

# Verringerung der Montagerisiken durch baubegleitende Messungen am spanischen EXPO-Pavillon

Die Konstruktion des spanischen Pavillons für die Expo 2000 erforderte eine sorgfältige Planung, bei der das komplizierte Zusammenspiel zwischen Geometrie, Funktion, Tragwerkskonzept und Materialwahl eine dominierende Rolle spielte. Die Randbedingung, eine wiederverwendbare Struktur zu planen und auszuführen, legte es nahe, von der Vorfertigung intensiven Gebrauch zu machen. Aufbauend auf einem kongruenten Tragwerkskonzept, bei dem alle Elemente zur Gesamtstabilität beitragen, entstand eine gänzlich vorgefertigte, ab- und wiederaufbaubare Struktur von großer Robustheit.

Durch detaillierte statische Berechnungen wurde die Empfindlichkeit des Strukturverhaltens gegenüber Änderungen verschiedener Parameter, insbesondere während des Vorspannvorgangs, untersucht. Die Auswirkungen dieser Einflußparameter wurden mit Verformungsmessungen am Bauwerk überprüft, um die Verformungen in vertretbaren Grenzen zu halten.

**Reduction of risks during assembly risks with on-line measurements at the Spanish EXPO-pavilion.** *The construction of the Spanish pavilion for the Expo 2000 required very careful planning, bearing in mind the complex interactions between the geometry, functionality, structural concept and construction materials used. The need for the structure to be dismantlable advised the extensive use of prefabrication techniques. Using a coherent structural concept, in which all the elements contribute to the overall stability of the system, a completely prefabricated and dismantlable structure of great robustness has been achieved.*

*A detailed structural analysis allowed the sensitivity of the structural behaviour towards different parameters to be identified, particularly during the application of the prestressing forces. Finally, the structure was monitored with a view to keeping these parameters within allowable limits.*

## 1 Einführung

Die spanische Teilnahme an der Expo 2000 in Hannover ist durch die Absicht geprägt, zu überraschen und die iberische Nation positiv darzustellen. Dies soll insbesondere auch durch den Pavillon erreicht werden. Der Entwurf ist aus einem von der „Sociedad Estatal Hannover 2000“ ausgeschriebenen Wettbewerb hervorgegangen, der von den Architekten *Cruz* und *Ortiz* gewonnen wurde.

Der Pavillon wird von den Besuchern von außen als prismatischer, mit wenigen Einschnitten versehener Körper empfunden, der mit Korkplatten verkleidet ist und auf vielen Stützen aufliegt (Bild 1a). Jede der Öffnungen zwischen den Stützen (Bild 1b) stellt einen Eingang zu einem großzügigen inneren Platz dar (Bild 1c). Dieser Platz ist mit einem Tragwerk überdacht, das dem Besucher den Eindruck vermittelt, im Innern eines Pyramidenstumpfes zu stehen. Das Tragwerk dient gleichzeitig als Tragstruktur

für den darüberliegenden Ausstellungsbereich mit Gehwegen sowie für die Überdachung des Pavillons (Bild 2). Der Pyramidenstumpf enthält ein Oberlicht für die natürliche Belichtung des inneren Platzes.

Beim Entwurf des Tragwerkes mußten – außer der geometrischen Umsetzung der beschriebenen architektonischen und funktionellen Anforderungen – weitere Randbedingungen durch die Tragwerksplaner (Cesma Ingenieros, Madrid) berücksichtigt werden. Die deutschen Behörden forderten zum einen den Abbau des gesamten Gebäudes nach der Ausstellung. Zum anderen hatte der Bauherr den Wunsch, den Pavillon wiederzuverwenden. Auch das Motto der Ausstellung, „Mensch, Natur, Technik“, lädt zu einer gesamtheitlichen Betrachtungsweise im Sinne einer Wiederverwendung der Trag-elemente ein.

Diese Randbedingungen haben sowohl die Materialwahl als auch das Tragwerkskonzept, die Durchbildung von Konstruktionsdetails und die Wahl der Herstellungs- und Montagethoden entscheidend beeinflusst und bildeten den Ansporn für einen innovativen Tragwerksentwurf. Die Realisierung dieses anspruchsvollen Tragwerkes stellte an alle Beteiligten hohe Anforderungen und beinhaltete Risiken, welche durch baubegleitende Messungen minimiert wurden.

