

Die Verankerungen der Haupttragseile für die Olympia-Zeltdachkonstruktion in München

Autor(en): **Zenobi, G.**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizerische Bauzeitung**

Band (Jahr): **90 (1972)**

Heft 35

PDF erstellt am: **08.08.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-85297>

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.

Die Verankerungen der Haupttragseile für die Olympia-Zeltdachkonstruktion in München

DK 624.071.2.002.73

Von G. Zenobi, Zürich

Das für die Verankerung der Haupttragseile der Olympia-Zeltdachkonstruktion in München erstmals im grossen Massstab angewandte Hi-Am(High-Amplitude)-Verfahren für Parallellitzenbündel wird bezüglich Aufbau, Wirkungsweise und Ausführung beschrieben.

Aufgrund der gewonnenen Erfahrungen kann damit gerechnet werden, dass dieses Verankerungssystem dank technischer und wirtschaftlicher Vorteile gegenüber herkömmlichen Lösungen in Zukunft vermehrt für weitgespannte Hängekonstruktionen im Brücken- und Hochbau eingesetzt werden wird. Für die bereits bekannten Projekte sind Paralleldrahtbündel infolge ihrer überlegenen Dehnfestigkeit gegenüber Litzenbündeln vorgesehen. In Bauwerken mit permanentem Charakter ist ein dauerhafter Korrosionsschutz von Paralleldrahtbündeln von grosser Bedeutung. Dafür sind erprobte und wirtschaftliche Lösungen aus der Technik des Spannbetons bekannt.

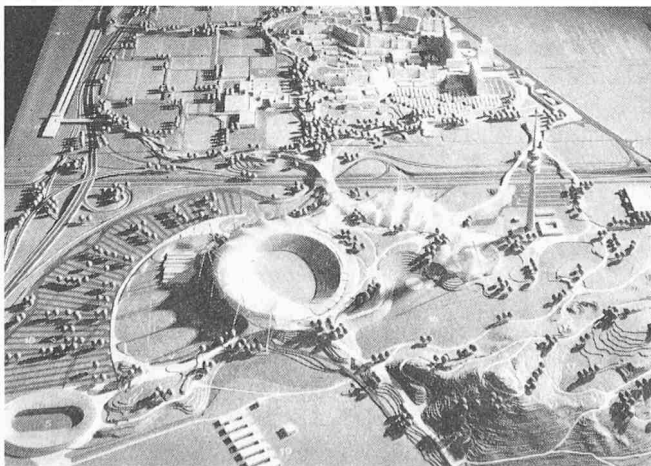
1. Vorbemerkung

Viel, fast allzu viel wurde bereits über dieses Bauwerk geredet, geschrieben, gelobt und geschmäht. In einer grossen Zahl von Fach- und Pressepublikationen ist schon eingehend über die statischen, konstruktiven, ästhetischen und wirtschaftlichen Aspekte der zweifellos kühnen Konstruktion berichtet worden. Es sei trotzdem erlaubt, diese Fülle von Dokumentationen um eine weitere zu vermehren. Die nachfolgenden Ausführungen befassen sich mit einer konstruktiven Einzelheit, die – im Rahmen des Gesamtbauwerkes – wohl doch ein besonderes Interesse beanspruchen darf: mit der Verankerung der fast 250 Haupttragseile, welche Form, Stabilität und Sicherheit der Zeltdachkonstruktionen in erster Linie zu gewährleisten haben.

2. Allgemeines zur Zeltdachkonstruktion

Diese bisher grösste vorgespannte Seilnetzkonstruktion der Welt weist total rund 75 000 m² abgewinkelte Dachfläche auf. Sie dient zur Eindeckung des Hauptstadions, der Schwimm- und Sporthalle sowie von Zwischenbauteilen auf dem Gelände der olympischen Sommerspiele 1972 in München (Bild 1). Das aussergewöhnliche Bauwerk wurde von der Olympia-Baugesellschaft bestellt, von den Architekten und Ingenieuren Behnisch & Partner, Frei Otto, und Leonhardt & Andrä entworfen und berechnet sowie von der Arbeitsgemeinschaft Stahlbau-Dach ausgeführt.

Bild 1. Modellaufnahme der Olympia-Zeltdachkonstruktion



Als Ergebnis von unzähligen Projektentwürfen, Berechnungen, Modellversuchen und Überarbeitungen entstand das charakteristische, von hohen Stahlpylonen gestützte Sattelflächen-Gebilde der aus 4 mm starken Acrylglasplatten bestehenden Dachhaut. Diese wird von einem engmaschigen sekundären Netzwerk getragen, das seine Lasten, über die speziell ausgebildeten Knotenpunkte der Randseile, auf die Hauptseile überträgt. Die unter Vorspannung stehenden Haupttragseile bilden ihrerseits ein eigenes System, welches seine Kräfte in die Zugfundamente oder die Stahlpylonen bzw. Zwischenstützen oder – im Falle des Stadions – in das Hauptrandkabel überleitet (Bild 2). Auf eine ausführlichere Darstellung des verwickelten Kräftespiels und der konstruktiven Einzelheiten sei hier verzichtet, und es sei auf die zitierte Literatur verwiesen.

Wenn dem jetzt fertiggestellten Werk seine enorm hohen Kosten vorgeworfen werden, so darf nicht vergessen werden, dass fast alle an diesem Unternehmen Beteiligten vor ganz neuartigen Aufgaben standen, was in der terminlich und kapazitätsmässig überhitzten «vorolympischen» Situation erst recht zu überhöhten Kosten führen musste. Es wurden in jeder Hinsicht hochgeschraubte Anforderungen an die Zeltdächer gestellt, die sich wiederum kostenerhöhend auswirkten. Darüber hinaus musste angesichts der vielen ungelösten Probleme ein unverhältnismässig hoher Aufwand für Forschungsarbeiten, Materialprüfungen und Grossversuche getrieben werden. Die beträchtlichen Aufwendungen für diese, den Rahmen eines normalen Bauwerkes bei weitem sprengenden Untersuchungen, belasteten die Gesamtbaukosten erheblich; die Ergebnisse all dieser Bemühungen werden jedoch in irgendeiner Form zukünftigen Bauwerken ähnlicher Art

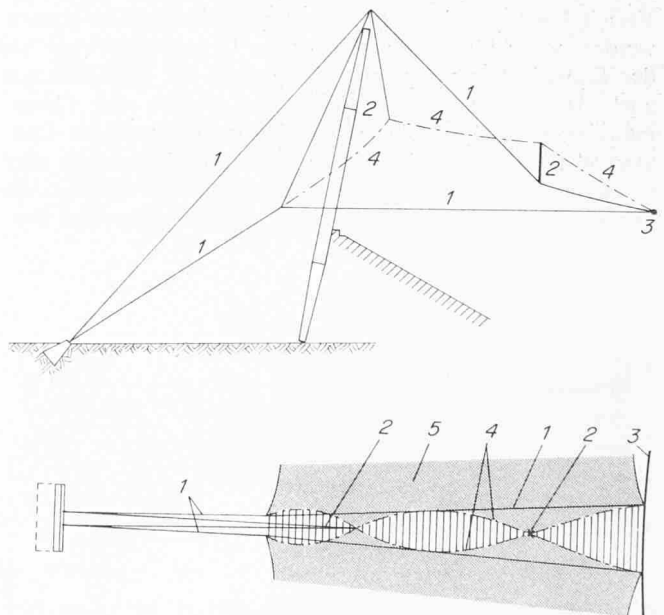


Bild 2. Schematische Darstellung der Seilnetzkonstruktion über dem Hauptstadion

- 1 Haupttragseile
- 2 Druckglieder (Pylonen, Zwischenstützen)
- 3 Hauptrandkabel
- 4 Randseile
- 5 Seilnetz (sekundäres Netzwerk)



Bild 3. Seilnetzkonstruktion über dem Hauptstadion bei der Aufrichte im November 1971. Alle von den Pylonen ausgehenden Seile sind Haupttragseile

zugute kommen. So betrachtet, verlieren die grossen Zahlen einiges von ihrer Eindringlichkeit und verweisen die weitgespannten Seilnetzkonstruktionen nicht von vornherein in die Gefilde technischer Spielereien.

