

# Die Innbrücke der Innsbrucker Nordkettenbahn Neu - Entwurf und Ausführung

## THE RIVER CROSSING OF THE NEW FUNICULAR IN INNSBRUCK

K. SCHMID

Die neue Innbrücke für die Hungerburgbahn ist ein außergewöhnliches Bauwerk, das einige besondere technische und gestalterische Lösungen aufweist. Das sind unter anderem die Stützung des Tragwerks über einseitige Pylone und die besondere Art der Fahrbahn.

*The new bridge for the Hungerburg Funicular is an exceptional structure with some special technical and architectural features. These are for instance the way the structure is supported by lateral pylons and the special type of trackway.*

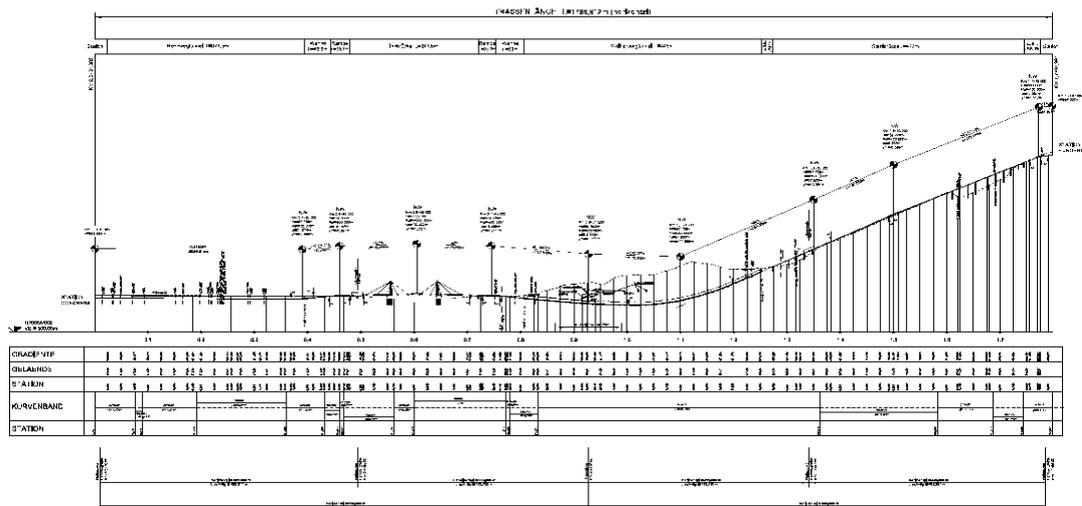
### **1 Einführung**

In Innsbruck wurden in den Jahren 2005 bis 2007 die Bahnen auf die Nordkette komplett erneuert. Die Komponenten sind der Neubau der Standseilbahn vom Stadtkern zur Hungerburg sowie die Erneuerung der Pendelbahnen von der Hungerburg auf die Seegrube und weiter auf das Hafelekar. Während die Modernisierung und Kapazitätserweiterung der Pendelbahnen durch die Bewahrung des architektonisch wertvollen Bestandes geprägt sind, wurden im Bau der Hungerburgbahn neue Techniken in zeitgemäßem Gewand verwirklicht. Eines der auffälligen Objekte der Hungerburgbahn ist die neue Innbrücke, die hier beschrieben werden soll.

### **2 Randbedingungen aus der Streckenführung**

Unmittelbar nach der Station Congress nahe der Stadtmitte führt die Strecke unterirdisch in einem Tunnel unter dem in Richtung Osten führenden Rennweg. In der Folge schwenkt der Rennweg leicht nach Süden, so dass die Bahntrasse angehoben werden kann. Nun verläuft die Strecke parallel zum Innufer. Die Trasse steigt kontinuierlich an um jene Höhe zu gewinnen, die die Überquerung des Inns erlaubt. Der Inn wird in der Lage in einem weiten S-Bogen überquert. Auf der anderen Innseite senkt sich die Trasse

wieder ab, um unter dem Inn-parallel Hohen Weg durchgeführt werden zu können. Während bisher die Längsneigung der Strecke im Talboden 11,2 % nicht überschreitet, steigt sie nunmehr mit maximal 47,0 % an. Der Wechsel in der Neigung erfolgt im bergmännisch vorgetriebenen Weiherburgtunnel. Oberhalb des Nordportals muss die Trasse die topografisch bedingten Unebenheiten überwinden. Dazu wird sie nach einem kurzen Einschnitt auf einer 472 m langen Brücke geführt. Erst kurz vor der Hungerburg schwenkt sie in die Trasse der alten Bahn ein und wird im bestehenden Einschnitt in die Station Hungerburg geführt.