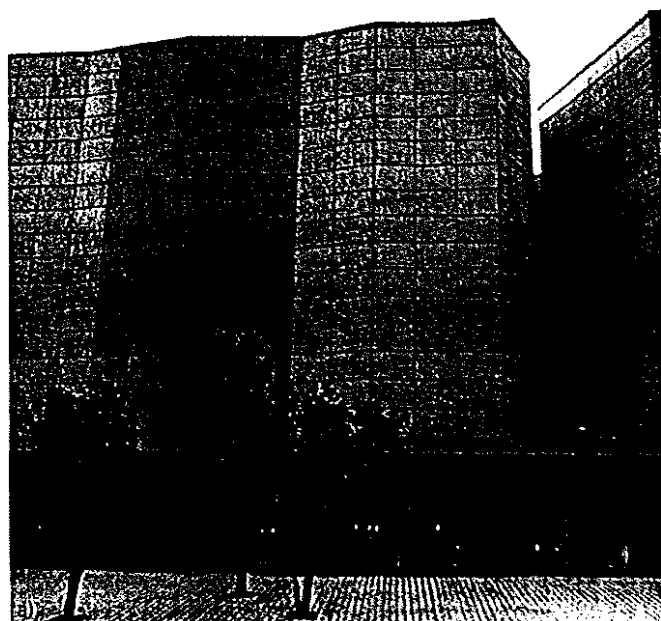


Bild 1. a) Außenansicht des Pavillons  
Fig. 1. a) Outside view of the pavilion

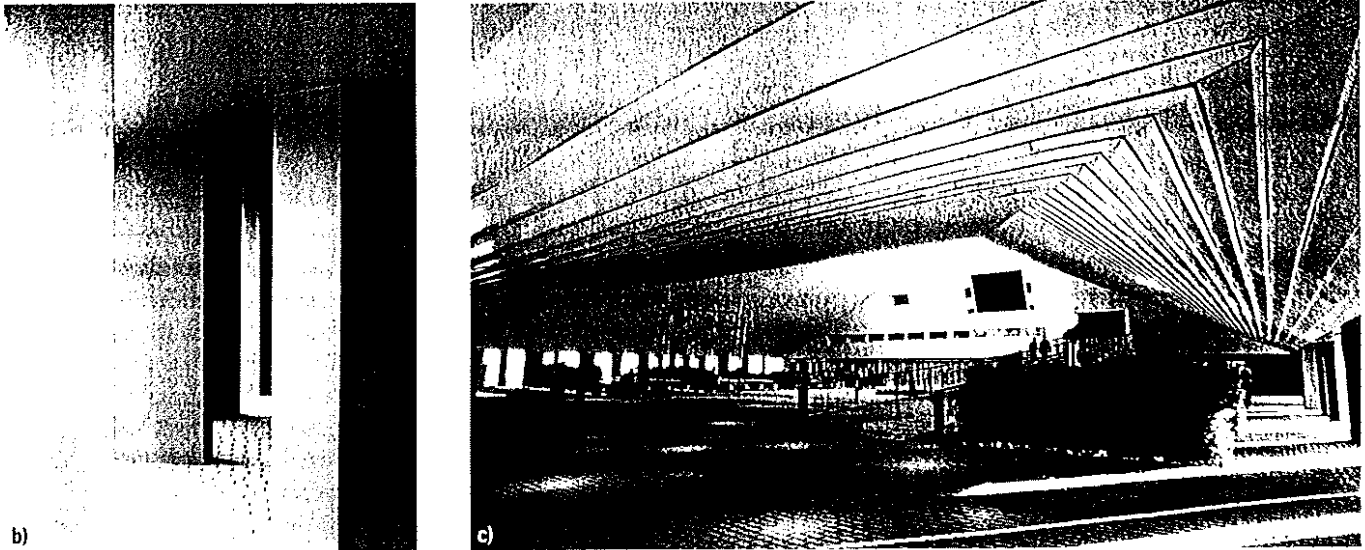


Bild 1. b) Öffnungen zwischen den Stützen, c) Innerer Platz  
 Fig. 1. b) Entrances between the pillars, c) Interior square

## 2 Tragwerkskonzept

Das räumliche Tragwerk des spanischen Pavillons kann in zwei Abschnitte unterteilt werden: den konstruktiv eher konventionellen Dienstleistungsabschnitt und den konstruktiv aufwendigen Ausstellungsabschnitt (Bild 2a). Trotz dieser scheinbar klaren Trennung können die beiden Bauabschnitte nicht gesondert betrachtet werden, da ihr Zusammenwirken zur Sicherstellung der Gesamtstabilität des Tragwerkes notwendig ist.

