitzenkabel zum Einsatz gekommen, wie sie seit längerem außerhalb Deutschlands üblich sind. Die Seile bestehen aus einem Kerndraht und einigen Lagen Runddrähten mit einem Durchmesser von ca. 5 mm und den äußeren Lagen aus Z-Drähten mit einer Höhe von 6 bis 7 mm, Bild 3.2.

Die verschiedenen Drahtlagen sind gegenläufig geschlagen, um die Seile drallfrei zu machen, Bild 3.3. Der maßgebende Hersteller ist heute die Firma Bridon, [3.1, 3.2].

Beim Spannen der Seile werden die Z-Drähte durch die Querkontraktion gegeneinander gepresst und verschließen so die Oberfläche, daher der Name „Vollverschlossene Seile“. Für die einzelnen Drähte

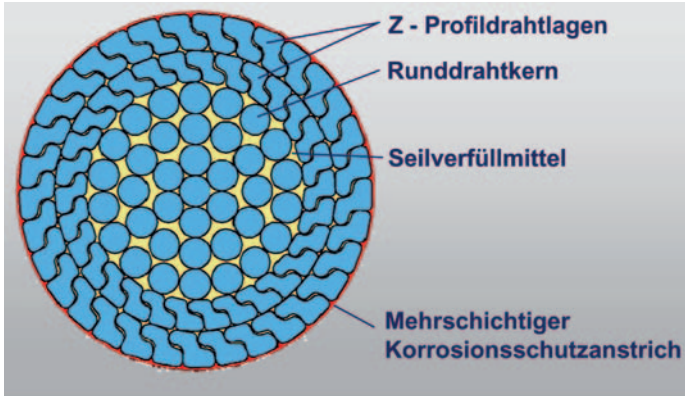


Bild 3.2 Querschnitt vollverschlossene Seile

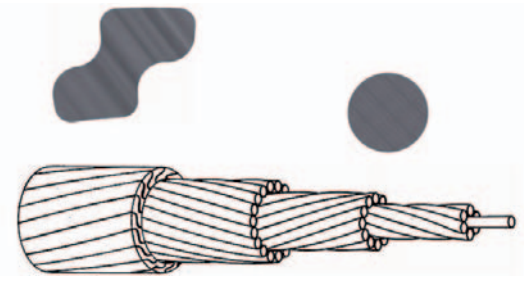


Bild 3.3 Aufbau verschlossener Seile

werden durch Kaltziehen und Anlassen heute Festigkeiten von 1.570 N/mm² erzielt. Der E-Modul des Drahtes bleibt dabei unverändert 21.000 N/cm². Je nach Machart des Seiles tritt ein „Verseilverlust“ (Verringerung der Bruchlast) auf. Als Bemessungsgrundlage dient die rechnerische Bruchlast, die durch Abnahmeversuche am ganzen Seil nachgeprüft wird. Der Elastizitätsmodul des Seiles ist stark abhängig von der Machart. Für verschlossene Seile kann E = 12.000 – 18.000 N/cm² angenommen werden. In den unteren Laststufen „setzt sich“ das Seilgefüge, daher niedriger E-Modul; in den höheren Laststufen unter Verkehrslast steigt der E-Modul bis auf etwa E = 18.000 N/cm² an, Bild 3.4. Im Zweifelsfall wird das Dehnverhalten durch Versuche festgestellt.

Verschlossene Seile enden in Ankerköpfen, deren typische Formen in Bild 3.5 dargestellt sind. Ihr Grundmaterial besitzt eine Zugfestigkeit von 700 N/mm². Grundsatzuntersuchungen zur Festigkeit, auf denen die Dimensionierung basiert, wurden in den 1950ern und 1960ern durchgeführt, [3.4] und [3.5]. Zusätzlich werden heute 3-dimensionale FEM-Berechnungen durchgeführt, um die Ankerköpfe zu optimieren.