3. Die Haupttragseile und ihr Verankerungssystem

Haupttragseile nehmen bei Hängewerken im allgemeinen und bei vorgespannten Seilkonstruktionen im speziellen eine Sonderstellung ein, da sie für die Formstabilität und die Sicherheit der Gesamtkonstruktion in hohem Masse verantwortlich sind (Bild 3). Aus Gründen der Deformation wurden für die insgesamt 244 Haupttragseile der Olympia-Zeltdächer Parallel-Litzenbündel (anstelle von verschlossenen Spiralseilen) von den Projektverfassern vorgeschrieben. Paralleldraht- und Litzenbündel weisen gegenüber verschlossenen Spiralseilen wesentlich höhere E-Moduli auf, was sich auf das Deformationsverhalten von Seilkonstruktionen günstig auswirkt, ja in gewissen Fällen solche überhaupt erst erlaubt. Dieser Vorteil kann allerdings nur dann wirtschaftlich ausgenutzt werden, wenn für Paralleldraht- oder Litzenbündel eine Art der Endverankerung besteht, die sowohl der statischen wie auch der dynamischen Festigkeit des Draht- oder Litzenmaterials möglichst nahe kommt. Wegen der häufigen Lastwechsel infolge Windeinwirkung ist bei der Bemessung aller tragenden Bauteile von grossflächigen Seilkonstruktionen die *dynamische* Sicherheit und Stabilität von massgebendem Einfluss.

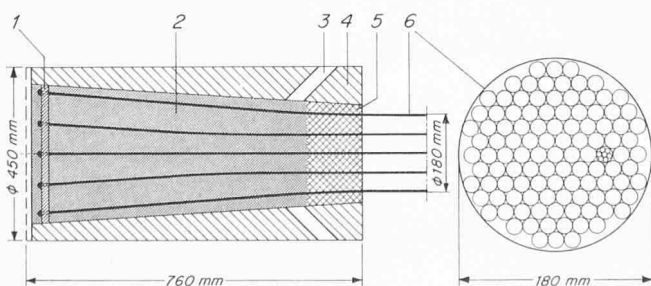


Bild 4. Schematisch dargestellter Aufbau einer Hi-Am-Verankerung am Beispiel eines Längsschnittes durch einen Normseilkopf mit 109 siebendrähtigen Litzen Durchmesser 0,6"

- 1 Kopfplatte mit verankerten Litzen
- 2 Kugelvergussmasse
- 3 Einfüllstützen für die Kugelvergussmasse
- 4 Seilkopf
- 5 Harz/Härter/Zinkstaub
- 6 Litzenbündel

Die aus den statischen Berechnungen und Modellversuchen folgenden höchsten Beanspruchungen der Haupttragseile im Gebrauchszustand betragen 1150 Mp. Bei einer verlangten Zugfestigkeit des verzinkten Litzenmaterials von 160 kp/mm² führte die Bemessung zu einer maximalen Bündelgrösse von 109 Litzen mit Durchmessern von je 0,6" (= 15,8 mm), was einem gesamten Nettoquerschnitt von 160 cm² entspricht. Alle 109 Litzen lassen sich innerhalb einer Kreisfläche von 18 cm in einer polygonalen Bündel-Konfiguration unterbringen (Bild 4). Für diesen grössten Bündeltyp berechnet sich die Bruchlast zu rund 2600 Mp. Die zulässige Oberlast von 1150 Mp entspricht demgegenüber lediglich 72 kp/mm² oder rund 45% der Zugfestigkeit, was, unter Anwendung des Entwurfes von DIN 1073 für dynamisch beanspruchte Paralleldrahtseile, eine Schwingweite von 19,5 kp/mm² oder 312 Mp zulassen würde.

Trotz der grossen Zahl von Haupttragseilen gelang es den Projektverfassern, mit nur vier verschiedenen Bündelquerschnitten zu 31, 55, 85 und 109 Einzellitzen Durchmesser 0,6" auszukommen, dies unter Inkaufnahme einzelner leicht überdimensionierter Seile. Zuzufolge der zwischen 4,5 und 129 m schwankenden Seillängen und der verschiedenen Seilkopftypen ergab sich eine grosse Vielfalt von Bündeltypen, indem kaum zwei Bündel identisch waren! (Bild 5).

Im Bestreben, diese Parallel-Litzenbündel mit einer hochwertigen Verankerung zu versehen, schlossen die beratenden Ingenieure an eine Entwicklung an, die fast gleichzeitig ihre erste Anwendung bei der Schrägseilbrücke über den Rhein bei Mannheim fand. Dieses in einer gemeinsamen Entwicklung der beratenden Ingenieure Prof. F. Leonhardt und Dr. W. Andrä, der Firma Lechler-Chemie, Stuttgart, und des Bureau BBR, Zürich, entstandene patentrechtlich geschützte Verankerungssystem Hi-Am (High-Amplitude) lässt sich kurz wie folgt charakterisieren: Die mit BBRV-Stauchköpfchen versehenen Enden eines Draht- oder Litzenbündels werden mittels einer speziellen Kunstharzformulation – ein Epoxy-System mit Stahlkügelchen und Zinkstaub als Füllmaterial – in zylindrische Stahlhülsen mit konischer Innenwandung unter Anwendung intensiver Vibration vergossen und warm ausgehärtet. Bei zweckmässiger Bemessung der Verankerung erreicht diese nicht nur die statische, sondern auch die dynamische Festigkeit des Draht- oder Litzenmaterials, was bei Hängekonstruktionen von grosser wirtschaftlicher Bedeutung ist. Zusätzlich bietet dieses System einen einwandfreien Korrosionsschutz des Bündels in der Verankerungszone (Bild 6).

