

## Die Überdachung der antiken Arena in Nîmes

R. Bergermann und W. Sobek, Stuttgart

**Übersicht.** Seit 1988 wird die antike Arena in Nîmes, Südfrankreich, auch in der Winterperiode für Veranstaltungen benützt. Das unter Denkmalschutz stehende Gebäude wird hierzu jeweils im Herbst mit einer Dachkonstruktion von 5000 m<sup>2</sup> Grundfläche überdacht. Das saisonale Bauwerk, zu dem auch Heizungs- und Beleuchtungsanlagen gehören, wird jeweils im April wieder demontiert. Die Forderung nach einem stützenfreien Innenraum von 4000 m<sup>2</sup> Grundfläche und die Besonderheiten der jährlichen Montage/Demontage führten zum Entwurf eines vollkommen zerlegbaren Bauwerkes mit extrem niedrigem Gewicht. Das Dachtragwerk besteht im wesentlichen aus einem Luftkissen, das in seiner Form durch einen dünnen Stahlring stabilisiert wird. Die in Nîmes realisierte Größenordnung dieses Konstruktionsprinzips ist bisher einmalig.

### The roof over the roman amphitheatre at Nîmes

**Contents.** The Roman arena in Nîmes has been a center of public and cultural life for about two thousand years. Now, since 1988, the arena can be used also during wintertime. For this, the center part of the building can be covered with a lightweight roof structure which is 5,000 sqm in plan. Considerations concerning the preservation of historical monuments require that the roof structure has to be implanted each year in October and that it has to be removed the next April. This and the requirements for a column-free space of 4,000 sqm in plan yielded to the design of a structure of extreme lightness which can be installed and removed easily. The main part of the roof structure consists of an air-inflated membrane-cushion which has been the first one to be realized in this size.

### 1 Die römische Arena und die Vorgeschichte des Projektes

Die zwischen dem ersten Jahrhundert v. Chr. und dem zweiten Jahrhundert n. Chr. erbaute Arena in Nîmes zählt zu den schönsten und am besten erhaltenen ihrer Art. Das aus weißem Kalkstein errichtete, im Grundriß elliptische Bauwerk besitzt Außenabmessungen von 132 m zu 101 m bei einer Bauhöhe von ca. 22 m gegenüber dem umliegenden Niveau. In ihrer ursprünglichen Form bot die Arena einstmals ca. 24000 Besuchern auf insgesamt 34 Sitzreihen Platz.

Während der Spiele durch schattenspendende Segel, den sog. „Vela“, überdacht, war die Arena während der Römerzeit Mittelpunkt des städtischen Lebens in Nîmes. Nach dem Abzug der Römer erlebte das Bauwerk eine wechselvolle Geschichte: Vom Umbau zur Festung über teilweise Zerstörungen, Einbau von zwei Kirchen, Umwandlung zum

Dipl.-Ing. Rudolf Bergermann ist im Ingenieurbüro Schlaich Bergermann und Partner in Stuttgart tätig. Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek war Mitarbeiter in diesem Büro. Er leitet jetzt das Institut für Tragwerksentwurf und Bauweisenforschung der Universität Hannover sowie ein eigenes Ingenieurbüro in Stuttgart.

Schloß, Nutzung als „Wohnkomplex“ für über 2000 Einwohner, erste Stierkämpfe im Jahre 1853 bis hin zu einer grundlegenden Restauration im Jahre 1860.

Zusätzlich zur nun mittlerweile langen Tradition des Stierkampfes wurden „Les Arènes de Nîmes“ in den vergangenen Jahren immer mehr zum kulturellen Mittelpunkt der Stadt und der Umgebung. Das Spektrum der in der grandiosen Kulisse des römischen Bauwerkes durchgeführten Veranstaltungen spannte sich dabei von Operinszenierungen über Popkonzerte bis hin zu Sportveranstaltungen.

Da Nîmes keine Stadthalle besitzt, war die Idee der Stadtverwaltung, die Arena auch während des Winters nutzbar zu machen, eigentlich nur naheliegend. Nachdem ein Architekturwettbewerb für eine Überdachung des unter Denkmalschutz stehenden Gebäudes zu keinem baubaren Konzept geführt hatte, entwarfen und planten die Architekten N. Michelin und F. Geipel zusammen mit den Verfassern das nachfolgend beschriebene Bauwerk (Bilder 1 und 2).



**Bild 1.** Die Überdachung der Arena in Nîmes. Luftaufnahme unmittelbar nach der ersten Montage im Dezember 1988



**Bild 2.** Teilansicht des durch die Überdachung gebildeten Innenraumes

## 2 Denkmalschützerische Aspekte und Vorgaben aus der Nutzung

Alle Entwurfsarbeiten wurden durch denkmalpflegerische Aspekte maßgeblich bestimmt. Unter den gestellten Forderungen sind dabei als wichtigste zu nennen:

- Die Überdachung sollte von außen, aus dem Blickwinkel des Fußgängers, nicht sichtbar sein.
- Die antike Bausubstanz durfte in keiner Weise verändert werden.
- Die Arena sollte während der Sommerzeit ihr gewohntes Erscheinungsbild beibehalten.