Ein Beispiel aus jüngster Zeit für die Verwendung von verschlossenen Seilen für eine Schrägkabelbrücke ist die Rheinbrücke Ilverich, Bild 3.6 [3.6].

3.2.2 Herstellung

Die verschlossenen Seile werden nach EN 10264 [3.7] und EN 12385 [3.8] auf großen Verseilmaschinen hergestellt, Bild 3.7.

Üblich ist die Verwendung von vergossenen Köpfen, Bild 3.8. Die Drähte werden zu „Besen“ aufgeweitet, die in den Seilköpfen bei ca. 425 °C mit Zamak – einer Mischung aus 93 % Zink, 6 % Aluminium und 1 % Kupfer – vergossen werden. Bei dieser gegenüber den früheren Vergussmaterialien geringeren Temperatur wird das Gefüge der Drähte kaum verändert, und die Festigkeit bzw. Dauerfestigkeit der freien Länge wird auch am Kopf erreicht.

3.2.3 Moderne Korrosionsschutzsysteme

3.2.3.1 Allgemeines

Veranlasst durch die in Abschnitt 3.2.5 dargestellten Schäden und auf der Basis von zahlreichen Versuchen wurden in den letzten Jahren Verbesserungen des Korrosionsschutzes von verschlossenen Seilen entwickelt, [3.9].

3.2.3.2 Verzinken der Drähte

Alle Drähte werden mit einer Zinkauflage von 280 g/m² oder 45 µm feuerverzinkt. Die Verzinkung verbessert nicht nur den Korrosionsschutz der Drähte sondern auch die Dauerfestigkeit der Seile, da sie als ein Schmiermittel wirkt, [3.10]. Ein heute gebräuchliches Verzinkungsmittel ist Galfan, [3.1]. Sein Vorteil besteht darin, dass das Aluminiumoxyd, das sich mit der Zeit entwickelt, besser an der Stahloberfläche haftet und eine bessere Basis für die zusätzlichen Beschichtungen bildet als das früher verwendete Zinkoxyd.

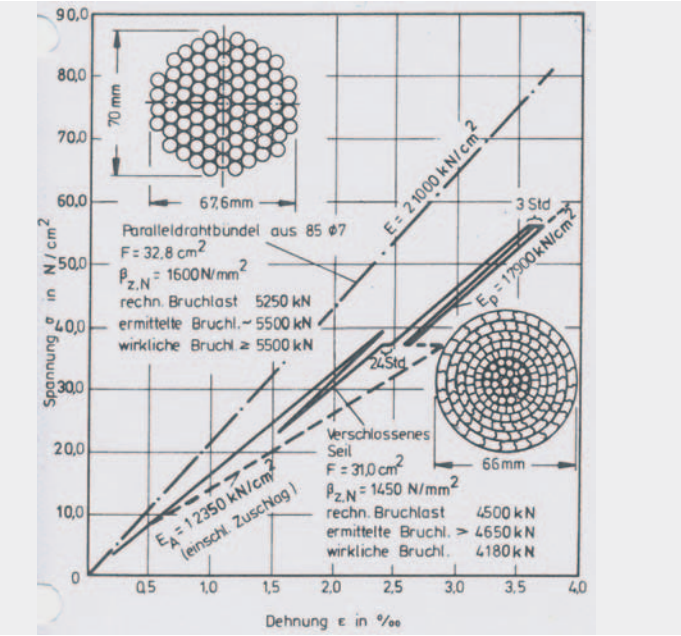


Bild 3.4 Spannungs-Dehnungsdiagramm eines verschlossenen Seiles und eines Paralleldrahtbündels [3.3]