**Bild 1. Streckenführung**

*Fig. 1. vertical alignment*

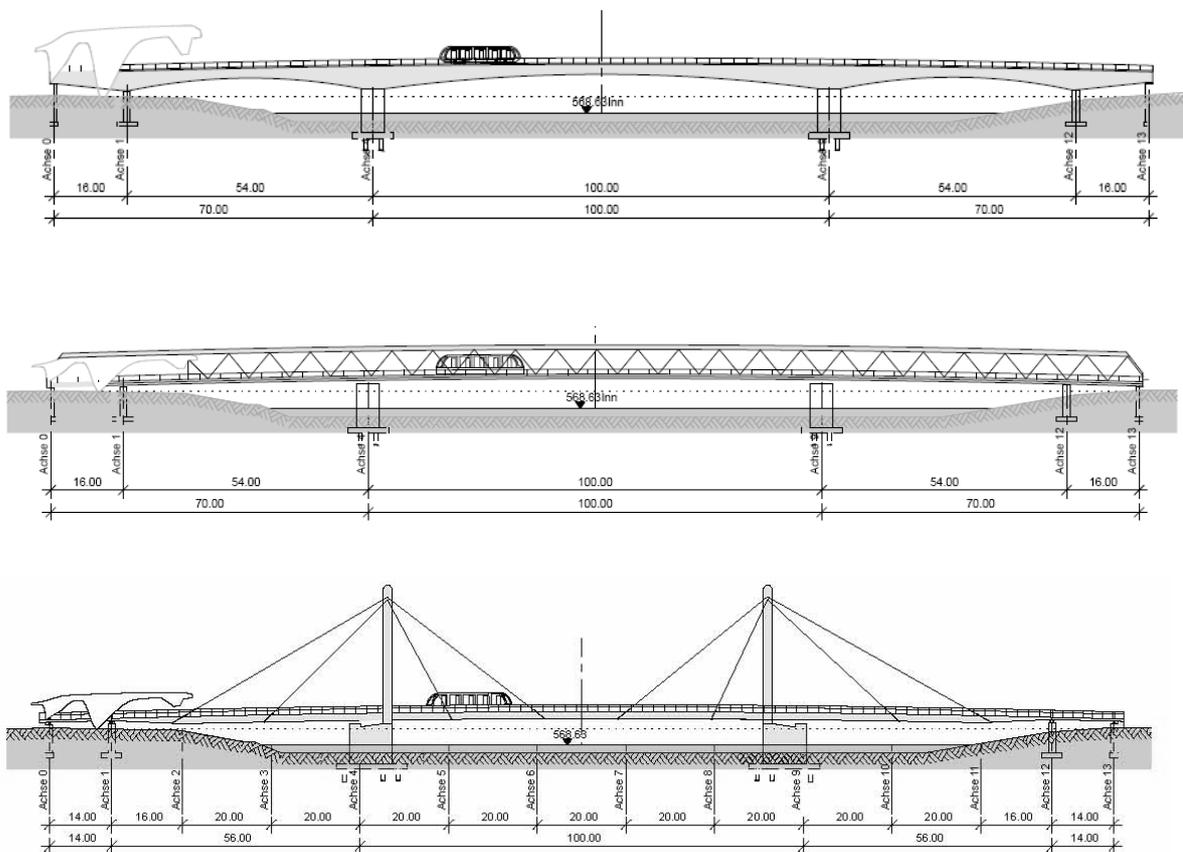
Der Inn, der von der im Folgenden beschriebenen Brücke überspannt wird, wird von der Standseilbahntrasse extrem schleifend gequert. Der Kreuzungswinkel beträgt ca. 23°. Daher ist ein Tragwerk mit 241,6 m Länge erforderlich. In der Lage wechselt ein Linksbogen mit  $R = 200$  m mit einem Rechtsbogen mit  $R_{\min} = 300$  m. Der Richtungswechsel befindet sich etwa in Flussmitte. In der Höhe beschreibt die Trasse im Brückenbereich eine Kuppe mit  $R = 4000$  m.