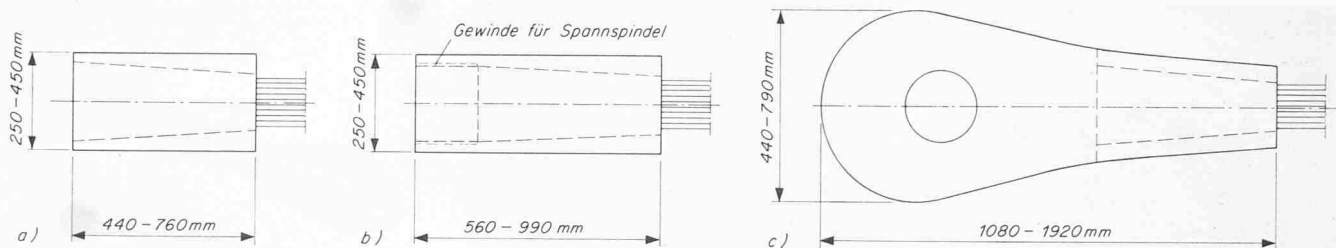


Bild 5. Umrisse der für die Hi-Am-Verankerung der Haupttragseile verwendeten Seilkopftypen mit Minimal- und Maximalabmessungen. a) Normalseilkopf als feste Verankerung, b) Gewindeseilkopf als spannbare Verankerung, c) Gabelseilkopf als gelenkige Verankerung

Die ursprünglich nur für Paralleldrahtbündel hoher Dauerschwellbelastung vorgesehene Verankerungsart ist in [2] im Detail beschrieben und stellt gegenüber dem früher üblichen Metallverguss verschlossener Spiralseile einen technischen Fortschritt dar, und zwar bezüglich zulässiger Schwingweite und Dehnsteifigkeit der Seile sowie Güte des Korrosionsschutzes in der Verankerungszone. Der Unterschied zwischen der maximal ertragbaren Schwingweite von rd. 12 bis 15 kp/mm² bei der Verankerung verschlossener Seile und von rd. 20 bis 25 kp/mm² bei der Hi-Am-Verankerung von Paralleldrahtbündeln kann wie folgt erklärt werden. Einerseits spielen die günstigen Verhältnisse beim «weichen» Austritt der Drähte aus einer Hi-Am-Ankerhülse eine massgebende Rolle, andererseits sind es vor allem die zwischen Metall- und Kunststoffverguss bestehenden Temperaturunterschiede (rund 400°C gegenüber 100°C), welche im Fall des Metallvergusses eine Beeinträchtigung der Festigkeitseigenschaften des Drahtmaterials verursachen.

Trotz der schon 1969 vorliegenden gesicherten Erkenntnisse mit Hi-Am-verankerten Paralleldrahtbündeln und der vorgesehenen erstmaligen Anwendung der neuen Verankerungsart für die dynamisch höchstbeanspruchten Schrägseile der Rheinbrücke in Mannheim, verlangten die Projektverfasser 0,6"-Litzen als Material für die Haupttragseile der Zelt-dachkonstruktionen in München. Mit der damaligen, heute jedoch überholten Begründung, dass Handhabung und Montage von grosskalibrigen Parallellitzenbündeln leichter von-statten gingen als von Paralleldrahtbündeln, wurde mit der Wahl von Litzen sogar der gegenüber Drähten um rund 10% geringere E-Modul in Kauf genommen.

Es bestand kein Anlass, ein grundsätzlich anderes Verhalten der Hi-Am-Verankerung bei Litzen- als bei Drahtbün-

deln anzunehmen, weshalb diese Verankerungsart definitiv zur Ausführung ausgeschrieben wurde, obschon im damaligen Zeitpunkt eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung in Deutschland noch nicht vorlag.

4. Grossversuche mit der Hi-Am-Verankerung

Die ersten Grossversuche an Hi-Am-verankerten Paralleldrahtbündeln mit 85 Drähten, Durchmesser 7 mm, und einer freien Drahtlänge zwischen den Verankerungen von 300 cm wurden bereits in den Jahren 1968/69 auf Veranlassung des Ingenieurbüros Leonhardt & André am Otto-Graf-Institut in Stuttgart durchgeführt. Wie in [4] ausführlich beschrieben wird, zeigte es sich, dass es mit der neu entwickelten Verankerung erstmals möglich wurde, die statischen und dynamischen Festigkeitswerte der Drähte auf der freien Länge des Bündels auch in der Verankerung zu erreichen und somit jeden nachteiligen Verankerungseinfluss auszuschalten.

Inzwischen hatte sich die EMPA mit dem Bau einer Versuchsanlage auf die dynamische Prüfung von grossen Spannkabeln eingerichtet. Die in erstaunlich kurzer Zeit konzipierte und installierte Prüfeinrichtung ist in [3] eingehend beschrieben. Sie stellt insofern einen Markstein in der Geschichte der Prüftechnik dar, als es damit erstmals möglich wurde, Schwingweiten bis zu 250 Mp und Oberlasten bis zu 670 Mp aufzubringen.

Auf dieser Prüfeinrichtung wurden Ende 1969 die bereits am Otto-Graf-Institut erhaltenen Ergebnisse in grösserem Masstab mit Versuchskabeln aus 295 Drähten Durchmesser 7 mm überprüft und bestätigt, wobei damals immer noch die Rheinbrücke Mannheim Veranlassung zu diesen erweiterten Versuchsserien gab (Bild 6).

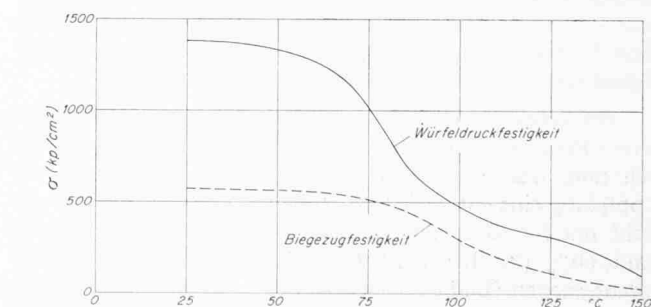
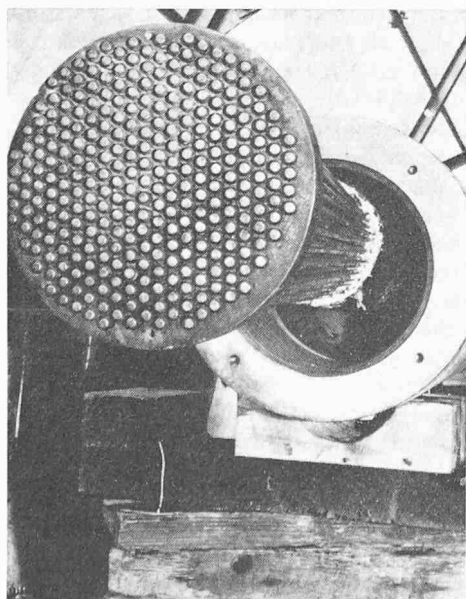


Bild 7. Festigkeitswerte der Kugelvergussmasse in Abhängigkeit der Temperatur der Probeprismen 4 × 4 × 16 cm (Mittelwerte)

Bild 6. Hi-Am-Verankerung eines Paralleldrahtkabels der Schrägseilbrücke Mannheim beim Zusammenbau, bestehend aus 295 Drähten Durchmesser 7 mm; Bruchlast rund 1850 t

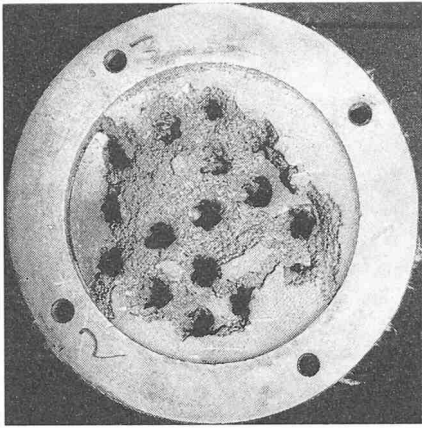


Bild 8. Durchschlüpfen von Litzen *ohne* Endverankerung durch die Kugelvergussmasse einer Hi-Am-Verankerung im Versuch bei Temperaturen über 115°C (Photo EMPA)