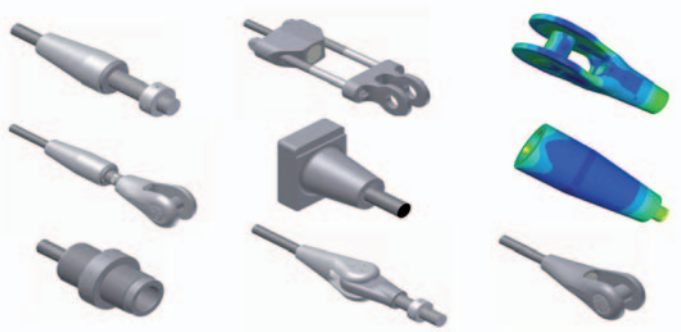


Bild 3.5 Ankerköpfe

Bild 3.6 Rheinbrücke Ilverich

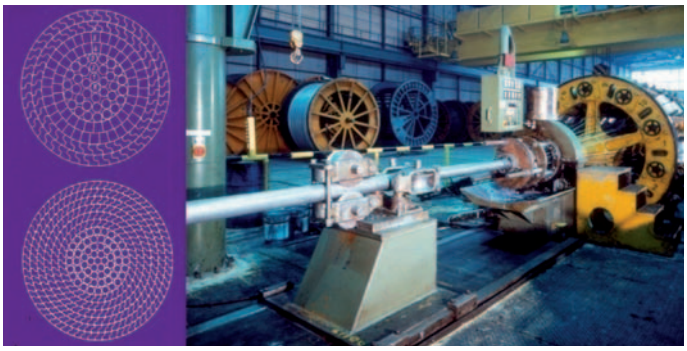


Bild 3.7 Verseilmaschine

3.2.3.3 Verfüllung

Der größte Nachteil der früher verwendeten Bleimennige ist ihre Gefährlichkeit für die Umwelt, die die Erneuerung dieser Art von Korrosionsschutz außerordentlich teuer macht. In Deutschland bestehen moderne Korrosionsschutz-Systeme im Wesentlichen aus einer Verfüllung der inneren Hohlräume mit Polyurethan (PU) mit Zinkstaub oder Aluminiumstaub und Beschichtungen, die beim Verseilen aufgebracht werden.

3.2.3.4 Beschichtung

Nach Montage, Spannen und Aufbringen aller ständigen Lasten erfolgt sorgfältiges Reinigen, Beschichten mit einer Grundbeschichtung, zwei Zwischenbeschichtungen und einer Deckbeschichtung mit einer Gesamtschichtdicke von 410 µm, Bild 3.9. Bei konzentrierten Kabeln müssen die Einzelseile vor dem Spannen gestrichen werden, und die Fugen zwischen den Seilen der äußeren Seillagen werden mit Kitt abgedichtet. Da Zinkchromat als krebserregend angesehen wird, wird die Verwendung von neuen Beschichtungssystemen ohne Aktivpigmente untersucht, die nach dem Barriereprinzip aufgebaut sind, [3.11]. In Großbritannien werden dagegen innere Verfüllungen und Beschichtungen aus Metalcoat gebraucht, einem Phenolformalehydharz mit Aluminiumflocken als Aktivpigment, [3.12].

3.2.4 Überprüfung und Unterhaltung

Neben einer äußeren visuellen Untersuchung im 3-Jahrestakt mit Befahrgeräten oder selbstfahrenden Videokameras, die auf den Kabeln laufen, wird heute im sechs Jahrestakt bei Brückenhauptprüfungen das Innere der Kabel magnetinduktiv untersucht, Bild 3.10. Können die Seile bei vorhandenen Brücken nicht magnetinduktiv und noch nicht einmal visuell geprüft werden – z. B. innerhalb von Verankerungsrohren – sollte versucht werden, sie mit einem Endoskop zu besichtigen und den Befund mit einem Videorecorder festzuhalten. Die intensive Überprüfung ermöglicht es, Schäden frühzeitig zu erkennen und mit relativ geringem Aufwand – i. A. einer Ausbesserung des Anstrichs – zu sanieren.

Bei der magnetinduktiven Untersuchung können Drahtbrücken und deren Lage im Querschnitt festgestellt werden, Bild 3.11.