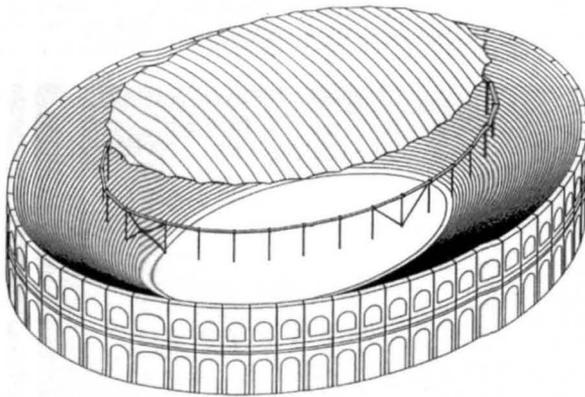
Die letztgenannte Forderung bedeutete die jährliche Montage und Demontage des gesamten Bauwerkes.

Hierzu kamen die Wünsche des Bauherrn:

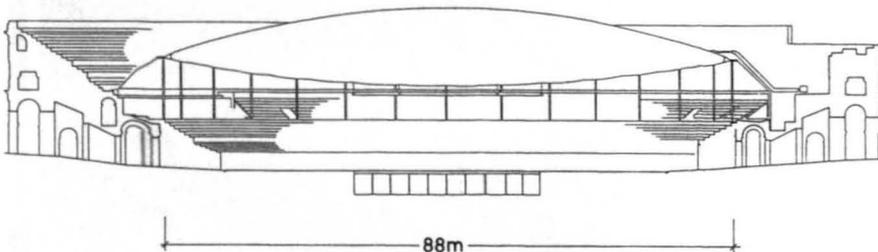
- Möglichst intensive natürliche Belichtung des Innenraumes.
- Eine Vielzahl szenographischer Möglichkeiten für Oper, Rock, Pop, Sport, etc.
- Die Einbeziehung des antiken Bauwerkes in die Szenographie und in den Innenraum.
- Vollkommene Stützenfreiheit auf einer annähernd elliptischen Grundfläche von ca. 60 m × 90 m.
- Platz für ca. 8000 Personen.
- Heizbarkeit des neuen Gebäudes.

## 3 Das Tragwerkskonzept

Die eng gefaßten Randbedingungen, insbesondere die jährliche Montage und Demontage, erforderten ein Bauwerk mit möglichst geringem Gewicht und einem höchstmöglichen



**Bild 3.** Die einzelnen Komponenten des Dachtragwerkes: Das durch Girlandenseile berandete Membrankissen mit dem unterhalb der unteren Membrane angeordneten Seilnetz, der Druckring mit den dreißig Stützen und den Windauskreuzungen an den vier Stirnseiten



**Bild 4.** Längsschnitt durch die Arena und durch das Dachtragwerk. Die sehr flache Form des Membrankissens ist deutlich zu erkennen, der Druckring ist in diesem Maßstab fast nicht mehr wahrzunehmen. Die geneigte Fassade überspannt einen Teil der Sitzplätze. Durch ihre Größe und ihre Anordnung bedingt erlaubt die transparente Fassade die optische Einbeziehung des äußeren Bereiches der Arena in den Innenraum

Grad an einfacher, schneller Zerlegbarkeit. Die tragende Struktur allein wurde somit Architektur, alle Teile des Tragwerks wurden multifunktional.

Das Tragwerk besteht aus einem annähernd elliptischen Stahlring mit einem darin eingehängten Membrankissen. Der äußerst flexible Stahlring wird durch das unter ständigen inneren Überdruck stehende Luftkissen vorgespannt und gleichzeitig stabilisiert. Diese in sich völlig steife Struktur ruht auf 30 Stützen mit gelenkigen Fußpunkten. Stahlring und Kissen sind somit schwimmend gelagert, Zwängungsprobleme infolge Temperaturbeaufschlagung treten nicht auf. Zur Abtragung der horizontalen Kräfte sind an den Scheitelpunkten des Ringes (Grundriß) Seilaukreuzungen angeordnet (Bild 3).

Die Hauptachsen des Membrankissens haben Abmessungen von ca. 57 m × 88 m. Die Oberseite des Kissens hat einen Stich von ca. 8,20 m.

Die obere Membrane besteht aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe mit einer Dicke von ca. 1 mm. Aus architektonischen Überlegungen konnte für die Unterseite lediglich ein Stich von 4,20 m zugelassen werden. Die untere Membrane wurde deshalb auf ein Seilnetz aufgelegt; im gleichen Zug konnte die erforderliche Reißkraft der unteren Gewebemembrane wesentlich reduziert werden. Dadurch wurde gleichzeitig die Transluzenz des Kissens erhöht (Bild 4).

Um ein schnelles Montieren der Membranen am Stahlring zu ermöglichen, wurden obere wie untere Membrane mit je 30 Girlandenseilen eingefast. Diese Girlandenseile wurden dort am Ring angeschlossen, wo sich auch eine Stütze befindet, d.h. das gesamte Kissen ist nur an 30 Punkten mit dem Ring verbunden.

Das die untere Membrane stützende Seilnetz wurde über Radialseile ebenfalls an die Stützen angeschlossen. Alle Montageanschlüsse wurden somit im Bereich des Stützenkopfes gebündelt. Dies erleichtert die Montage- und Demontearbeiten. Da die gesamte Krafteinleitung in diesem Bereich erfolgt, verläuft der Ring von Stütze zu Stütze geradlinig, wird somit zum Polygon.