Das Haupttragelement des Ausstellungstraktes ist ein Pyramidenstumpf mit geneigten Ebenen auf drei Seiten, einem Ober- und einem Untergurt. Die Funktion der vierten geneigten Ebene wird vom Tragwerk des Dienstleistungsgebäudes übernommen, wozu dies mit dem Ausstellungsstrakt kraftschlüssig verbunden ist (Bilder 2a und 4b). Der Pyramidenstumpf weist dadurch in Gebäudequerrichtung einen symmetrischen und in Längsrichtung einen antimetrischen Schnitt auf (Bilder 2b und 2c).

Die schrägen Ebenen des Pyramidenstumpfes bestehen aus Stahlhohlkastenprofilen mit dazwischenliegenden Brettschichtholzplatten (Bild 3). Der Obergurt ist aus Stahl-Vierendeelträgern aufgebaut, während der Untergurt als trapezförmiger Stahlhohlkastenträger konzipiert ist. Dieser horizontale Untergurt liegt auf den um den inneren Platz herum angeordneten Stahlstützen auf, die direkt auf dem Baugrund abgestellt sind.

Da die Vertikallasten im Ausstellungsstrakt auf die geneigten Flächen einwirken, werden diese außer durch Druckkräfte, zusätzlich durch Biegemomente und Querkkräfte beansprucht. Die Druckkräfte verursachen ihrerseits Biegemomente und Druckkräfte im Obergurt sowie Biegemomente und Zugkräfte im Untergurt. Die Steilheitsverhältnisse in dieser räumlichen Struktur führen dazu, daß die Lasten vorwiegend in Gebäudequerrichtung abgetragen werden. Aus geometrischen Gründen ist die statische Breite des Untergurts an der Stelle relativ klein ( $L_1/18,5$ ), wo die zu übertragenden Druckkräfte groß sind, und relativ groß ( $L_1/10,5$ ), wo die Kräfte klein sind (Bild 2a).