3.2.5 Schadensfälle

3.2.5.1 Köhlbrandbrücke

Ein exemplarischer Schadensfall der Seile trat an der Köhlbrandbrücke auf [3.9, 3.13]. Wegen der dabei zutage getretenen grundsätzlichen Mängel der alten verschlossenen Seile soll er hier ausführlicher beschrieben werden. Die Köhlbrandbrücke, Bild 3.12, wurde in den Jahren 1969 – 1974 gebaut. Ihre 88 verschlossenen Seile mit ø 54 – 104 mm hatten den folgenden Korrosionsschutz:

- blanke Drähte, weil die Ingenieure zu jener Zeit eine Wasserstoff-Versprödung infolge Verzinkung fürchteten,
- innere Verfüllung mit Bleimennige auf Leinölbasis,

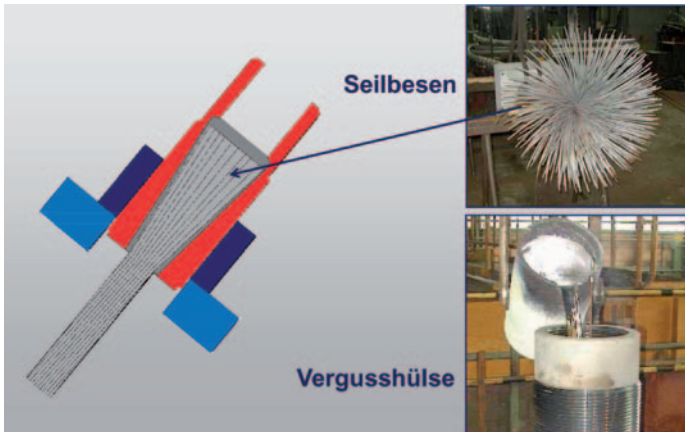


Bild 3.8 Verguss der Köpfe

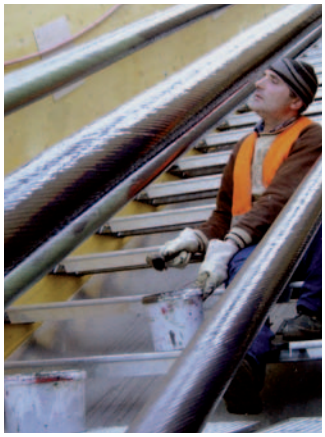


Bild 3.9 Beschichten der Seile

Bild 3.10 Magnetinduktive Untersuchung

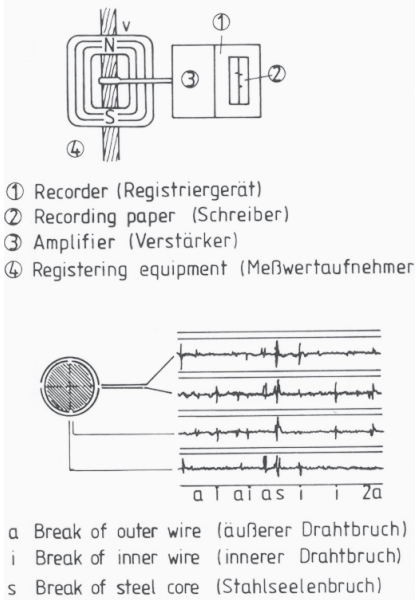
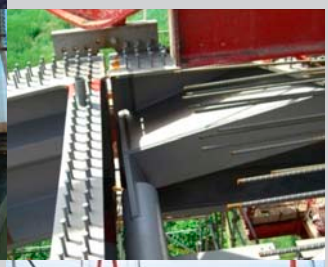