Im Zentralbereich des die untere Membrane stützenden Seilnetzes wird ein Rost (21 m × 28 m) aus Gitterträgern angehängt, der eine Vielzahl szenographischer Einrichtungen wie Lautsprecher und Beleuchtungen trägt.

Zwischen dem das Membrankissen umfassenden Stahlring und einem zweiten, unteren Stahlring spannt sich eine geneigte Fassade. Sie besteht aus 480 Lamellen aus aluminiumverstärktem Polycarbonat. Diese im Querschnitt hohlkastenförmigen Träger haben eine Spannweite von 6,35 m bei einer Bauhöhe von 15 cm. Sie sind vollkommen transparent und können um ihre Längsachse gedreht werden. Hierdurch wird eine zusätzliche Belüftung des Innenraums möglich.

#### 4 Besonderheiten bei Lastannahmen und Schnittkraftermittlung

Nîmes liegt am Rande des Rhônetales und ist damit den bis zu 200 km/h schnellen Windströmungen des Mistral ausgesetzt.

Durch die in der existierenden Arena quasi „versenkte“ Anordnung der Überdachung wird die Oberfläche des Bauwerkes einer ausschließlichen Sogbelastung unterworfen. Die dadurch entstehenden abhebenden Kräfte werden durch windinduzierten Überdruck im Innenraum verstärkt.

Um das extrem leichte Tragwerk mit dem geringstmöglichen Aufwand in der Arena verankern zu können, wurden Versuche im Windkanal unerlässlich. Hierzu wurden die antike Arena, das zu errichtende Tragwerk sowie ein Ausschnitt der Innenstadt von Nîmes mit einem Durchmesser von 300 m im Maßstab 1:150 nachgebaut. Die Windlastverteilung wurde sowohl bei laminarer wie auch turbulenter Strömung an 282 Punkten der Außenfläche der Überdachung sowie im Innenraum des Bauwerkes gemessen. Um die ungünstigsten Druckwerte im Innenraum zu erhalten, wurden verschiedene Kombinationen von geöffneten bzw. geschlossenen Türen untersucht. Mit zusätzlicher Variation der Anströmwinkel ergaben sich so die maßgebenden Windlastwerte (Bilder 5 und 6).

Die Schneelastannahmen werden durch die französischen Normen geregelt und zu  $0,9 \text{ kN/m}^2$  vorgeschrieben. Auf dem Membrankissen können somit theoretisch 3600 kN Schnee liegen. Dies entspricht nahezu dem doppelten Eigengewicht des gesamten Bauwerkes.

Die vergleichsweise großen Deformationen des Tragwerkes unter äußeren Lasten – der Pol der Membrane wird bei extremer Windbelastung um bis zu 1,50 m angehoben – machten eine geometrisch nichtlineare Berechnung notwendig. In diese Berechnungen wurde stets das gesamte Tragwerk, also die Stützen, der Stahlring, obere und untere Membrane sowie das Seilnetz einbezogen. Aufgrund der großen Verformungen wurden sowohl die den Kisseninnendruck wie auch die die Windlasten repräsentierenden Lastvektoren als nichtkonservativ behandelt.

Unter Zugrundelegung der allgemeinen Gaszustandsgleichung wurde mit zusätzlichen Betrachtungen sichergestellt, daß der Kisseninnendruck infolge des durch Windanströmung bedingten Aufwölbens der Oberhaut nicht zu klein werden konnte, beziehungsweise daß die zugehörigen Deformationen der Unterhaut in akzeptablen Grenzen verblieben.

#### 5 Das Membrankissen

Das Membrankissen besteht aus vier Einzelmembranen: der oberen und der unteren Membrane, der Verschlussmembrane sowie der transparenten Girlandenmembrane (Bild 7). Obere wie untere Membrane werden durch Girlandenseile eingefasst und durch sie punktförmig an den Stahlring angeschlossen. Die Verbindung von oberer und unterer Membrane wird durch die Verschlussmembrane hergestellt. Durch die punktuelle Befestigung des Kissens entstehen zwischen den Girlandenseilen und dem Ring längliche Öffnungen. Sie werden durch die transparente Girlandenmembrane geschlossen.

Wegen der häufigen Montagen bzw. wegen der saisonalen Einlagerungen wurden alle Membranen aus den bewährten, gegen mehrmaliges Knicken und Falten weitestgehend unempfindlichen PVC-beschichteten Polyestergeweben hergestellt.

Die obere Membrane besteht aus einem Material entsprechend GÜWA Typ IV mit einem Flächengewicht von

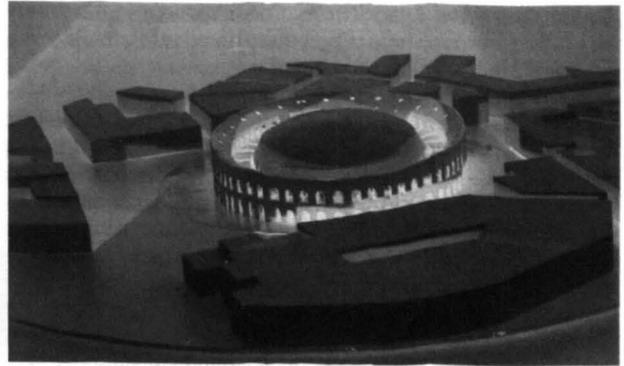


Bild 5. Das Windkanalmodell umfaßt die Arena, ihre Überdachung und einen Teil der Innenstadt von Nîmes