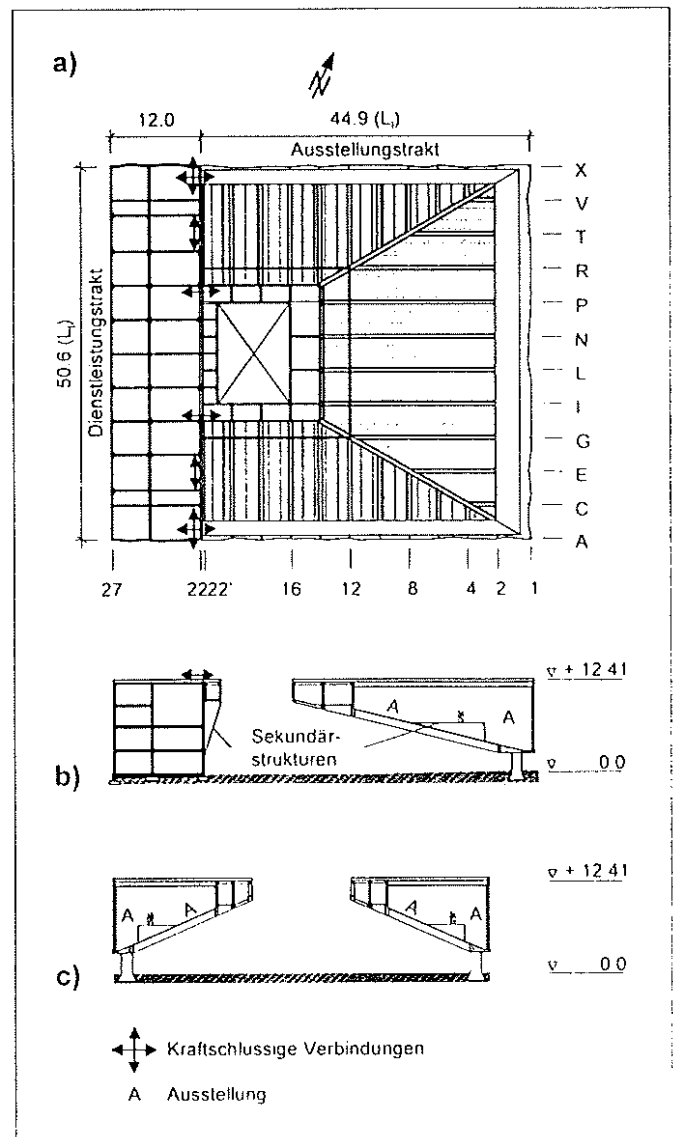


Bild 2. a) Grundriß der Haupttragstruktur, b) Längsschnitt, c) Querschnitt  
 Fig. 2. Plan view of the main structure, b) Longitudinal section, c) Transverse section

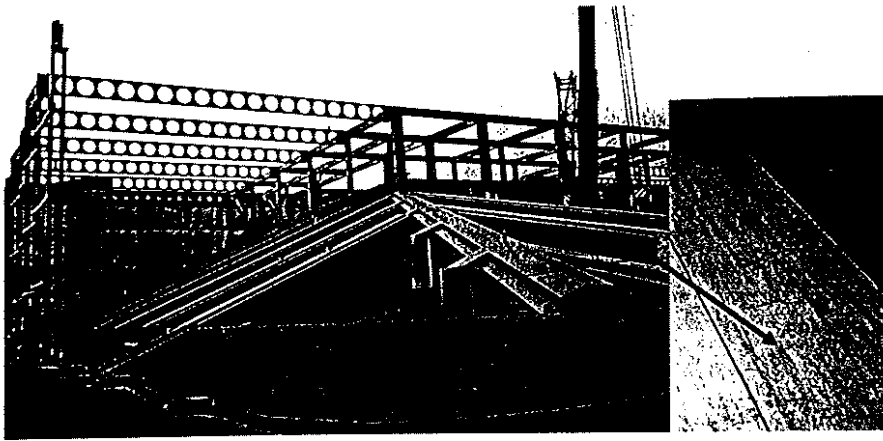


Bild 3. Bauteile des Ausstellungsabschnittes  
Fig. 3. Structural elements of the exposition building

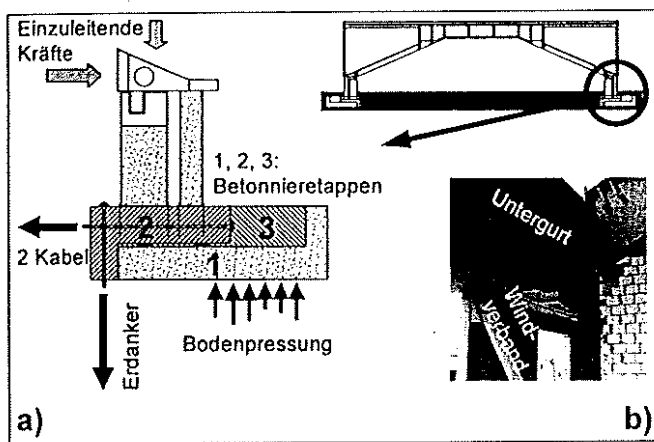


Bild 4. a) Horizontales Zwischenaufleger des Untergurtes,  
b) Endaufleger des Untergurtes, durch den Windverband des Dienstleistungsgebäudes gebildet

Fig. 4. a) Intermediate horizontal support for the lower chord,  
b) Lateral support for the lower chord, constituted by the bracing system of the service building

Um die Schnittkräfte und Verformungen in den zu den Gebäudelängsachsen parallelen Untergurtabschnitten zu reduzieren, sind in den Achsen 8 und 16 horizontale Zwischenaufleger eingeführt. Jedes dieser Auflager wird durch zwei Verbundstützen gebildet, die mit einem mitwirkenden Teil des Untergurtes und dem Stützenfundament einen Rahmen bilden (Bild 4a). Um die Horizontalkomponente der einzuleitenden Auflagerkraft ins Gleichgewicht zu bringen, sind die in Achsen 8 und 16 einander gegenüberliegenden Fundamente mit je einem Zugband verbunden (zwei Spannkabel pro Achse mit je 19 Litzen  $A_s = 140 \text{ mm}^2$ ).