Bild 3.11 Registrierung von Drahtbrüchen

5 Montage von Schrägkabelbrücken



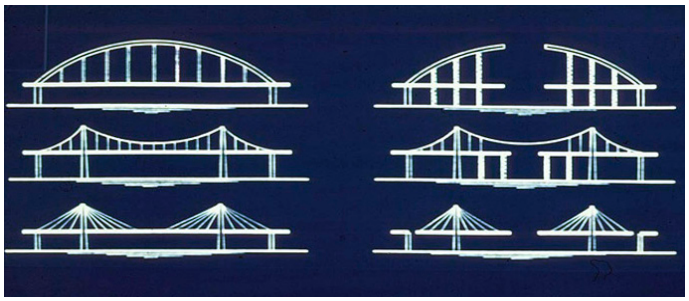


Bild 5.1 Vergleich der Montagesysteme

5.1 Montagebeispiele

5.1.1 Einleitung

Schrägkabelbrücken sind besonders montagefreundlich, da ihre Zwischensysteme beim üblichen Freivorbau in sich stabil sind, Bild 5.1. Früher mussten bei Brücken mit großen Spannweiten oft verwendete Bogenträger über oder unter der Fahrbahn während der Montage im Allgemeinen durch Joche unterstützt werden. Eine Brückenmontage über Joche in der Stromöffnung bedeutet aber Einengung der Fahrrinne, die beim heute stets größer werdenden Verkehrsaufkommen von der Schifffahrt nicht mehr hingenommen wird. Kann die Konstruktion aber nicht auf Jochen montiert werden, so sind aufwendige überspannende Hilfskonstruktionen für den Freivorbau bei Bogenbrücken notwendig. Wenn aber schon eine Überspannungskonstruktion für die Montage notwendig ist, so liegt es nahe, diese Hilfskonstruktion in das endgültige System einzubeziehen. Man kommt damit von selbst zur Schrägseilbrücke, die sich wirtschaftlicher als das Bogentragwerk erwiesen hat.

Kapitel 5 enthält eine systematische Darstellung der Montagemöglichkeiten für Pylonen und Balken in allen Materialien. Die Kabelmontage ist in Abschnitt 3.9 gesondert behandelt.

Bild 5.2 Freivorbau mit Kletterschalung

5.1.2 Pylonmontage

5.1.2.1 Stahlpylonen

Die Strelasundbrücke besitzt Stahlpylonen, die auf Betonpfeilern ruhen, Bild 2.95, [2.65]. Ihre Herstellung wird in Abschnitt 6.3.3 erläutert.

5.1.2.2 Betonpylonen

Betonpylonen werden durchweg in Ortbeton hergestellt. Ein Beispiel ist die Talbrücke über die Obere Argen, vgl. Abschnitt 2.5.2 [2.127]. Gebaut wurden die Pylonen mit Kletterschalungen, Bild 5.2. Diese sind Gleitschalungen vorzuziehen wegen der sichereren Platzierung von Einbauteilen. Zur Aufnahme der Querbiegung aus Neigung der Stiele werden sie gegeneinander abgestützt, Bild 5.3.

Bild 5.3 Pylonabstützungen

5.1.2.3 Verbundpylonen

Verbundpylonen bestehen im Allgemeinen aus einem Betonpylon mit einem im Kabelverankerungsbereich einbetonierten Stahlteil, der die Kabelkräfte aufnimmt und in den Betonteil einleitet. Ein Beispiel dafür ist die Elbebrücke Niederwartha, [2.111]. Der A-förmige Pylon wird im unteren und im mittleren Teil aus Stahlbeton errichtet. Der Pylonkopf erhält zur Vereinfachung der Seilverankerungen, und um die Querschnittsabmessungen zu begrenzen, einen inneren Stahlkasten, Bilder 5.4 und Bild 5.5.

Der Übergang der Schäfte zum Pylonkopf erfolgt in der Höhe 50 m über Gelände. Die Breite des Pylonkopfes beginnt im Übergangsbereich mit 3,5 m und verjüngt sich bis zur Pylonspitze auf 3 m. Der Verbundquerschnitt des Pylonkopfes besteht aus dem 3,3 · 1,9 m großen Stahlhohlkasten und beidseitig angeordneten im Mittel 0,7 m dicken Betongurten. Der Verbund wird über Stahlknaggen und Kopfbolzendübel hergestellt. Im Inneren des Stahlhohlkastens befinden sich die Stahltraversen für die Seilverankerungen, Bild 5.6.