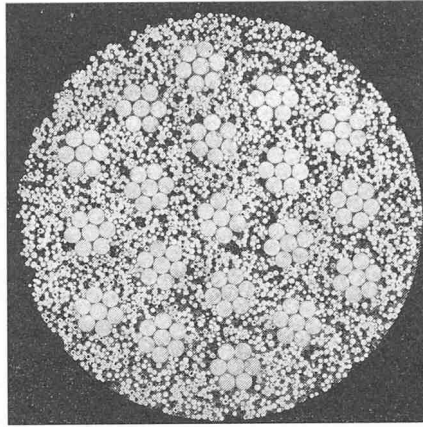


Bild 9. Querschnitt durch Kugelvergussmasse mit eingebettetem Versuchs-Litzenbündel (Photo EMPA)

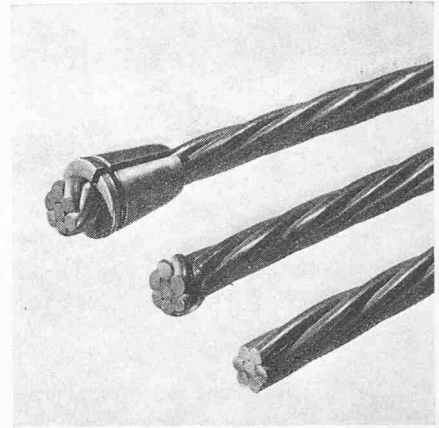


Bild 10. Litzen mit aufgestauchten BBRV-Köpfen als Einpresshilfe und Sicherung einer festen Keilverankerung

Im Laufe des Jahres 1970, nach definitiver Auftragserteilung der Verankerungsarbeiten für die Haupttragseile der Zeltdachkonstruktionen, lief an der EMPA eine weitere Versuchsserie an, welche das Verhalten von Hi-Am-verankerten Litzenbündeln zum Gegenstand hatte. Die grössten geprüften Parallel-Litzenbündel setzten sich aus 85 Litzen 0,6" zusammen und wurden einer Schwingweite von 250 Mp, bei einer Oberlast von 670 Mp, unterworfen. Auch diese in [4] beschriebenen Versuche zeigten das Hauptergebnis, dass praktisch sämtliche Ermüdungsbrüche ausserhalb der Verankerungen im Bereich der freien Seillängen lagen. Dies traf auch für die durch Dauerstands- bzw. ZerreiBversuche hervorgerufenen statischen Brüche zu. Der bei diesen Versuchen festgestellte Schlupf des Bündels beim Austritt aus der Ankerhülse lag in der Regel bei Bruchteilen von Millimetern. Dies liess bei Normaltemperatur auf einen perfekten Haftverbund zwischen Litzenbündel und Kugelvergussmasse schliessen.

Besonders aufschlussreich waren die statischen ZerreiBversuche, welche bei stark erhöhten Temperaturen durchgeführt wurden. Da die deutsche Prüfbehörde den Nachweis für die volle Tragfähigkeit der Verankerung auch unter extremen äusseren Bedingungen forderte, musste eine Reihe von Versuchen mit Seilkopftemperaturen bis über 150°C durchgeführt werden, welche praktisch zum totalen Festigkeitsverlust des Harzanteils der Kugelvergussmasse führten (Bild 7). Auch bei diesen Versuchen wurde die volle Tragfähigkeit von Hi-Am-Verankerungen nachgewiesen.

Bei vergleichenden ZerreiBversuchen von Hi-Am-verankerten Parallellitzenbündeln unter erhöhter Temperatur zeigte sich nun, dass die Endverankerung der Litzen hinter der Kopfplatte eine entscheidende Rolle spielte. Litzenbündel, die nicht mit Stauchköpfen versehen waren, wurden schon bei rund 60% der Bruchlast des Bündels aus dem Seilkopf herausgezogen (Bild 8). Demgegenüber hielten endverankerte Litzenbündel die volle Bruchlast aus; der einzige Unterschied gegenüber den Versuchen bei Normaltemperatur bestand in einem geringfügigen Schlupf von wenigen mm, der vom Standpunkt der Sicherheit aus jedoch bedeutungslos ist.

Dieser bei rund 50% der Bruchlast und Seilkopftemperaturen über 100°C ziemlich plötzlich eintretende Schlupf ist jedoch ein Hinweis auf den bei Ausfall der Festigkeit des Kunstharzes sich einstellenden Tragmechanismus. Bei zunehmender Last wird von den endverankerten Litzen über die Kopfplatte eine Pressung auf die Kugelvergussmasse ausge-

übt, so dass der geringe Harzanteil verdrängt wird, welcher anfänglich eine lückenlose gegenseitige Berührung der Stahlkugeln verhindert hatte (Bild 9). Dies führt nun zu einem Stützgerüst sich gegenseitig berührender Stahlkugeln, welche in dichtester Packung angeordnet sind. Zur Entstehung eines solchen Stützgerüsts müssen jedoch die einzelnen Litzen mit der Kopfplatte kraftschlüssig verbunden sein.

Bei weiter zunehmender äusserer Belastung nimmt auch die Pressung der Kopfplatte auf das Kugelstützgerüst zu. Infolge Gewölbewirkung im Kugelstützgerüst entstehen im Ankerkonus Ringzugspannungen, denen als Reaktion Querverpressungen des Kugelstützgerüsts auf die Litzen entsprechen, so dass ein Teil der von aussen auf das Litzenbündel angreifenden Kraft durch innere Reibung aufgenommen wird. Demzufolge stützt sich nur die Differenz zwischen äusserer Last und Reibungskraft direkt auf die Kopfplatte ab. Dass sich die harten Stahlkugeln im Versuch jeweils deutlich in die Seilkopfwand und in die Litzen einprägten, lässt auf hohe Pressungen und Reibungs- bzw. Verzahnungseffekte im Innern des Seilkopfes schliessen.

Im Gegensatz zu BBRV-Stauchköpfchen von Einzeldrähten gelingt es bei gesamthaft gestauchten Litzen nicht, die volle Bruchlast zu erreichen. Wegen der starken Verzinkung lag der Wirkungsgrad der Stauchköpfe bei den verwendeten Litzen im Mittel bei rund 48%. Es lässt sich daraus ableiten, dass – um die volle Bruchlast einer Hi-Am-Verankerung im Grenzzustand zu erreichen – höchstens 48% der Maximallast bis zur Kopfplatte gelangen, während mindestens 52% über innere Reibung abgetragen wurden.