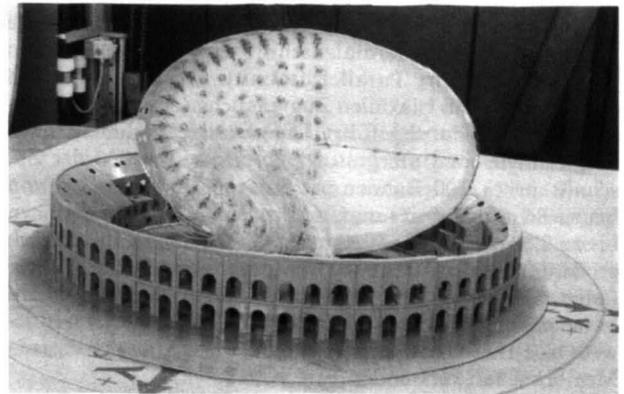


Bild 6. Windkanalmodell: Um die Anzahl der einzubauenden Druckmeßpunkte zu reduzieren, wurde nur die halbe Überdachung mit Meßpunkten versehen. Durch Umsetzen der Überdachung innerhalb des Arenamodells wurden die Druckbeiwerte für die Gesamtstruktur gewonnen

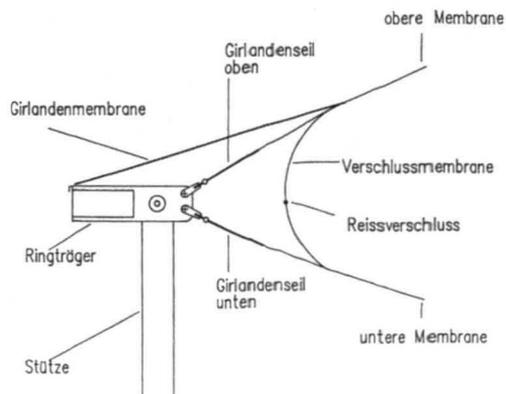


Bild 7. Vertikalschnitt durch das Dach im Bereich seines äußeren Randes

$1300 \text{ gr/m}^2$  und einer Reißfestigkeit im Kurzzeitzugversuch ( $23^\circ\text{C}$ ) von  $149 \text{ kN/m}$  in Kett-,  $128 \text{ kN/m}$  in Schußrichtung. Die einzelnen Bahnen wurden durch 4fach übernähte 80 mm-HF-Nähte verbunden.

Entsprechend ihrer geringeren statischen Beanspruchung konnte für die untere Membrane auf ein Material GÜWA Typ II zurückgegriffen werden. Die Kurzzeitzugfestigkeiten liegen hier bei  $88 \text{ kN/m}$  in Kett-,  $79 \text{ kN/m}$  in Schußrichtung. Die Flächennähte bestehen aus 60-mm-HF-Schweißnähten.

Zu Wartungs- und Inspektionsarbeiten wurde in die untere Membrane ein Einstieg eingebaut. Er erlaubt ein Begehen des unter Überdruck stehenden Kissens.

Die Verschlussmembrane besteht ebenfalls aus einem Material GÜWA Typ II. Sie ist mit 60-mm-HF-Schweißnähten an der oberen wie der unteren Membrane befestigt. Die entlang ihres Äquators geteilte Verschlussmembrane kann über einen Reißverschluß und einen parallel verlaufenden, die eigentliche Kraftübertragung übernehmenden Schlaufenverschluß geschlossen werden.

Die Girlandenmembrane ist als einzige der vier Membranen nicht luftgestützt. Um die girlandenförmige Geometrie der Kissensrandes und den Übergang vom Ring zur Fassade sichtbar zu lassen, wurde für die Girlandenmembrane eine stark lichtdurchlässige Qualität gewählt. Die Kurzzeitzugfestigkeiten liegen hier bei 60 kN/m in Kett- und 56 kN/m in Schußrichtung. Die Flächennähte sind 60-mm-HF-Schweißnähte.

Die Randbereiche der oberen wie der unteren Membrane wurden durch einen Radialzusschnitt erzeugt, ihre zentralen Bereiche mit einem Parallelzusschnitt. Die Kompensation wurde mit den aus biaxialen Zugversuchen ermittelten Materialkennwerten durchgeführt. Die gesamte Zusschnittsermittlung erfolgte computergestützt. Insgesamt besteht der Zusschnitt aus ca. 500 Bahnen mit einer maximalen Länge von bis zu 84 m und einer maximalen Breite der Einzelbahnen bis zu 2,50 m. Die ca. 4000 m<sup>2</sup> große obere und die ähnlich große untere Membrane wurden jeweils zu einem Stück gefertigt. Die Girlandenmembrane wurde an die obere Membrane ankonfektioniert. Von der Verschlussmembrane ist jeweils eine Hälfte mit der oberen, die andere mit der unteren Membrane fest verbunden.

Der Überdruck im Membrankissen wird durch eine ca. 10 m vom Kissen entfernte Gebläseanlage, die über zwei große Zuluftrohre mit dem Kissen verbunden ist, erzeugt.