Nach Herstellung der Pylonbeine wird der Stahl-Verankerungsteil mit einem Kran aufgesetzt, Bild 5.7. Danach werden die Stahlköpfe seitlich einbetoniert und damit der Verbund zum übrigen Pylon hergestellt, Bild 5.8.

Bild 5.9 zeigt die seitlichen Schubdübel und die Anschlussbewehrung für die „Betonohren".

5.1.3 Balkenmontage

5.1.3.1 Allgemeines

Eine Schrägseilbrücke besteht aus den Hauptelementen Versteifungsträger, Pylonen und Überspannung. Ihre wirtschaftliche Montage beginnt im Allgemeinen mit der Erstellung der Vorlandöffnung über Joche und der Errichtung des oder der Pylonen.

Die weitere Balkenmontage über die Hauptöffnung erfolgt im Freivorbau, wobei der auskragende Balken mit den Seilen oder Kabeln gegen die bereits montierte Vorlandöffnung abgespannt wird. Der Freivorbau kann fortgeführt werden, solange das Gewicht der überspannten Vorlandöffnung annähernd ausgewogen ist.

In dieser Weise gelangt man zur einhüftigen Schrägseilbrücke, für die der Pylon die Symmetrieachse des Versteifungsträgers darstellt. Ist bei einhüftiger Überspannung diese Symmetrie nicht durch die Stützweitenverhältnisse gegeben, so muss die Vorlandöffnung entweder über Pendelpfeiler abgespannt werden oder durch entsprechendes Gewicht der Vorlandöffnung die statische Ausgewogenheit bezüglich der Pylonachse geschaffen werden. Stellt man sich zu jedem dieser einhüftigen Systeme das gleiche Bauwerk spiegelbildlich vor und schließt beide einhüftigen Systeme in der Mitte biegesteif zusammen, so entsteht eine geschlossene, in der Ansicht symmetrische Brücke mit einer Mittelöffnung, die mindestens der doppelten Länge der überspannten Vorlandbrücke entspricht.

Das so entstandene Haupttragwerkssystem gestattet nun, die bei Strombrücken oder Talübergängen auftretenden großen Stützweiten ohne Zuhilfenahme von Jochen zu überspannen. Dies ist ein entscheidender Grund für wirtschaftliche Montage, da die Jochkonstruktionen bei Strombrücken dem Hochwasser, der Anpralllast von Schiffen sowie dem Eisdruck standhalten und bei Talübergängen entsprechend hoch bzw. standfest ausgebildet werden müssen. Diese schweren Hilfskonstruktionen verteuern in beiden Fällen wesentlich die Montage. Im uneingeschränkten Freivorbau liegt somit der wirtschaftliche Vorteil von Schrägseilbrücken begründet. Aufgabe einer wirtschaftlichen Montageplanung muss es daher sein, die Anzahl der Montageeinheiten und notwendige Hilfskonstruktionen so gering wie möglich zu halten.

Die Konstruktion soll so ausgelegt sein, dass die Bauteile für die fertige Brücke ohne Verstärkung auch zur Montage herangezogen werden können und Hilfsjoche sowie -überspannungen weitgehend überflüssig werden. An dieser Stelle sollte auch die grundsätzliche Entscheidung behandelt werden, ob der Vorbau des Balkens mittels Vorbaugerät oder mit Hilfe von Schwimmkränen erfolgen soll. Schwimmkräne besitzen zwar den Vorteil, dass das Tragwerk nicht