Für die Wahl des Tragwerkssystems der Innbrücke wurden mehrere Varianten untersucht. Die ursprüngliche Idee war, dass das Tragwerk in seiner Gesamterscheinung möglichst schlank wirken sollte. Die einzelnen Elemente der Brücke sollten zusätzlich unverwechselbar sein.

Die erste Idee war, den Inn stützenlos zu überqueren. Die extreme Spannweite verbunden mit der gekrümmten Trassenführung ermöglicht keine im Grundriss geraden Tragwerke. Außerdem ergaben sich unter dieser Prämisse sehr hohe Tragwerksquerschnitte. Die Alternative, eine Seilbrücke mit Pylonen am Ufer aufzustellen, wurde fallen gelassen, da die Verankerung der Abspannseile geometrisch nicht untergebracht werden konnte. In der Folge wurden Tragwerke mit Flusspfeilern untersucht. Im Inn sind aus wasserbaulichen Gründen maximal 2 Pfeiler im Flussbett erlaubt.

Die Pfeiler müssen so weit vom Ufer abgesetzt sein, dass sich der Abfluss auch bei Niedrigwasser auf drei Abflussquerschnitte aufteilt. Unter diesen Voraussetzungen ergaben sich für die Flussbrücke Stützweiten von 56 + 100 + 56 m.

Die Nutzlast besteht im Wesentlichen aus einem Einzelfahrzeug von einem Gesamtgewicht von 30,5 t und ist damit gering. Doch sind die strengen Durchbiegungsbeschränkungen nach ÖNORM EN 13107 [1] mit  $1/800$  einzuhalten. Aus diesen Bedingungen ergibt sich für eine Balkenbrücke ein verhältnismäßig hoher Querschnitt.

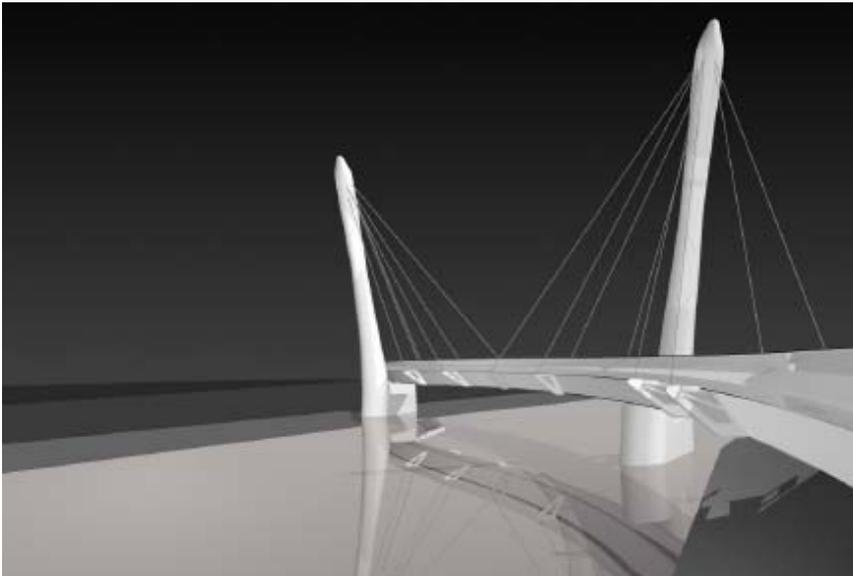


**Bild 2. Brückenvarianten**

*Fig. 2. Design Variants*

Für eine Deckbrücke, die bei der Lage der Fahrbahn größere Freiheiten gestattet hätte, wäre eine erhebliche Anhebung der Trasse erforderlich geworden, die Probleme bei den Rampen mit sich gebracht hätte. Eine Trogbrücke wurde wegen der in der Lage gekrümmten Trassenführung und des optisch schweren Erscheinungsbilds nicht weiterverfolgt. Als Lösung wurde letztendlich eine Schrägseilbrücke gewählt.