Die Gebläseanlage besteht aus zwei elektrisch- sowie zwei dieselgetriebenen Gebläsen. Ein einzelnes Gebläse genügt zur Aufrechterhaltung des Kissensinnendruckes, die anderen dienen als Reserve. Die im Normalfall aktiven Elektrogebläse wurden mit Schalldämpfern ausgestattet, so daß sie vom Zuschauerraum aus akustisch nicht wahrnehmbar sind. Die Gebläseanlage befindet sich auf einer durch abgetragene Sitzstufen gebildeten Plattform außerhalb der Überdachung. Zwei Gitterträger nehmen die Zuluftrohre auf und führen sie an die Peripherie des Kissens. Der Übergang von den Zuluftrohren in das Kissen erfolgt mit flexiblen, drahtarmierten Membranschläuchen. Hierdurch wurden starre Punkte innerhalb der sich unter Lasteinwirkung deformierenden Membrane vermieden. Die Gitterträger stützen sich mit je einer V-förmigen Pendelstütze auf den Stützen der Überdachung ab. Die Deformationen des Druckringes haben dadurch keinen Einfluß auf Gitterträger und Zuluftrohre (Bild 8).

Die Regelung des Kissendruckes erfolgt automatisch über eine Drehzahlregelung der Gebläse. Eine im Kissen befindliche Druckmeßeinrichtung liefert dabei die Meßwerte für die Steuerung. Der Kissendruck beträgt 0,4 kN/m<sup>2</sup>. Er wird bei Temperaturen unterhalb von 10 °C automatisch auf 0,55 kN/m<sup>2</sup> erhöht. Bei extrem starkem Schneefall kann er manuell weiter gesteigert werden.

Die gesamte Drucksteuerungseinrichtung für das Kissen ist mit umfassenden Sicherungs- und Alarmanrichtungen ausgestattet. Während turnusmäßiger Wartungsarbeiten an den Sicherheitseinrichtungen, d. h. bei abgeschalteter Sicherungs- und Alarmanlage, kam es im Herbst 1989 zu einem vom Bedienungspersonal nicht bemerkten Druckanstieg im Kissen, der letztlich zu einem Riß in der oberen Membrane



**Bild 8.** Ansicht der Gebläseanlage mit den Zuluftrohren. Die gesamte Anlage ist in Komponenten zerlegbar. Sie wird mit der Überdachung in die Arena ein- bzw. ausgebaut

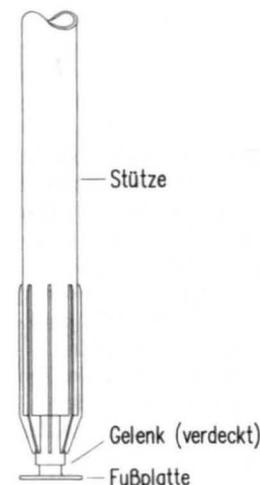
führte. Die Reparaturarbeiten an der Membrane konnten bereits 24 Stunden später beginnen, drei Tage darauf konnte das Kissen wieder aufgeblasen werden.

## 6 Das Stahltragwerk

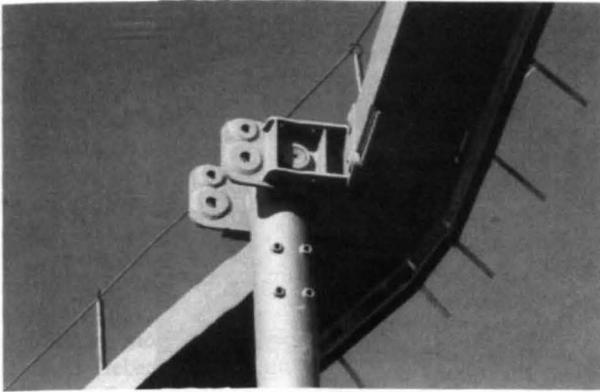
Das Stahltragwerk setzt sich aus 30 Stützen, dem Ringträger, dem unteren Seilnetz sowie den Windaussteifungen zusammen.

Die Stützen bestehen aus Stahlrohren 298 mm × 20 mm. Sie haben an ihrem Fuß jeweils ein sphärisches Gelenk. Zusammen mit einer kleinen Fußplatte sind diese Gelenke Bestandteil der Stütze, d. h. nach der Stützendemontage im Frühjahr verbleibt nur noch die Fundamentplatte in der Arena (Bild 9).

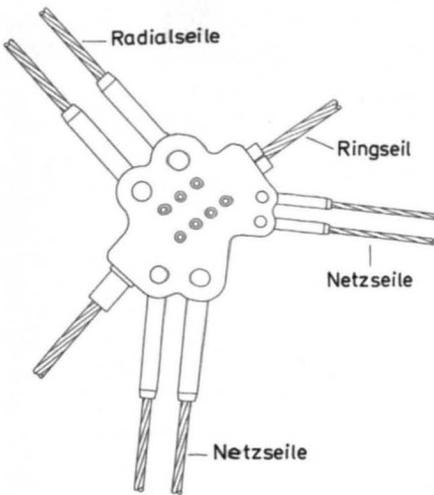
Der polygonale Ringträger, ein Hohlkasten mit 300 mm Höhe, 500 mm Breite und 25 mm Wanddicke, setzt sich aus 30 Einzelsegmenten, die jeweils durch zwei Bolzen miteinander verbunden werden, zusammen. Die Stöße dieser Ringträgererelemente liegen unmittelbar neben den sogenannten Ringknoten, die den exzentrisch angeordneten Ring mit den Stützen verbinden und die an ihrer Vorderkante die Girlandenseile bzw. die Radialseile des Seilnetzes aufnehmen. Die Verbindung von Ring und Stütze erfolgt mit Bolzen von jeweils 100 mm Durchmesser (Bild 10).