Zu diesem auf den ersten Blick paradoxen und quantitativ nicht leicht erfassbaren Tragverhalten besteht eine Analogie in der Keilverankerung von Einzellitzen oder -stäben. Es ist für die Wirksamkeit eines Verankerungskeils unerlässlich, dass er mit einer erheblichen Kraft in die Verankerungshülse eingepresst wird. Bei den festen, d.h. nicht spannbaren Verankerungen geschieht dies nicht immer mit der nötigen Zuverlässigkeit, was zu gefährlichen Versagern führen kann. Bei dem von der Stahlton AG in der Schweiz vor kurzem eingeführten Vorspannsystem CONA für Litzen 0,5" besorgt bei der festen Verankerung ein aufgestauchter Litzenkopf das selbsttätige Einpressen des Keils in die Hülse. Obschon auch hier der Litzenkopf allein nicht in der Lage wäre, die volle Bruchlast der Litze zu ertragen, genügt die durch den Verankerungskopf ausgeübte Einpresskraft, um die volle Tragfähigkeit der festen Keilverankerung zu gewährleisten (Bild 10).

5. Übernahme und Abwicklung des Auftrages

Im Mai 1970 erteilte das ausführende Generalunternehmer-Konsortium ARGE Stahlbau-Dach, auf Antrag der Olympia-Baugesellschaft, der Firma Stahlton AG, Zürich, den Auftrag für den Anbau und den Kunststoffverguss von 488 Hi-Am-Verankerungen für die Haupttragseile der Zelt-dachkonstruktionen in München.

Der Auftrag umfasste die Endverankerung der auf genaue Länge geschnittenen und gebündelten Litzen Durchmesser 0,6", den Anbau der Seilköpfe sowie die Lieferung, das Einbringen und die thermische Nachbehandlung der Kugelvergussmasse. Der Auftrag schloss ferner die genaue Protokollierung sämtlicher vom Auftragnehmer erbrachten Leistungen sowie die Qualitätskontrolle und -garantie gegenüber Prüfbehörden bzw. Auftraggeber ein.

Verschiedene Umstände erschwerten und komplizierten die Durchführung dieses Auftrages:

- das Litzenmaterial war bereits vorher vom Auftraggeber bei einem französischen Lieferanten bestellt worden, weshalb der Firma Stahlton AG zur Auflage gemacht wurde, die Verankerungsarbeiten aus zoll- und transporttechnischen Gründen auf dem Werkgelände der Litzen-Lieferfirma in Lens (Dept. Pas-de-Calais) durchzuführen;
- die Seilköpfe mit Zubehörteilen waren ebenfalls vorgängig separat in Auftrag gegeben worden, und zwar aus terminlichen Gründen bei zwei deutschen und einem österreichischen Lieferwerk. Dies führte zu Koordinationsschwierigkeiten in der Anlieferung sowie zu grossen Unterschieden in der Massgenauigkeit und dem Bearbeitungsgrad der Seilköpfe;
- das Aufstauchen von BBRV-Köpfen bereitete anfänglich gewisse Schwierigkeiten wegen der starken Verzinkung der Litzen (rund 500 g/m²). Erst nach Konstruktion von besonders griffigen Klemmbacken durch die Firma Proceq SA, Zürich, gelang das einwandfreie Aufstauchen von Verankerungsköpfen mit einer Spezial-Stauchmaschine dieser Firma.
- auf dem Werkgelände der Litzen-Lieferfirma bestanden keine Einrichtungen für die Herstellung von Kabelverankerungen, und die betreffende Firma verfügte auch über kein geschultes Personal für solche Spezialarbeiten.

Nach gründlichen, jedoch unter Zeitdruck stehenden Vorbereitungsarbeiten in der Schweiz und in Nordfrankreich delegierte die Stahlton AG bereits Anfang August 1970 einen Projektleiter mit einigen Spezialisten nach Lens zur Inbetrieb-

nahme der inzwischen örtlich erstellten Einrichtungen sowie der aus der Schweiz eingetroffenen Spezialgeräte. Gleichzeitig waren die Equipenchefs aus den Beständen des französischen Werkes zu rekrutieren und für ihre neuen Aufgaben auszubilden.

Personell und betrieblich brachte die Durchführung der Arbeiten eine sehr enge Zusammenarbeit zwischen der Stahlton AG und der Firma LTCL (Laminoirs, Tréfileries, Câbleries de Lens). Bei der starken Anspannung des schweizerischen Arbeitsmarktes und der schlechten Beschäftigungslage in Nordfrankreich wäre es nicht sinnvoll gewesen, mehr schweizerisches Personal als unbedingt notwendig zu «exportieren», zumal bei der Firma LTCL auf zuverlässige Fach- und Hilfsarbeiter zurückgegriffen werden konnte. Die nach dem Modell der Projektorganisation weit vom Stammhaus entfernt ablaufenden Verankerungsarbeiten waren ein typisches Beispiel für die temporäre Verlegung der Teilproduktion einer Schweizer Firma in den EWG-Raum bei Beschränkung des Einsatzes von eigenem Personal auf Spezialisten und Fachleute für Instruktion und Überwachung. Neben der administrativen Abwicklung des ganzen Auftrages bestand somit die erbrachte Leistung in technischem und organisatorischem Know-how, in der Übernahme von Verantwortung und Garantie für die Qualität der Endprodukte und in der Gewährleistung der Liefertermine.

Die Vielzahl der Bündeltypen erheischte eine ausserordentliche Sorgfalt und eine rigorose, mehrfache Kontrolle aller Arbeitsgänge, von der Materialvorbereitung über das präzise Ablängen der Litzen bis zum Anbau und Verguss der Seilköpfe. Abweichungen oder gar Verwechslungen gegenüber den Bestellisten des Auftraggebers galt es unter allen Umständen auszuschliessen, da bei Unstimmigkeiten eine Korrektur auf der Baustelle kaum mehr möglich und damit unliebsame Verzögerungen im Montageablauf die Folge gewesen wären.

6. Ausführung der Verankerungsarbeiten

Die für die Verankerungsarbeiten vorbereitete Halle bei Lens war mit einem Laufkran versehen und wies eine überdachte Fläche von rund 6600 m² auf (Bild 11). Die einzelnen Litzen wurden zuerst ab Haspel auf einer Präzisionsschneidebank von 130 m Länge mit einer Toleranz von $\pm 0,1\%$ der Soll-Länge geschnitten, was aussergewöhnlich genau kalibrierte und temperaturkompensierte Messeinrichtungen verlangte. Die Litzen gelangten dann auf eine der drei Bündelbänke, wo der Zusammenbau der Parallelbündel mittels Schablonen erfolgte. Nach dem Durchschieben der ein-

Bild 11. Fabrikationshalle bei Lens (Nordfrankreich) mit Litzenab-länganlage (links), Bündelbänken (rechts) und Sattelbock (Mitte hinten)