Die Idee war anfänglich nur eine einseitige Seilebene einzuführen. Um die Dynamik, die die geschwungene Trassenführung beinhaltet, auch in den Aufhängungen sichtbar zu machen, wurden die Pylone nach außen geneigt.



**Bild 3. Visualisierung des gewählten Entwurfs**

*Fig. 3. visualisation of selected design*

Die Berechnungen zeigten, dass durch die exzentrischen Anschlüsse sehr hohe Torsionsmomente auftreten, die die Anordnung von kräftigen Zuglagern erforderlich gemacht hätten. Daher wurden beidseitige Aufhängungen gewählt. Um den Lichtraum sicherzustellen mussten an den Seilanschlagpunkten auskragende Querträger vorgesehen werden.

Der Überbau stützt sich auf Widerlagern an den beiden Innufeln, Pfeilern nach den Randfeldern und den zwei Flusspfeilern ab. Auf den Flusspfeilern ragen Pylone ca. 30 m nach oben, von denen aus mittels 8 Schrägseilpaaren das Haupttragwerk elastisch gestützt wird. Die Pylone sind auf der Bogenaußenseite der Trasse angeordnet und zusätzlich noch wie erwähnt nach außen geneigt.

### 3. Gestaltung

Im Zuge des PPP Wettbewerbs um die Konzession für die Nordkettenbahnen Neu wurden Zaha Hadid Architects aus London benannt. Hadid ist für ihre außergewöhnliche Formensprache bekannt. Ihr Gestaltungskonzept mit freien Formen setzte sie für die Überdachungen der Stationen ein und entwarf damit die viel bewunderten und mehrfach ausgezeichneten Stationsgebäude der Hungerburgbahn.

Es war der Wunsch der Stadt Innsbruck, dass die sichtbaren Bauten der Hungerburgbahn eine sich wiederholende und wieder erkennbare Formensprache erhalten. Darin sollte auch die Innbrücke einbezogen werden. Die generelle Form der Brücke war vorher vom Tragwerksplaner vorgegeben. Zaha Hadid Architects wurden beauftragt, die Form der Pylone an jene der Stationen anzupassen und bei den Brückendetails gestaltend mitzuwirken. Die Gestaltungsidee der Stationen waren die abgerundeten amorphen Körper, die in einer schwierigen Stahl-Glas-Konstruktion

verwirklicht wurden. Die Übertragung der Idee führte zu charakteristischen runden Ausformung der Pylone, sowie zur gerundeten Form des Überbaus und geschlossenen Geländern. Damit wurde die Brücke voluminöser und skulpturenhafter, gleichzeitig anstatt zurückhaltend in den Vordergrund tretend.



**Bild 4. fertige Brücke**

*Fig. 4. executed bridge*

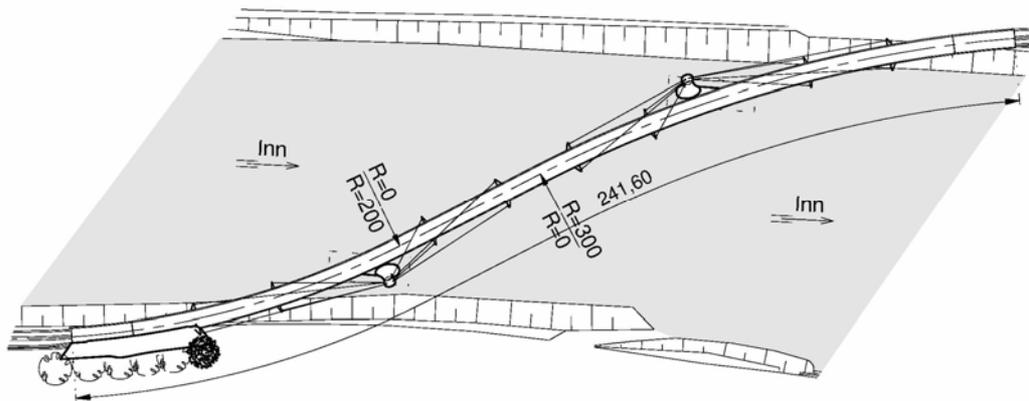
Auf die Herausforderungen, die sich aus den Gestaltungsvorgaben ergaben, wird bei der Beschreibung der Ausführung eingegangen.