**Bild 9.** Die Fußpunktausbildung der Stützen. Das Gelenk befindet sich, geschützt, im untersten Bereich des kleinen Rohres. Die Fußplatte ist permanenter Bestandteil der Stütze, d. h. sie wird zusammen mit ihr ein- und ausgebaut



**Bild 10.** Druckring und Stütze werden im Bereich des Ringknotens durch einen Bolzen verbunden. Am vorderen Rand des Ringknotens sind vier Bohrungen zu erkennen, über die später das Kissen mittels Bolzen angeschlossen wird



**Bild 11.** Ringseilknoten: Alle Seilanschlüsse erfolgen über Bolzenverbindungen. Das Ringseil wird zwischen die beiden Bleche des Knotens in einen Sattel eingelegt. Der gewichtsminierte Knoten ist sehr „weich“ geformt und er hat ausschließlich gerundete Kanten, da die untere Membrane unmittelbar auf ihm aufliegt



**Bild 12.** Einer der (Ringseil-)Knoten, die den orthogonalen inneren Teil des Seilnetzes mit dem Ringseil und den Radialseilen verbinden

Der Stahlring darf als einziges Bauteil während der Sommerzeit in der Arena verbleiben. Er wird hierzu auf einer der Sitzstufen der Arena „geparkt“, so daß er nahezu kaum in Erscheinung tritt. Aufgrund einiger geometrischer Besonderheiten in der Arena müssen aus dem geschlossenen Ring jeweils einige Elemente herausgenommen werden, bevor er auf den Sitzstufen abgelegt werden kann. Die Einfügung des Ringes in die Parkposition, also seine Anpassung an das existierende Bauwerk, bedingte die Geometrie des Ringes sowie seine maximalen Querschnittsabmessungen.

Das Seilnetz besteht aus einem inneren, orthogonalen Bereich, der durch ein elliptisches Ringseil begrenzt wird, und dreißig Radialseilen, mit denen das Netz an den Stützen angeschlossen wird. Alle Seile wurden als dünnadrige Spiralseele und, mit Ausnahme des Ringseiles, als Doppelseile ausgeführt. Dies gewährleistet eine größtmögliche Flexibilität bei der Montage/Demontage. Die Seildurchmesser liegen zwischen 22 mm und 45 mm (Bilder 11 und 12).

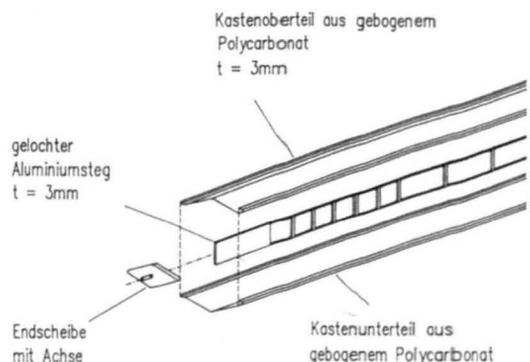
### 7 Die Fassade

Aufgrund architektonischer Überlegungen sollte die Fassade vollkommen transparent sein. Sie mußte des weiteren leicht montierbar sowie drehbar, d. h. zu öffnen sein (Bild 13).

Die speziell für das Bauwerk entwickelte Fassade besteht aus einzelnen „Lamellen“ mit rautenförmigem Hohlkastenquerschnitt, 450 mm breit und 150 mm hoch. Jeder Hohlkasten besteht aus 3 mm starken, abgekanteten Polycarbonatplatten. Er wird durch ein Aluminiumprofil mit schmalen Flanschen und großen Stegöffnungen verstärkt (Bild 14).



**Bild 13.** Ein Ausblick durch die Fassade vermittelt einen Eindruck von deren hoher Transparenz



**Bild 14.** Konstruktionsprinzip eines einzelnen Fassadenelementes

Die Endscheiben der Elemente bestehen aus Aluminiumdruckguß. In diese Endscheiben wurden Achsen eingearbeitet, mit denen die etwa 20 kg schweren Fassadenelemente in die beiden Stahlringe eingehängt werden. Die somit um ihre Längsachse rotierbaren Lamellen können durch eine Antriebsstange, die exzentrisch am Lamellenende angreift, um bis zu 90 Grad gedreht werden. Aufgrund des Rautenquerschnittes des Hohlkastens wird die Fassade damit geöffnet, d. h. es entsteht eine sehr effektive, natürliche Belüftung des Innenraumes. Gleichzeitig konnte hierdurch auf den Einbau von Rauchabzugsklappen verzichtet werden.

Die Wärmeausdehnungskoeffizienten von Polycarbonat und Aluminium sind stark unterschiedlich. Um Zwängungsbeanspruchungen zu vermeiden, wurde das zentrale Aluminiumprofil schwimmend gelagert und nur in Feldmitte mit dem Hohlkasten verbunden. Hohlkasten und Aluminiumprofil können sich somit unabhängig voneinander verformen, gleichzeitig tragen sie äußere Lasten gemeinsam ab.