Die Konstruktion der Fundamente in den Achsen 8 und 16, deren Kippsicherheit durch Erdanker gewährleistet ist, wird durch den Bauablauf bestimmt. Während des Vorspannvorgangs muß sich der obere Fundamentteil auf dem unteren, starr im Baugrund verankerten Fundamentteil, horizontal verschieben können. In der Fuge zwischen den Fundamentteilen sind deswegen Neoprenlager angeordnet. Um das endgültige, monolithische Fundament herzustellen, ist diese Fuge nach dem Vorspannen mit Beton verfüllt worden.

### 3 Geplanter Bauablauf

Der Obergurt des Pyramidenstumpfes stützt sich während der Montage auf einer Hilfskonstruktion ab. Nach Beendigung der Montage sind die Vorspannkräfte in den Spanngliedern der Achsen 16 und 8 aufgebracht worden. Dies führte zu einer Entlastung der Hilfskonstruktion und schließlich zu einer Überhöhung der Stahlstruktur des Ausstellungstraktes.

Die Vorspannkräfte sind so festgelegt, daß die Verformungen infolge Eigengewichts der Tragstruktur sowie eines Teils der restlichen ständigen Lasten kompensiert werden (ursprünglich war vorgesehen, 100 % der ständigen Lasten zu kompensieren; infolge der in Abschnitt 4.1 beschriebenen Änderung der Fundamente und des sich daraus ergebenden Robustheitsverlustes wurde dieser Anteil jedoch verringert).

Die so bestimmten Vorspannkräfte wurden stufenweise aufgebracht, und zwar zunächst in Achse 16, wo die Spannglieder in fünf Stufen vorgespannt wurden, bis die gewünschten Verformungen erreicht waren. Dies entspricht einer nominellen Vorspannkraft von 1385 kN. Der Vorspannvorgang wurde anschließend in Achse 8 fortgesetzt, wobei die nominelle Vorspannkraft 930 kN betrug.

### 4 Ausführung

#### 4.1 Änderung der Fundamentkonstruktion in der Planungsphase

Die gemäß deutschen Bestimmungen für die Anwendung von Erdankern erforderlichen, zusätzlichen geotechnischen Versuche hätten den Baubeginn der Fundamente hinausgezögert. Da der Bauherr dies unbedingt verhindern wollte, wurde auf den Einsatz von Erdankern verzichtet. Um die Stabilität der Fundamente in den Achsen 8 und 16 trotzdem zu gewährleisten, mußten diese erheblich vergrößert werden. Aufgrund der Grundstücksgröße war eine Fundamentvergrößerung über die Pavillonaußenseite jedoch nur bedingt möglich. Schließlich mußten die Volumina der Fundamente im Vergleich zur ursprünglich geplanten Lösung (Abschn. 2 und 3) verdreifacht werden.

#### 4.2 Berechnungen zum Montagevorgang

Während der Montage der Struktur änderte sich das statische System ständig. Jedes dieser Systeme mußte auf seine Tragfähigkeit, insbesondere auf seine Stabilität hin überprüft werden. Die Wahl der Montagerihenfolge hatte aber auch einen Einfluß auf die in den Hilfsabstützungen einzuleitenden Kräfte und somit auf den Vorspannvorgang.

Die Schnittkräfte und Verformungen, vor allem diejenigen infolge der aufzubringenden Vorspannkräfte, sind außer von den Montagezuständen von weiteren Parametern abhängig: die Steifigkeit der Schraubenverbindungen, die Interaktion zwischen den beiden Gebäudeteilen, die Steifigkeit der Neoprenlager, etc. Detaillierte statische

Berechnungen erlaubten es, die Empfindlichkeit des Systems gegenüber Änderungen dieser Parameter abzuschätzen und einzugrenzen. Die so ermittelten Grenzwerte stellten die Grundlage für eine effiziente Kontrolle der Bauausführung durch Bauwerksmessungen dar.