## 4. Entwurf

### 4.1. Überbau

Wie zuvor beschrieben ist die Brückenachse durch die Linienführung der Standseilbahn vorgegeben und besteht aus drei geometrischen Teilen: Einem Kreisbogen der Länge 82,20 m mit Radius 200m (Seite Löwenhaus), einer Gerade der Länge 38,38 m und einem Kreisbogen der Länge 119,42 m mit Radius 300m (Seite Hungerburg).

Die Randfelder mit 14 m Spannweite sind Einfeldträger, die zum einen auf den Widerlagern und zum anderen auf Trennpfeilern gelagert sind. Die Hauptbrücke ist ein mit Seilen elastisch gestützter Dreifeldträger mit den Hauptspanweiten 56 + 100 + 56 m. Durch Seilabspannungen wird die Hauptbrücke zusätzlich abgestützt. Die Zwischenaufhängungen an den Seilen teilen die Brücke in Felder von 16 + 9 x 20 + 16 m.



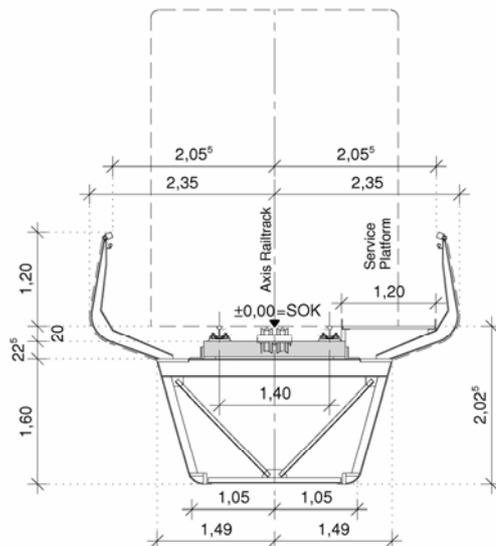
**Bild 5. Brückengrundriss**

*Fig. 5. plan*

Die Fußpunkte der die Seile tragenden Pylone befinden sich durch die einseitige Anordnung in lotrechtem Abstand von 3,5 m zur Brückenachse. Der erste Pylon wird flussabwärts rechts vom Tragwerk angeordnet, der zweite flussaufwärts links vom Tragwerk. Durch die Neigung der Pylone nach außen liegt der Kopfpunkt seitlich neben dem Überbau noch weiter entfernt mit einem senkrechten Abstand von über 7 m zur Brückenachse. Die Höhe des Pylons beträgt 29,6 m. Am Pylonkopf sind die 4 Paare Abspannseile befestigt. Die Seile sind mittels Querträgern am Überbau befestigt, welche aus gestalterischen Gründen auf beiden Seiten gleich weit nach außen ragen. Der Abstand von der Brückenachse beträgt 3,5 m bei einer Fahrbahnbreite von 3,0 m. Die Lage und Neigung der Seile wurde unter der Berücksichtigung des Lichtraumprofils der Standseilbahn optimiert.

Der Brückenquerschnitt wird als Kasten mit geneigten Vollblech-Stege und oben- und untenliegenden Horizontalverbänden ausgebildet. Der trapezförmige Querschnitt ist oben 2,98 m breit, die Stege sind 18° gegen die Vertikale nach innen geneigt. Der Brückenquerschnitt der Hauptbrücke ist konstant 1,60 m hoch. Die Randfelder zu den Trennpfeilern verjüngen sich linear vom letzten Seilanschlagpunkt bis zu den Lagern auf 0,80 m. Die Randfelder sind mit 0,80 m konstanter Höhe schlanker ausgebildet. Grund für die Verjüngung ist die Erhaltung des wasserbaulich notwendigen Freibords. Dort, wo das Freibord das Maß 1,5 m zum HQ100 unterschreitet, wird die Untersicht des Querschnitts geschlossen ausgeführt. Damit soll ein Hängenbleiben von Gehölzern bei Hochwasser verhindert werden.