## 8 Montage und Demontage

Eine wirtschaftliche Durchführung der jährlichen Montage und Demontage des gesamten Bauwerks erforderte die Entwicklung einer in hohem Maße auf die Besonderheiten des Bauwerks abgestimmten Montage/Demontagemethode. Unter Verwendung speziell hierzu gefertigter Hilfsmittel ist die Montage/Demontage des gesamten Bauwerks einschließlich der Heizungsanlage, der Beleuchtungseinrichtungen etc. innerhalb von nur drei Wochen möglich.

Ein Montagevorgang kann in folgende wesentliche Schritte gegliedert werden:

- Aufstellen jeder zweiten der insgesamt 30 Stützen. Auf den Stützen ist bereits eine hydraulische Hub-/Senkvorrichtung installiert. Provisorische Abspannung dieser Stützen.
- Einheben derjenigen Ringträgererelemente, die während der Sommerperiode nicht in der Arena abgelegt werden konnten. Schließen des Ringes.
- Heben des Ringes mit den auf den 15 bereits installierten Stützen befindlichen hydraulischen Hubeinrichtungen. Verbinden des Ringes mit den Stützen.
- Montage der restlichen 15 Stützen.
- Einbau der speziell für den Hub-/Absenkvorgang des Kissens benötigten Auslegerträger.
- Montage der Gebläseeinrichtung.
- Auslegen des Seilnetzes sowie der unteren und der oberen Membrane auf der Sandpiste.
- Schließen der Verschlussmembrane, Montage der Girlandenseile. Befestigung des Kissens an den dreißig Auslegerträgern.
- Heben des Kissens, Befestigung des Kissens am Ring, Aufblasen.
- Einbau der Fassade, gleichzeitig Ausbau der Auslegerträger.
- Einbau des szenographischen Grills und der Heizungsanlage.

Die Demontage erfolgt in der umgekehrten Reihenfolge der Montage.

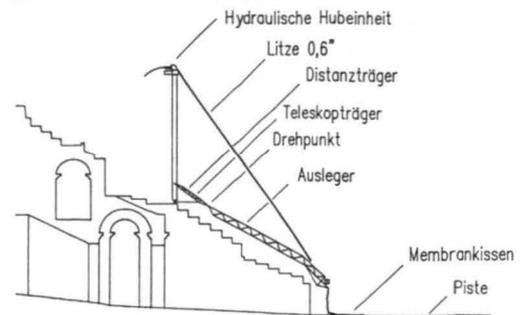
Die einzelnen Montagearbeiten werden durch eine Vielzahl von Detaillösungen, wie leicht lösbare Verbindungen, unverwechselbare Verbindungsmittel und geringes Gewicht der zu bewegendenden Bauteile erleichtert.

Als Besonderheit hinsichtlich ihrer technischen Lösung sind das Heben des Ringes und das Heben des Kissens zu erwähnen:

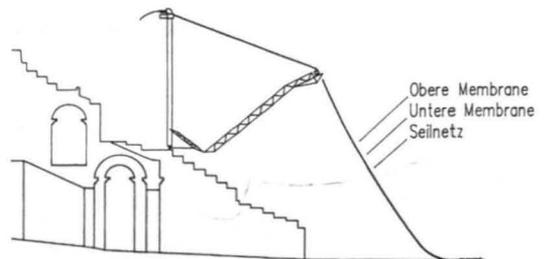


Bild 15. Das Heben des Druckringes

Vor dem Heben des Kissens



Während des Hebens des Kissens



Endposition

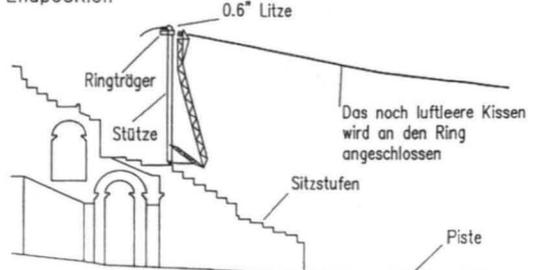


Bild 16. Heben bzw. Absenken des Kissens: Prinzipdarstellung

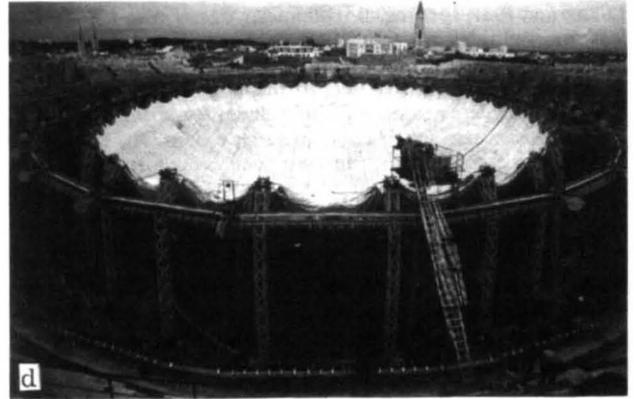
Der flexible, 250 m lange und 70 t schwere Ring muß bei seiner Montage um insgesamt 10 m angehoben werden. Er wird hierzu an 15 Punkten mit 0,6"-Litzen in die auf den Stützen befindlichen Hubeinheiten eingehängt. Die Litzen werden anschließend durch die Hubeinheiten nach oben gezogen. Durch den gemeinsamen Ölkreislauf der Hydraulikeinrichtungen und durch den gleichen Kolbenhub bedingt, ist der Hubvorgang in hohem Maße synchron. Das Heben des Druckringes erfolgt in weniger als einer Stunde. Die Stützen des Bauwerkes dienen hier vorübergehend als Kranmaste. Es ist wichtig zu bemerken, daß dieser Hubvorgang nur durch die exzentrische Anordnung des Ringes gegenüber den Stützen möglich ist (Bild 15).