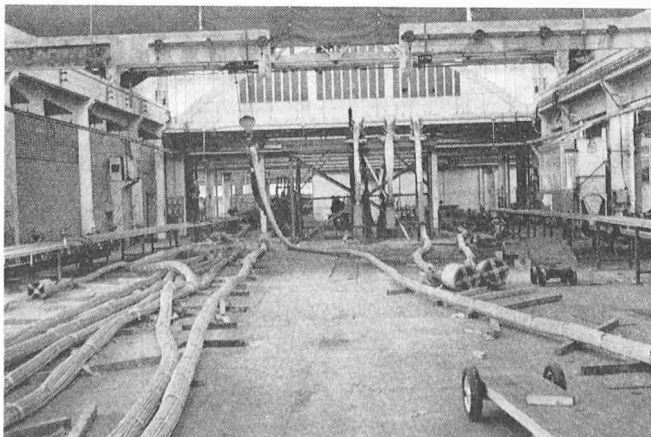


Bild 12. Aufstauchen von BBRV-Köpfen auf Litzen mittels Spezial-Stauchmaschine



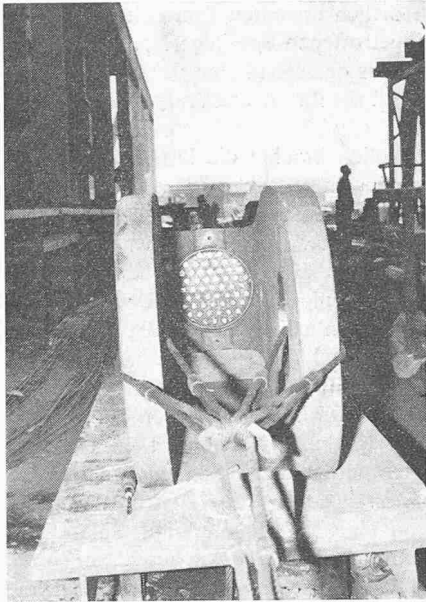


Bild 13. Bündel in gestreckter Lage mit Gabelseilkopf und an die Kopfplatte anliegenden Litzenköpfen, vor Montage des Bodendeckels

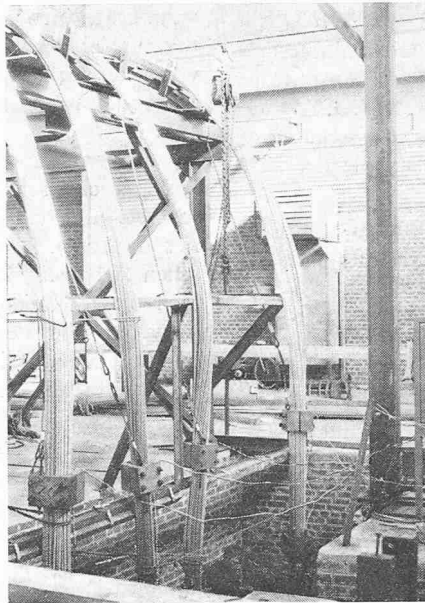


Bild 14. Litzenbündel über Sattelbock mit nach unten hängenden Seilköpfen

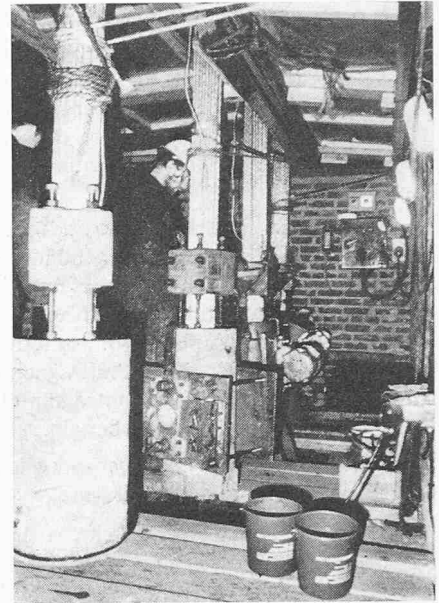


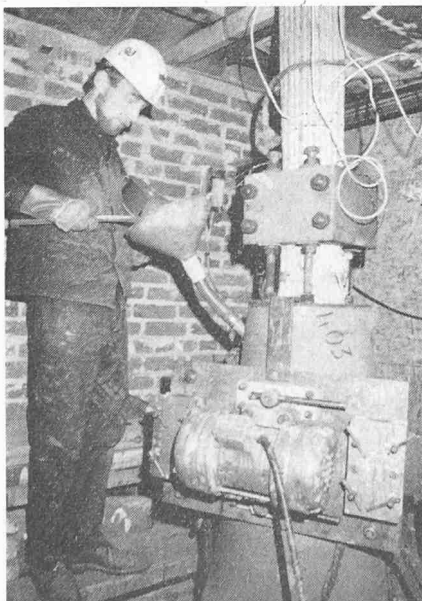
Bild 15. Seilköpfe auf gleicher Höhe in Grube während der Vergussarbeiten

zelen Litzen durch den zurückversetzten Seilkopf und dem Einfädeln der Litzenenden in die gelochte Kopfplatte wurden die BBRV-Litzenköpfe mittels der erwähnten Spezial-Stauchmaschine aufgestaucht (Bild 12). Das Strecken des Bündels bis zum Anliegen aller Litzenköpfe an die Kopfplatte, das Anbringen von Stahlbändern und Seilklemmen, das genaue Zentrieren der Seilköpfe sowie die Montage eines dichten Bodendeckels vervollständigten die Vorbereitungen für die eigentlichen Vergussarbeiten (Bild 13). Diese hatten in vertikaler Lage der Seilköpfe zu erfolgen, weshalb an den Hallenenden je ein gerundeter Sattelbock sowie – mangels freier Hallenhöhe – Vergussgruben von 2,20 m Tiefe angeordnet worden waren. Jeweils 4 bis 5 Kabel-Enden wurden dann derart über einen Sattelbock gelegt und fixiert, dass das Einbringen der Kugelvergussmasse in die nach unten hängen-

den Seilköpfe in den Gruben auf gleicher Höhe erfolgen konnte (Bilder 14 und 15).

Das Mischen der in vordosierten Arbeitspackungen angelieferten Komponenten Harz, Härter, Zinkstaub und Stahlkugeln wurde maschinell durchgeführt, wobei aus Gründen der Viskosität eine minimale Umgebungstemperatur von 15°C einzuhalten war. Im ganzen wurden für die Verankerungsarbeiten rund 7000 l oder 40 t der auf Basis von Araldit-Harzen speziell formulierten Kugelvergussmasse eingebracht.

Das Einbringen der zäh-viskosen Kunststoffmasse in die Seilköpfe erfolgte abwechselnd in der einen oder andern Vergussgrube bei einem Rhythmus von 4 bis 5 Seilköpfen je Arbeitstag. Für das Einfüllen der Kugelvergussmasse in den Seilkopf waren spezielle Einfüllstutzen vorgesehen. Das Ein-



Links aussen:

Bild 16. Einbringen der Kugelvergussmasse in den Seilkopf durch Einfüllstutzen unter gleichzeitiger Vibration. Beachte Seilklemme mit Zentriervorrichtung für Seilkopf und Verdrahtung für Registrierung des Temperaturverlaufes während der Temperung

Links:

Bild 17. Um Seilkopf montierte Elektro-Heizschalen vor Beginn der Temperung

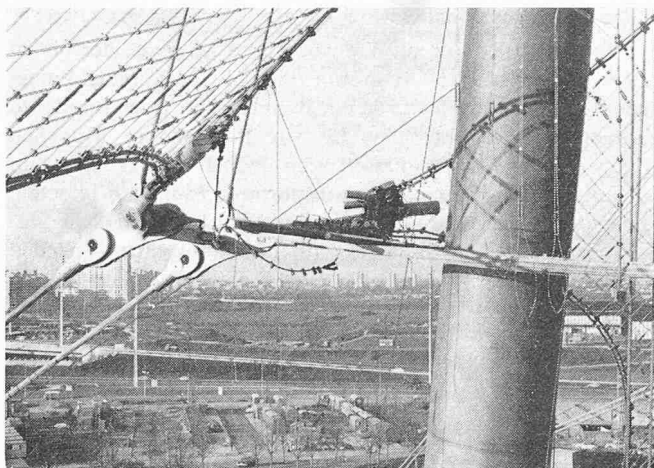


Bild 18. Knotenpunkt zwischen Haupttragseilen und Randseilen mittels Gabelseilköpfen