Die Querschnitte der Stege, Ober- und Untergurte sind dem Schnittgrößenverlauf angepasst. Der Obergurt der Hauptträger besteht aus einem 400 mm breiten Rechteckquerschnitt, der Untergurt wird aus einem geschweißten Kasten gebildet, der es erlaubt den Querschnitt unten, den Gestaltungsanforderungen nachkommend, auszurunden. Die Krümmung der Hauptträger im Grundriss wird in der Praxis aus 10 m langen Einzelteilen polygonal hergestellt.



**Bild 6. Querschnitt**

*Fig. 6. cross section*

Im Abstand von 2 m werden Querträger und Vertikalsteifen angeordnet, welche die Lastenleitung aus dem Fahrweg in den Hauptträgersteg sicherstellen. Die oberen und unteren Horizontalverbände werden als K-Fachwerke ausgeführt.

Das Geländer wird mit einem Gitter gefüllt. Damit soll das Geländer optisch mit dem darunter liegenden Tragwerk verschmelzen und einen gemeinsamen plastischen Körper bilden. Flussaufwärts ist aus ästhetischen Gründen ein gleichartiges Geländer vorgesehen.

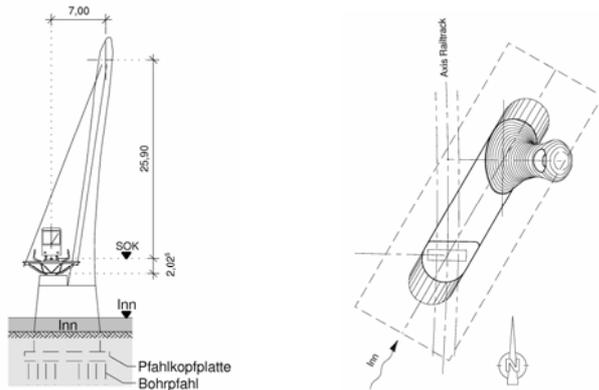
Im Brückengeländer werden Beleuchtungskörper untergebracht. Diese dienen als Sicherheitsbeleuchtung bei Bergungen, erlauben aber gemeinsam mit zusätzlichen Beleuchtungskörpern eine attraktive Ausleuchtung der Brücke in der Nacht.

#### 4.2. Unterbau

Die Gründung der Brücke erfolgt in der im Inntal vorherrschenden Innschotterfazies. Es handelt sich dabei um Kies - Sand - Gemische mit lockerer bis mitteldichter Lagerung. Durch Schrägbohrungen von den Ufern aus wurde der Untergrund mit ausreichender Sicherheit erschlossen. Die Bodenkennwerte waren durch zahlreiche Untersuchungen für vergleichbare Bauvorhaben bekannt.

Trennpfeiler und Brückenwiderlager werden flach gegründet. Als Gründungstiefe wird für die Randpfeiler und die Widerlager eine Mindesttiefe in Höhe der Flusssohle vorgeschrieben. Die aus Überbau und Unterbau auftretenden Kräfte bewegen sich im üblichen Rahmen, so dass keine besonderen Vorkehrungen getroffen werden müssen. Die aus einem massiven Steinwurf bestehende Ufersicherung wird nach Errichtung der Uferbauwerke wiederhergestellt.

Die Fundamentierung der Flusspfeiler mit den Pylonen für die Innbrücke erfolgt in Form einer kombinierten Pfahl-Plattengründung. Die Besonderheit der Flusspfeiler sind die erheblichen aus der Pylonabspannung entstehenden Biegemomente, die auf den Flusspfeiler wirken. Gleichzeitig bewirkt die besondere Geometrie aus Lagerung des Überbaus und Unterstützung der Pylone mit 3,0 m relativ breite und mit maximal 13,65 m relativ lange Flusspfeiler. Der Kreuzungswinkel beträgt nämlich bei Achse 9 nur 23,04 °.



**Bild 7. Flusspfeiler mit Pylon**

*Fig. 7. piers with pylon*

Eine reine Flachgründung wurde wegen der im Inn latenten Gefahr des Auskolkens obwohl statisch möglich nicht gewählt. Als wirtschaftliche Lösung hat sich die Pfahl – Plattengründung herausgestellt. Die Abmessung der Pfahlkopfplatte beträgt 20 x 7 x 1,2 m bei Achse 4 und 21,5 x 7 x 1,2 m bei Achse 9. Es werden je 6 vertikale Bohrpfähle mit 90 cm Durchmesser und 8 m Länge unter der Platte angeordnet, wobei 4 Pfähle unmittelbar unter dem Pylon situiert sind. Die Pfähle nehmen bei gemeinsamer Wirkung von Flächenbettung und Pfahlbettung auf Grund der großen Gründungsfläche nur einen geringen Teil der Kräfte auf. Sie vermindern Verdrehungen, was bei der Höhe der Pylone von 38,6 m über Pfahlkopfplattenoberkante von statischer Bedeutung ist.