Zum Heben des Membrankissens werden die auf den Stützen befindlichen Hubeinheiten in eine neue Position gekippt. Anschließend werden die 0,6"-Litzen an den vorderen Enden der Auslegerträger befestigt. Während die Litzen durch die Hubeinheiten gezogen werden, kippen die Auslegerträger um ihre Ruhepunkte (Bilder 16, 17).

Diese Ruhepunkte befinden sich jeweils an der vorderen Ecke des aus Stütze, Distanzträger und Teleskopträger gebildeten Dreiecks.

Die Teleskopträger sind durch zwei Stellschrauben auf einfachste Weise längenverstellbar. Hierdurch läßt sich die Lage des Ruhepunktes justieren, was wiederum eine millimetergenaue Justierung der Spitze der Gitterträger ergibt. Dies ermöglicht es, daß die Bolzenlöcher an den Knoten des Druckringes und die Bolzenlöcher an den Beschlägen des Kissens am Ende des Hubvorganges perfekt übereinanderliegen. Die Bolzen können so sehr einfach gesetzt werden. Zügiges Arbeiten ist in dieser Phase des Montagevorganges wichtig, da die gesamte Membrane frei schwebt.

Da die während des Hubvorganges von den Hydraulikeinheiten auf die Stützenköpfe übertragenen Horizontalkräfte innerhalb des Druckringes kurzgeschlossen werden, ist ein hohes Maß an Synchronität während des Hebens erforderlich, um den noch nicht durch das Kissen ausgesteiften Ring nicht durch Biegung zu hoch zu beanspruchen. Aus



**Bild 17 a–e.** Heben des Kissens; **a** Durch die abgeknickte Form der Auslegerträger wird das Einklinken des Kissens auf der Piste vereinfacht, **b** Nach ca.  $\frac{1}{3}$  des Hubweges, **c** Nach ca.  $\frac{2}{3}$  des Hubweges, **d** Erst in der letzten Phase des Hebevorganges verliert das Kissen den Bodenkontakt. Die 4000 m<sup>2</sup> große Membranfläche schwebt jetzt wie ein Segel, **e** Das Kissen unmittelbar nach dem Aufblasen

diesem Grund wird auch während der letzten 500 mm des Hubvorganges des Membrankissens, also der Phase, in der die Pressenkräfte sprunghaft bis auf 250 kN ansteigen, der Kolbenhub der Hubeinheiten durch Einbau einer Sperre auf 50 mm begrenzt.

Während des Hebens des Membrankissens gewährleisten der gemeinsame Ölkreislauf sowie das taktartige Arbeiten der Hubeinrichtung wiederum die erforderliche Präzision des Vorgangs.

Am Ende des Hubvorgangs wird das Membrankissen durch Bolzen mit dem Ringträger verbunden. Unmittelbar danach erfolgt das Aufblasen.

Der gesamte Vorgang, vom Beginn des Hebens des Membrankissens bis zur Beendigung des Aufblasens, dauert ungefähr fünf Stunden.

## 9 Die Beteiligten

- *Bauherr*: Ville de Nîmes
- *Architekten*: LAB F AC, Paris. Finn Geipel und Nicolas Michelin
- *Tragwerksentwurf und Ausführungsplanung*: Schlaich Bergermann und Partner, Stuttgart. Dipl.-Ing. Rudolf Ber-

germann, Prof. Dr.-Ing. Werner Sobek und Dipl.-Ing. (FH) Jochen Bettermann

- *Mitarbeit bei der statischen Berechnung*: Prof. Dr.-Ing. Theo Angelopoulos.
- *Mitarbeit bei der Montageplanung*: Dipl.-Ing. Horst Dürr
- *Windgutachten*: Institut für Aero- und Gasdynamik, Universität Stuttgart. Dr.-Ing. Günter Schwarz
- *Prüfingenieure*: SOCOTEC, Paris und Nîmes
- *Stahlbauarbeiten*: Baudin Chateauneuf, Chateauneuf-sur-Loire, und Gargigni-Reynard, Nîmes
- *Membrankonfektionär*: Stromeyer Ingenieurbau, Konstanz
- *Gebälseeinrichtungen*: Nolting, Detmold
- *Fassade*: Merlo, Turin
- *Hydraulische Hubeinrichtung*: 3F Engineering, Bangkok

## Literatur

1. Bergermann, R.; Sobek, W.: Covering "Les Arenes de Nîmes" with an air-inflated fabric structure. Proc., 1. Internationales Textextil-Symposium Frankfurt. Frankfurt 1989
2. Schlaich, J.; Bergermann, R.; Sobek, W.: Tensile membrane structures. Bull. of the Intern. Assoc. for Shell and Spatial Struct. (IASS). Madrid, Bd. 31, 1–2 (1990)