#### 4.3 Kontrollplan

Um den in Abschnitt 4.2 beschriebenen Ungewissheiten entgegenzuwirken, sollten Tragwerksmontage und Spannvorgang mit Messungen begleitet werden. Im Brückenbau werden baubegleitende Messungen z. T. bereits ausgeführt [1]. Die Messungen sollten hier zum einen dazu beitragen, die Sollgeometrie des Tragwerkes zu erreichen. Zum anderen sollte kontrolliert werden, ob die verwendeten numerischen Rechenmodelle das Verhalten der Struktur angemessen widerspiegeln. Noch wichtiger war die in Abschnitt 4.1 beschriebene Änderung der Fundamente der Achsen 8 und 16, weil dadurch die strukturelle Robustheit der Konstruktion im Sinne der Anforderungen von [2] abgemindert wurde. Ein Überspannen der Spannkabel hätte zu einem Abheben der verschieblichen oberen Fundamente von den Neoprenlagern und im Extremfall sogar zu einem Stabilitätsverlust führen können. Insgesamt sollte der Empfindlichkeit des Tragsystems mit baubegleitenden Messungen entgegengewirkt werden.

Folgende Größen wurden deswegen während des Spannvorgangs gemessen:

- Vorspannkraft
- horizontale Verschiebung der oberen, beweglichen Teile der Fundamente in den Achsen 8 und 16
- vertikale Verschiebung der gegen die Gebäudeinnenseite gerichteten Unterkante des oberen, beweglichen Teils der Fundamente in den Achsen 8 und 16. Diese Werte waren im Hinblick auf die angestrebte Verminderung des Risikos eines Stabilitätsverlustes besonders wichtig
- vertikale Verformung des Obergurtes des Pyramidenstumpfes in den Punkten 16/I und 16/P
- Stahldehnungen an 29 Stellen, an den Stützen in den Achsen 8 und 16 (Stützenkopf- und Stützenfußquerschnitte) sowie an verschiedenen Querschnitten des Untergurtes.

#### 4.4 Akzeptanzkriterien und Maßnahmenplanung

Am Ende jeder der zuvor festgelegten Vorspannlaststufen wurden die gemessenen Werte mit den berechneten verglichen. Die maximal zulässige Abweichung von den gemäß Abschnitt 4.2 rechnerisch ermittelten Grenzwerten wurde mit 15 % festgelegt. Bei einer etwaigen Überschreitung eines Grenzwertes war folgendes Vorgehen vorgesehen:

- Unterbrechung der Vorspannarbeiten
- Kontrolle der Meßinstrumente und ggf. Durchführung unabhängiger Messungen
- Kontrolle und, falls notwendig, Anpassung der Rechenmodelle
- Überprüfung der korrekten Funktionsweise der Strukturelemente (z. B. Bewegungsfreiheit der beweglichen Fundamente).

Erst nach dem Auffinden einer eindeutigen Erklärung der beobachteten Differenzen hätten die Vorspannarbeiten fortgesetzt werden dürfen.

## 5 Messungen

### 5.1 Durchführung der Messungen

Die Dehnungs- und Verschiebungsmessungen wurden während der jeweiligen Laststufen des Vorspannvorgangs der Spannglieder vorgenommen. Die Relativverschiebung der beweglichen Fundamente gegenüber den darunterliegenden unverschieblichen Fundamentteilen wurde mit mechanischen Meßuhren aufgenommen (Bild 5). Die Hebungsmessung des Obergurtes des Pyramidenstumpfes erfolgte ebenfalls mit mechanischen Meßuhren, die mit