Zur Absicherung des hydraulischen Verhaltens wurden am Institut für Wasserbau der Technischen Universität Innsbruck Modellversuche gefahren, bei denen die Auskolkgefahr der Innsohle im Pfeilerbereich untersucht wurde. Nach Auswertung der Versuche wurde die Höhenlage der Fundamentoberkante und der Aufbau der Flusssohle festgelegt. Ergebnis der Versuche war, dass eine Überdeckung der Pfahlkopfplatte mit 2,0 m Geschiebe ausreichend ist. Darüber hinaus hat es sich als günstig gezeigt, dass die Sohle im unmittelbaren Pfeilerbereich mit Flussbausteinen zusätzlich gesichert wird.

Die Flusspfeiler tragen einen ausgerundeten Sockel, auf dem die Lager des Überbaus aufgesetzt werden. Wegen der besonderen Geometrie der Brücke sind Zug – Druck - Lager erforderlich. Aus den Pfeilern wachsen auch die charakteristischen abgerundeten Pylone.

## 5. Herstellung

Zur Herstellung der Flusspfeiler wurden in der Niederwasserperiode im Januar 2006 Halbinseln in den Inn geschüttet. Von den Inseln aus wurden Bohrpfähle abgeteuft. Anschließend wurden Flussbaugruben mittels Spundwänden umschlossen und ausgehoben. Im Schutze der Umschließung wurde die Pfahlkopfplatte und darauf der Pfeilerschaft betoniert.

Die Errichtung der Pylone stellte eine besondere Herausforderung dar. Es war zwingende Vorgabe der Architekten, den Betonkörper ohne Kanten und Ecken wie aus einem Guss erscheinen zu lassen. Man einigte sich darauf, eine vertikale Brettschalung zu verwenden, welche auf Spanten aufgezogen wurde. Die Bretter waren so zu verlegen, dass die Stöße ohne Versatz durchgehend vom Pylonfuß bis zu Spitze durchgehen mussten. Die Pylongeometrie wurde von den Architekten mit einer Software aus dem Automobilbau entwickelt. So waren die Formen aus Nurbs-Kurven gebildet, die erst mühsam in eine eindeutig beschreibbare Näherungsform übertragen werden musste. Letztendlich bestehen die Horizontalschnitte der Pylone aus Korbbögen.



**Bild 8. Pylonschalung**

*Fig. 8. formwork of pylon*

Ein zusätzliches Problem stellte die Neigung der Pylone dar, die eine eigene Stützkonstruktion für die Schalung erforderte.

Die kräftige Bewehrung, die aus Stäben bis Durchmesser 30 mm besteht, folgt der gekrümmten Schalung. Die Bewehrung wurde mit erhöhter Betondeckung eingebaut, um die Schalung möglichst zwangungsfrei schließen zu können. Die Bügel bestehen aus

zwei bis drei Einzelementen, die als Korbbögen ausgebildet werden. Da die Pylongeometrie stark veränderlich ist, müssen die Formen in kurzem Abstand von weniger als 1,0 m laufend angepasst werden.

Bewehrungstechnisch besonders aufwändig ist der Bereich des Pylonauges. Aus gestalterischen Gründen besitzt der Pylon im Bereich der Seilverankerung eine hochgestellte elliptische Öffnung, die nach Innen hin ausgerundet ist. Die Bewehrungsführung in diesem Bereich ist sehr kompliziert. Gleichzeitig treten hier konzentrierte Kräfte auf, die eine sehr konzentrierte Bewehrung erforderlich machen. Die vom Auge ausgehenden Seile müssen genau eingemessen und geometrisch genau ausgerichtet werden. Erschwert wird dies alles durch die vorne beschriebene Lage des Pylonkopfs in großer Höhe.