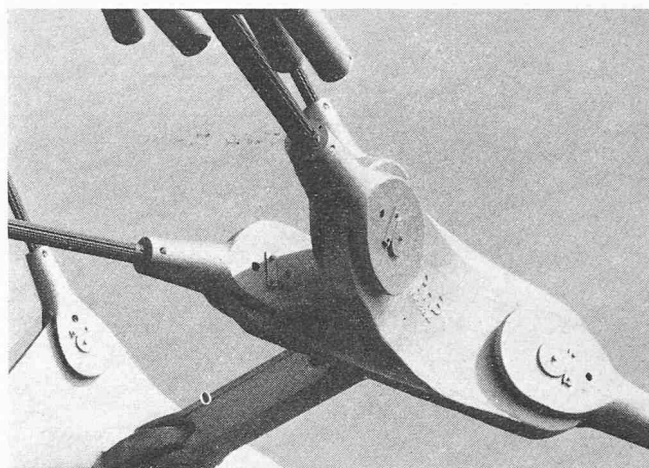


Bild 19. Knotenpunkt mit Hi-Am-Gabelseilköpfen

giessen geschah relativ langsam und bei gleichzeitig intensiver Vibration jedes Seilkopfes durch zwei Hochfrequenz-Rüttler, um die Stahlkugeln in eine möglichst dichte Packung zu bringen und um jeden Einschluss von Luft zu verhindern (Bild 16). Nach Verschluss der Einfüllstutzen wurden die letzten 10 bis 15 cm jeweils noch von oben her mit unverfülltem Harz/Härter vergossen, um einen möglichst «weichen» Austritt des Litzenbündels zu schaffen.

Eines der schwierigsten Probleme bei den Vergussarbeiten bestand in der einwandfreien Abdichtung der Seilkopf-Bodendeckel gegen Harzverlust. Kunstharze weisen – auch wenn sie nicht sehr dünnflüssig erscheinen – meistens eine ausgeprägte Benetzungsfreundlichkeit auf, d. h. sie dringen durch alle noch so feinen Ritzen. In den glücklicherweise seltenen Fällen, wo sich ein Deckel als nicht ganz dicht erwies, blieb meist nichts anderes übrig, als die bereits eingefüllte Kugelvergussmasse zu entfernen und den Deckel neu zu dichten.

Zur Beschleunigung der Aushärtung der Kugelvergussmasse, aber auch um ihr eine hohe Endfestigkeit und Kriechbeständigkeit zu verleihen, wurden die Seilköpfe während den Nachtstunden elektrisch beheizt. Unter Einsatz von eigens dafür angefertigten zylindrischen Elektro-Heizschalen wurden die Seilköpfe bis auf eine Höchsttemperatur von 100°C

gebracht, die während 4 Stunden beibehalten wurde (Bild 17). Anschliessend folgte ein langsames Auskühlen, so dass am folgenden Morgen die Seilköpfe noch eine Temperatur von max. 35°C aufwiesen.

Um das Programm dieser Temperung genau einzuhalten, wurde die elektrische Widerstandsheizung über Temperaturfühler in der Kugelvergussmasse durch ein automatisches

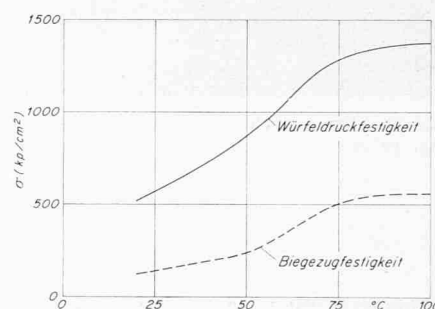


Bild 20. 7-Tage-Festigkeit der Kugelvergussmasse in Abhängigkeit der Maximaltemperatur während des Aushärtevorganges; Mittelwerte gemessen an Prismen 4 × 4 × 16 cm

Bild 21. Schaltschrank mit eingebautem Thermoschreiber für die automatische Steuerung und Registrierung des Temperaturverlaufes während der thermischen Nachbehandlung

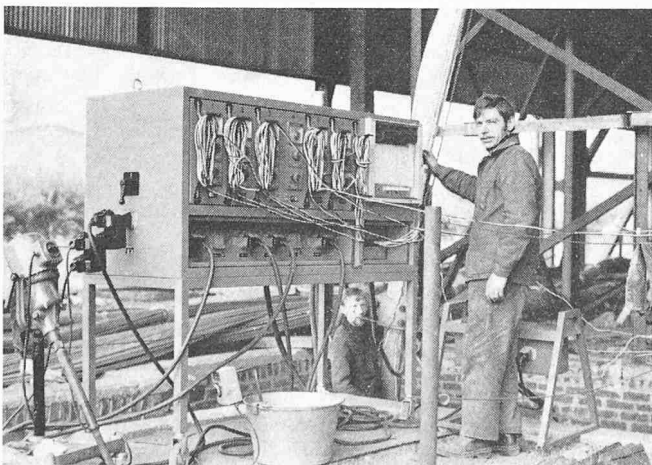
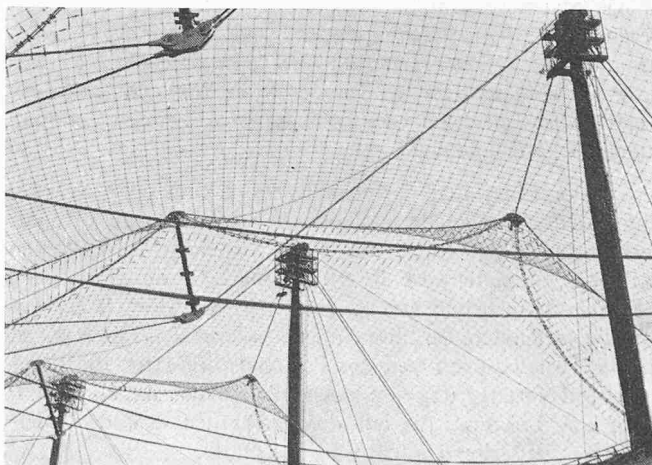


Bild 22. Fertig montierte Seilnetzkonstruktion über Hauptstadion mit den schwebenden Zwischenstützen