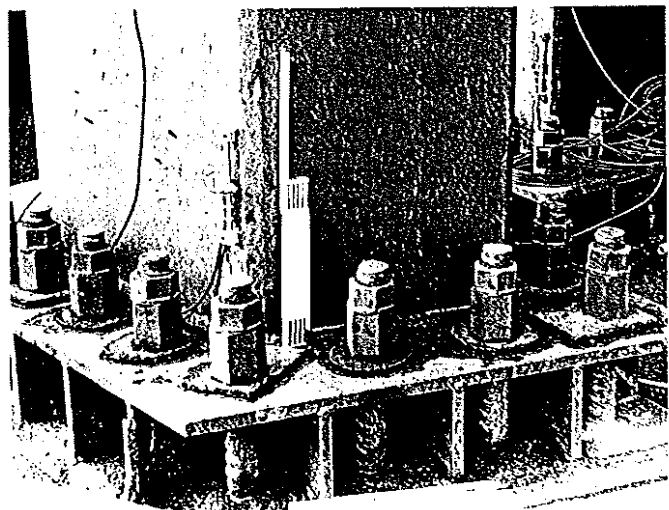
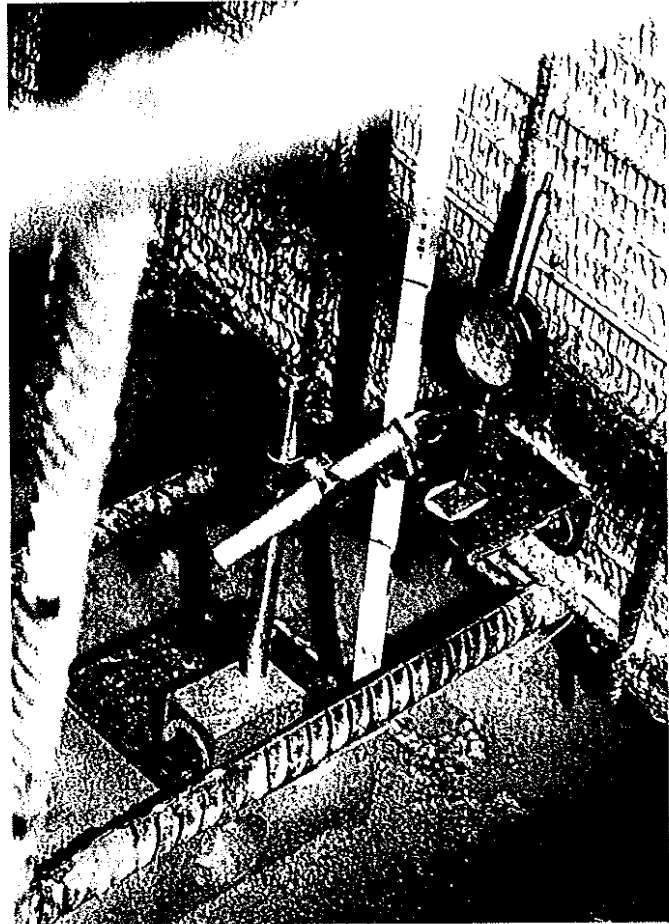


Bild 5. Applizierte Meßuhren (oberes Bild) und Schwingsaitenaufnehmer (unteres Bild)

Fig. 5. Installed dial gauge (top) and vibrating wire strain gauges (bottom)

Verlängerungen aus Invardraht versehen waren, so daß die Verschiebungen unabhängig von der Entlastungsdehnung der Hilfsstützen, zwischen der Unterkante der Stahlträger und dem Baugrund, gemessen werden konnten.

Für die Dehnungsmessung an der Stahlkonstruktion wurden Schwingsaitenaufnehmer (SSA) verwendet (Bild 5). Die damit gemessenen Dehnungen wurden unter Einbezug des Elastizitätsmoduls von Stahl in Spannungen umgerechnet. Das Prinzip der Längenmessung mit Schwingsaitenaufnehmern beruht auf der elektromagnetischen Anregung und anschließenden Messung der Resonanzfrequenz einer Stahlsaite mit definierter Ausgangslänge. Zur Temperaturkompensation waren Temperaturfühler in den SSA integriert.

Das Meßsignal der SSA ist aufgrund des Meßprinzips witterungs- und feuchteunabhängig. Dies war für die Wahl des Meßsystems ausschlaggebend, weil zum Zeitpunkt der Vorspannarbeiten im Winter in Hannover mit einer hohen Niederschlagswahrscheinlichkeit zu rechnen war. Heftige Regenschauer während der Messungen haben die Wahl der SSA schließlich gerechtfertigt.

## 5.2 Ergebnisse der Messungen und Vergleich mit Rechenwerten

In Bild 6 sind die gemessenen und die durch Rechnung bestimmten Horizontalverschiebungen eines der beweglichen Fundamente in Achse 16 exemplarisch dargestellt. Außerdem sind die zuvor bestimmten Toleranzbereiche für die Verschiebungen eingezeichnet.