**Bild 9. Pylonkopf**

*Fig. 9. cable saddle*

Daher wurde in die Pylone ein vorgefertigtes Stahlteil eingebaut. Dieses besteht aus einem Ring, der die innere Form des Auges nachbildet. An ihm sind Gewinderohre angeschweißt, an denen die Seile befestigt werden. Das mit Steifen verstärkte Auge sitzt auf einem Träger auf, der über Kopfbolzen im vorletzten Schuss des betonierten Pylons verankert wird. Die Kräfte aus den Seilen werden über diese Stahlkonstruktion in den Stahlbetonpylon eingeleitet. Das Stahlteil wird nachträglich mit Stahlbeton ummantelt. Die runde Pylonspitze wird, um die gewünschte Form zu erzielen, als Fertigteil aufgesetzt.

Die Montage des Überbaus erfolgte nach einem Sondervorschlag. Der Stahlüberbau wurde in Schüssen bis 13 m angeliefert, an der Baustelle zu Monageeinheiten von bis zu 25 m verbunden und mit den Seilquerträgern ergänzt. Ausgehend von den Flusspfeilern wurden die Abschnitte einseitig an die vorher am Pylonkopf befestigten Schrägseile gehängt. Das Einheben erfolgte mittels Mobilkran. So wuchs der Überbau im Freivorbau.

Die Stoßstellen wurden für die Montage mit Gelenken ausgestattet. Nach dem Zusammenschluss wurde die Brücke lage- und höhenmäßig eingestellt und zum Durchlaufträgersystem verschweißt.



**Bild 10. Montage**

*Fig. 10. Mounting*

Erwähnenswert ist die Fahrbahn auf dem Stahlüberbau. Auf dem Tragwerk wird eine getrennte Fahrbahn aus Stahlbeton montiert. Grund für die unüblich aufwändige Konstruktion ist die Notwendigkeit, die aus dem System Fahrzeug / Schiene und Seil / Umlenkrolle entstehenden Geräuschanregungen zu minimieren. Die Stahlbetonplatte liegt auf PU-Elastomerestreifen auf, die auf die Frequenzen aus dem Fahrzeug abgestimmt sind. Die Horizontalkräfte werden über Knaggen, die ebenfalls schwingungsgedämmt werden, ins Haupttragwerk abgeleitet. Die Schienen sind konventionell mit Höckerplatten auf der Betonplatte befestigt. Die horizontale Verschiebungen betragen maximal + 105 / -105 mm. Die notwendigen Schienenauszüge werden aus konstruktiven Gründen nicht deckungsgleich mit den Brückenden angeordnet.

Die Ausführung der festen Fahrbahn erfolgte aus Stahlbetonfertigteilen. Auch wenn technisch eine Ortbetonplatte vorteilhafter wäre, so stellte die Herstellung der Schalung und das Betonieren über dem Fluss ein großes Problem dar.



**Bild 11. Fahrbahn**

*Fig. 11. Trackway*

Daher wurde Betonfertigteile aufgelegt, die über Vergussfugen zu Durchlaufplatten verbunden wurden. Dies war notwendig um die Einsenkung der Schienen bei Überfahrt zu minimieren. Schwierig war die Herstellung der Fertigteile durch die große Anzahl an Öffnungen für die Seilrollen (und die Schienenverankerung. Nahezu kein Fertigteil gleicht daher dem anderen.

## 6. Zusammenfassung

Die Innbrücke für die Hungerburgbahn ist aus mehreren Gründen einzigartig. Die Zusammenarbeit mit herausfordernden Architekten, die Besonderheiten aus der Trassierung und der Lage in Mitten der Stadt, sowie die Herstellung erforderten neue Lösungen.

Mit der Brücke wurde ein einzigartiges Bauwerk, wenn nicht ein gestalterisches und technisches Wahrzeichen geschaffen.

## 7. Literatur

- [1] ÖNORM EN 13107 Sicherheitsanforderungen für Seilbahnen für den Personenverkehr – Bauwerke
- [2] Schmid, K.: The New Bridge for the Hungerburg-Funicular-Railway – On the Way to the Top, in: Bridges. Proceedings of the International Conference on Bridges, SECON HDGK, Dubrovnik, 2006