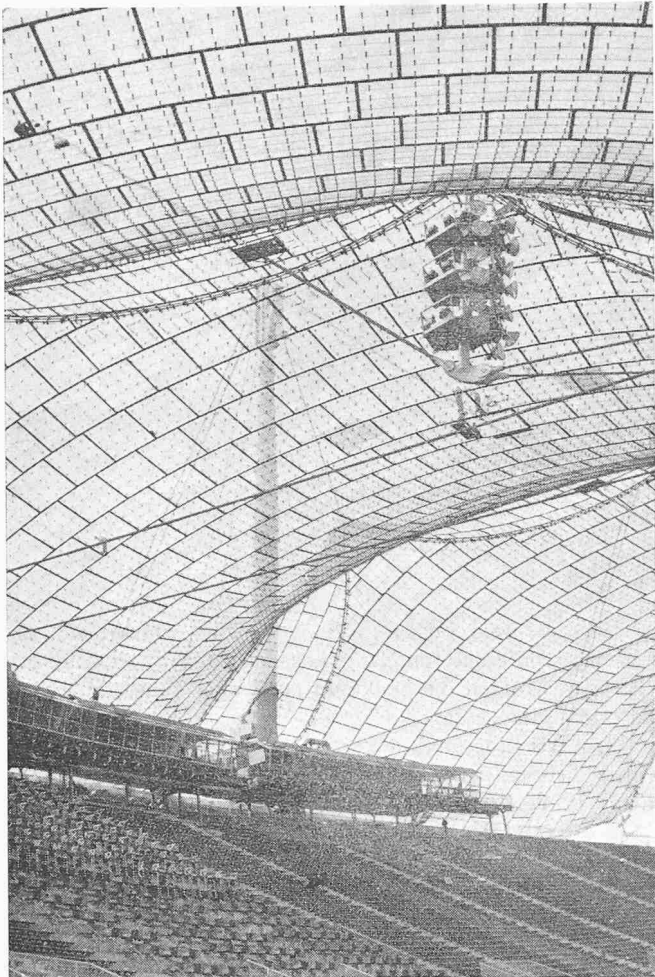


Bild 23. Innenansicht des fertigen Hauptstadion-Zeltdaches (Stand Mai 1972)

Steuergerät mit einer Genauigkeit von $\pm 2^\circ\text{C}$ reguliert. Dieses Gerät war auch dafür eingerichtet, die Temperaturverläufe an den massgebenden Stellen der Seilköpfe zu registrieren, und zwar gleichzeitig an 12 verschiedenen Stellen; dies reichte für die simultane Protokollierung des Temperaturverlaufes in 5 Seilköpfen aus (Bild 21). Auch die gleichzeitig herzustellenden Probepismen wurden derselben Temperung unterworfen, so dass die im Versuch ermittelten Festigkeiten denjenigen der Kugelvergussmasse in den Seilköpfen gleichgesetzt werden konnten.

Wie ausserordentlich stark die Endfestigkeit der Kugelvergussmasse – als warmhärtendes System – von der Wärmebehandlung abhängt, zeigt Bild 20. Die gewissenhafte Einhaltung der vorgeschriebenen Temperaturen war denn auch ein wesentlicher Teil der Sorgfaltspflicht, der es bei den Verankerungsarbeiten zu genügen galt.

Unter Einschluss der Anlaufperiode und eines Winterunterbruches sowie in Anbetracht einer zeitweise stark verzögerten Anlieferung der vom Auftraggeber bestellten Seilköpfe, dauerten die in Nordfrankreich durchgeführten Verankerungsarbeiten von August 1970 bis März 1971, womit die verlangten Termine eingehalten wurden. Die Kapazität der Installationen und des Personals erlaubten die Fertigung und Verankerung von wöchentlich 12 bis 13 Litzenbündeln, eine Leistung, die aus den erwähnten Gründen allerdings nur zeitweise erbracht werden konnte.

7. Transport und Montage

Es sei noch kurz auf Transport und Montage der bis zu 129 m langen und 15 t schweren Parallel-Litzenbündel eingegangen. Ursprünglich wurde ein Bahntransport der Bündel in gestreckter Lage von Lens bis zur Baustelle in München erwogen. Die Bündel liessen sich jedoch relativ leicht in Schlaufen legen, welche gut transportable Einheiten bildeten. Dank des Geleiseanschlusses in der Fabrikationshalle konnten die Bündelschlaufen direkt auf Eisenbahnwagen verladen werden, die nach jeweils 7 bis 10 Reisetagen die Baustelle in München erreichten.

Montage und Vorspannung der Haupttragseile, in Verbindung mit dem gesamten, äusserst komplizierten Netzwerk, den Pylonen, Zwischenstützen und dem Haupttrankabel, setzten im Spätherbst 1971 ein und lagen in den Händen der ARGE Stahlbau-Dach. Diese Arbeitsgemeinschaft bestand aus sechs der grössten deutschen und österreichischen Stahlbauunternehmen, welche die Ausführung der ganzen Dachkonstruktion als Generalunternehmer von der Olympia-Bau-Gesellschaft übernommen hatten. Für diese ungewöhnlich heikle und risikoreiche Montagearbeit wurden die besten und erfahrensten Spezialisten aus den beteiligten Unternehmungen zusammengezogen (Bilder 18 bis 22).

Anfang November 1971 war die Montage der gesamten Seilnetz-Konstruktionen abgeschlossen, so dass in einer feierlichen Zeremonie Aufrichte des Daches gefeiert werden konnte. Im damaligen Zeitpunkt fehlten noch die letzte Regulierung der Haupttragseile, der Korrosions- und Feuerschutz der Haupttragseile im Fundamentbereich sowie ein Teil der Eindeckung des Netzwerkes mit Acryl-Platten der Abmessungen $3,0 \times 3,0$ m. Sämtliche Abschlussarbeiten wurden vom milden Winter 1971/72 soweit begünstigt, dass die Zeltdachkonstruktion im Frühjahr 1972 für die Eröffnung der Ende August beginnenden olympischen Spiele bereitstand (Bild 23).

Literaturverzeichnis

- [1] F. Leonhardt: Zur Entwicklung aerodynamisch stabiler Hängebrücken. «Die Bautechnik», Hefte 10/11, 1968
- [2] W. Andrä und W. Zellner: Zugglieder aus Paralleldrahtbündeln und ihre Verankerung bei hoher Dauerschwellbelastung. «Die Bautechnik», Hefte 8 und 9, 1969
- [3] U. Meier und A. Rösli: Versuchseinrichtungen für Zugschwellbeanspruchungen an grossen Spannkabeln. «Schweiz. Bauzeitung», Heft 4, 1971, S. 81–86
- [4] U. Meier: Das Olympiadach in München und die dafür durchgeführten Grossversuche. «Schweiz. Bauzeitung», Heft 16, 1971, S. 375–380
- [5] C.M. Mayer: Bauten für die Olympiade 1972 in München. «Schweizer Baublatt», Nr. 56, 1971
- [6] J. Schlaich: Die tragende Konstruktion des Olympiadaches. Techn.-wissenschaftliche Blätter der «Süddeutschen Zeitung», 192. Ausgabe, 1971
- [7] E. Trinkl und P. Schnabel: Olympiadächer im Windkanal. «Die Bautechnik», Heft 1, 1972
- [8] E. Müller: 160 Tonnen Aluminium-Armaturen für das grosse Zeltdach der Olympiade 1972. «Schweizer Aluminium-Rundschau», Heft 5, 1972
- [9] H. Kufner: Verankerung der Fundamente des Olympia-Zeltdaches in München durch Injektionszuganker. «Schweiz. Bauzeitung», Heft 6, 1972, S. 125–126
- [10] Behnisch & Partner: Olympische Bauten in München «Bauen und Wohnen», Heft 7 1972

Adresse des Verfassers: Georges Zenobi, dipl. Ing. ETH/SIA, Direktor der Stahlton AG, Riesbachstrasse 57, 8034 Zürich.