Die Übereinstimmung zwischen den gemessenen und berechneten Werten war bereits in der ersten Vorspannetappe (in Achse 16) gegeben, s. Bild 6. Die Vorspannarbeiten konnten deswegen entsprechend den festgelegten Laststufen fortgesetzt werden und mußten außerplanmäßig nicht unterbrochen werden. Weil das Rechenmodell durch die Messungen bestätigt wurde, wurde der Spannvorgang beschleunigt, indem die Spannkabel in Achse 8 in nur zwei Stufen vorgespannt wurden.

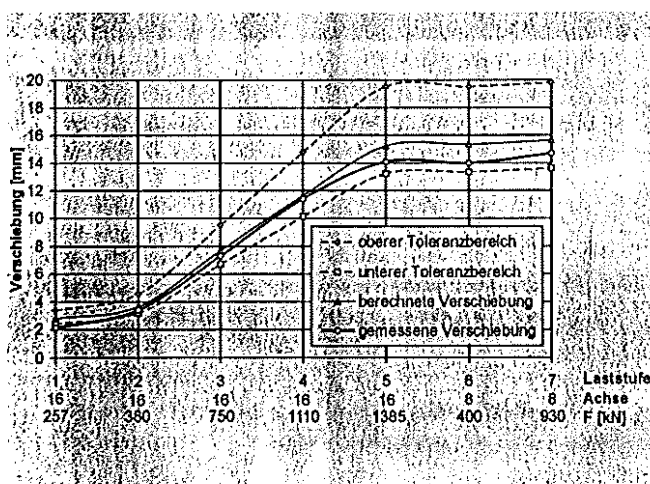


Bild 6. Horizontalverschiebung des beweglichen Fundamentes in Achse 16, Nordseite des Pavillons infolge Vorspannung  
 Fig. 6. Horizontal movement of the mobile part of the foundation at axis 16, north side of the pavilion

## Am Bau Beteiligte:

Bauherr:

Sociedad Estatal Hanover 2000, c/ Eduardo Dato 19-1º dcha, 28010 Madrid, Spanien

Architekten:

Cruz y Ortiz Arquitectos, c/ Santas Patronas 36, 41001 Sevilla, Spanien

Tragwerksplanung und technische Beratung während der Ausführung:

Cesma Ingenieros, Avda. Cardenal Herrera Oria 167 bajo, 28034 Madrid, Spanien

Prüfingenieur:

Ingenieurbüro Peter Kelemen, Quellenstraße 2, 38239 Salzgitter, Deutschland

Meßtechnik:

IBMB – TU Braunschweig, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig, Deutschland

Generalunternehmer:

UTE OHL – Hochtief (Joint Venture), c/ Gobelás 35–37, 28023 Madrid, Spanien

Stahlbau:

Gebrüder Cornils GmbH, Am Umspannwerk 2, 29303 Bergen, Deutschland

Vorspanntechnik:

Dywidag Systems International GmbH, Niederlassung Hannover, Hoher Holzweg 15, 30966 Hannover, Deutschland

Vorgefertigte Betonelemente:

Pacadar, c/ Hermosilla 57, 28001 Madrid, Spanien

Holzleimbau:

Grossmann Bau GmbH & Co, Äußere Münchener Straße 20, 83026 Rosenheim, Deutschland

## Literatur

- [1] Gómez, M., Lebet, J. P., Beylouné, R.: Launching of the Vaux viaduct. Structural Engineering International, IABSE, Zürich, n° 1, 2000, pp. 16–18.
- [2] prEN 1990 (Draft). Eurocode: Basis of design. Comité Européen de Normalisation, Bruxelles, February 2000.

## Autoren dieses Beitrages:

Dipl.-Ing. ETH/SIA Peter Tanner, Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja, Serrano Galvache, 28033 Madrid, und Cesma Ingenieros, Avda. Cardenal Herrera Oria 167 bajo, 28034 Madrid, Spanien; Dipl.-Ing. Juan Luis Bellod, Dipl.-Ing. Mónica Sanz, Cesma Ingenieros; Dr.-Ing. Alex-W. Gutsch, Dipl.-Ing. Thomas Barthel, Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz, TU Braunschweig, Beethovenstraße 52, 38106 Braunschweig, Deutschland