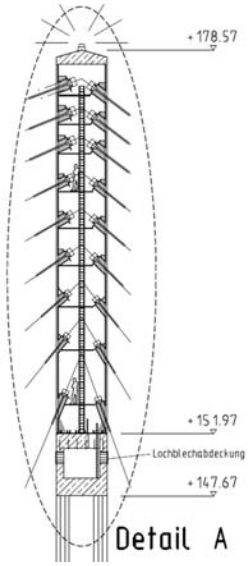


Bild 5.4 Verbundpylonkopf Niederwartha

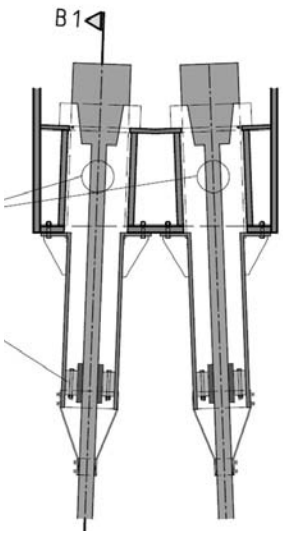


Bild 5.5 Kabelverankerungen

Bild 5.6 Stahlkammern zur Kabelverankerung

Bild 5.7 Einheben der Stahlkammern

Bild 5.8 Eingerüsteter Pylonkopf

Bild 5.9 Bewehrung der Betonseiten an den Stahlkammern

durch schweres Montagegerät belastet wird und gestatten im Allgemeinen das Verlegen schwererer, auf einem Vormontageplatz zusammengebauter Einheiten als ein Vorbaugerät. Andererseits stellt die Arbeit eines Schwimmkranes eine wesentliche Behinderung der Schifffahrt dar. Auch können extreme Wasserstände den Einsatz von Schwimmkränen zumindest zeitweilig unmöglich machen und so den Montageablauf verzögern. Deshalb sollte einem auf dem Brückendeck fahrenden Vorbaugerät der Vorzug gegeben werden. Zu dieser Entscheidung führt auch meistens die Kosten-Kalkulation.

5.1.3.2 Betonbalken

Betonbalken bestehen aus Ortbeton oder Fertigteilen und werden meist im Freivorbau hergestellt, aber auch Einschieben und Eindrehen des Balkens wurde ausgeführt.

Freivorbau

Während des Freivorbaus ist der Balken entweder so kräftig, dass er nur von den endgültigen Kabeln gestützt werden muss, oder es müssen Hilfsabspannungen benutzt werden.

Fertigteile

Betonfertigteile haben den Vorteil der kontrollierten Herstellung, unabhängig von Wetterbedingungen. Nachteilig ist ihr hohes Montagegewicht und die Ausbildung der Fugen.

Die Herstellung von Balkenfertigteilen wird für die Pasco Brücke in Abschnitt 6.1.2 und für die Huntington Brücke in Abschnitt 6.1.3 gezeigt.

Die Montage von Balkenfertigteilen mit Ortbetonfugen wird am Beispiel der Posadas Encarnacion über den Parana in Argentinien erläutert, Bild 5.10 [1.24].

Die Fertigteile wurden auf Pontons zur Baustelle geschwommen. Auf dem Balken befindet sich an jeder Vorbauspitze ein Derrick, der an einen temporären Querträger zwischen den Pylonbeinen zurückgebunden wird, Bilder 5.11 und 5.12. Nach dem Hochziehen werden die neuen Fertigteile im Abstand von 30 m zu den bereits eingebauten Balken fixiert. Die Ortbetonfuge mit überlappender Bewehrung wird dann mit schnell erhärtendem Beton vergossen. Dieses Betonieren fand nachts statt, um den Einfluss ungleichmäßiger Temperatur durch Sonneneinstrahlung zu minimieren.

Die Fertigteile wurden so eingebaut, dass sie entweder im Gleichgewicht waren, oder dass ein Fertigteil in der Hauptöffnung vorauseilte, Bild 5.13. Dadurch brauchte der Pylon nur einseitig zu den Ankerpfeilern abgespannt werden. Der Montagefortschritt betrug 6 – 8 Elemente pro Monat.

Ortbeton mit Abspannung

– mit temporärem Hilfsseil

Die Neckarcenter Brücke ist eine Fußgängerschrägkabelbrücke mit Ortbetonbalken über den Neckar in Mannheim, Bild 5.14, [2.134]. Der Bau des Balkens erfolgte abschnittsweise im Freivorbau, Bild 5.15.