

**Zeitschrift:** Bauen + Wohnen = Construction + habitation = Building + home : internationale Zeitschrift

**Herausgeber:** Bauen + Wohnen

**Band:** 21 (1967)

**Heft:** 6

**Artikel:** Deutscher Pavillon an der Weltausstellung in Montreal = Pavillon allemand de l'exposition universelle de Montréal = German pavilion at the Montreal Expo

**Autor:** Minke, Gernot

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-332882>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 08.02.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Deutscher Pavillon an der Weltausstellung in Montreal

als Beispiel für die Materialisierung der konstruktiven Idee bei zugbeanspruchten Tragwerken\*

Pavillon allemand de l'Exposition universelle de Montréal

Exemple de la matérialisation de l'idée architectonique dans les appareils porteurs soumis à la traction

German Pavilion at the Montreal Expo  
An example of the realization of the structural conception of traction supports

## Zum Entwurf zugbeanspruchter Tragwerke

Die Formenwelt zugbeanspruchter Tragwerke ist sehr groß und erweitert sich um so mehr, je tiefer man in dieses Gebiet eindringt. Doch ist ein Phänomen immer wieder spürbar: sobald ein bestimmtes konstruktives System gewählt wird, sind die Gestaltungsmöglichkeiten relativ begrenzt. Ein Tragwerksystem läßt zwar viele Formvarianten zu, die Form unterliegt aber stets den konstruktiven Gesetzmäßigkeiten und der Beanspruchung. Der Entwurfsprozeß zugbeanspruchter Tragwerke muß diese Gesetzmäßigkeiten berücksichtigen und kann nicht ohne fortwährende Kontrolle des inneren Kräfteverlaufs erfolgen. Daraus ergeben sich bisher ungewohnte Methoden der Formfindung.

Die Probleme der Materialisierung der konstruktiven Idee bei zugbeanspruchten Tragwerken sollen hier unter besonderer Berücksichtigung der Methoden der Formfindung und der Formermittlung anhand des Projektes für den deutschen Pavillon auf der Weltausstellung in Montreal erläutert werden.

## Kurze Beschreibung des Projekts

Der Pavillon hat eine bevorzugte Randlage an der Regatta-Lagune des St.-Lorenz-Stroms und ist an zwei Seiten von Wasser begrenzt. Die kleine Insel, die mit zum Ausstellungsgelände gehört, wurde in die Gesamtform mit einbezogen (Bild 1).

Der Pavillon ist als Großhülle über einer Ausstellungslandschaft gedacht, die gleichzeitig als Erholungslandschaft dienen soll.

Die Ausstellungslandschaft ist durch Mulden und verschiedenen hohe Terrassen gegliedert. Die Großhülle betont diese Gliederung; sie ist an acht Punkten nach oben gezogen und an drei Punkten nach unten gespannt. Durch die Lichtführung der lichtdurchlässigen »Augen« entsteht eine räumliche Gliederung. Die Wegführung zieht sich spiralförmig über verschieden hohe Terrassenelemente durch diese Ausstellungslandschaft, die sich deutlich von der Idee einer Ausstellungshalle abheben will.

Das Gelände ist etwa ein Hektar groß, die überdeckte Fläche rund 8000 m<sup>2</sup>. Die Ausdehnung beträgt 130 m in der Nord-Süd-Richtung und 100 m in der West-Ost-Richtung. Der größte Mast hat eine Höhe von 38 m.

Die Großhülle besteht aus einem vorgespannten Seilnetz, das sich, sattelförmig

gekrümmt, über acht Maste und drei Abspannpunkte spannt und am Rand von 30 Randseilen gehalten wird, welche die Kräfte aus dem Netz in vorgespannte Felszuganker leiten. Das Netz aus 12 mm starken Stahlseilen setzt sich aus rhombischen Maschen von 50 cm Seitenlänge zusammen. Die schlaufenförmigen Seile an den Hoch- und Tiefpunkten leiten die Kräfte aus der Fläche in die Unterstützungspunkte. Unter dieser Primärstruktur hängt in einem Abstand von durchschnittlich 50 cm als Sekundärstruktur eine vorgespannte Membrane aus PVC-beschichtetem Polyestergewebe, die den Raumabschluß bildet. Sie ist alle 3 bis 5 m<sup>2</sup> mit einem kleeblattförmigen »Federelement« gegen das Seilnetz gespannt. Diese Tellerabspannung bewirkt eine zusätzliche Stabilisierung der Membranfläche und leitet die aus Wind- und Schneebelastungen stammenden Kräfte aus der Haut in das Seilnetz ein (Bilder 29 bis 31).

## Probleme und Methoden der Formfindung

Die äußere Gestalt des Pavillons wurde vom Grundstück beeinflusst. Die Höhengliederung ergab sich aus der Wegführung durch die Ausstellung, aus der Lage des Auditoriums am Eingang, des Restaurants und der Aussichtsterrasse an der Süd-Ost-Ecke und aus der Betonung der Randlage des Pavillons.

Ferner stand fest, daß für die Überspannung nur ein vorgespanntes Seilnetz in Frage kommt.

Das erste Problem des Formfindungsprozesses war, eine ausreichende sattelförmige Krümmung an allen Stellen des Netzes zu erreichen und die Ränder möglichst tief zu ziehen, um eine nahezu geschlossene Hülle zu gewinnen.

Die exakte Form zu dem gewählten konstruktiven System konnte nur empirisch mit Hilfe von Modellen gefunden werden. Eine

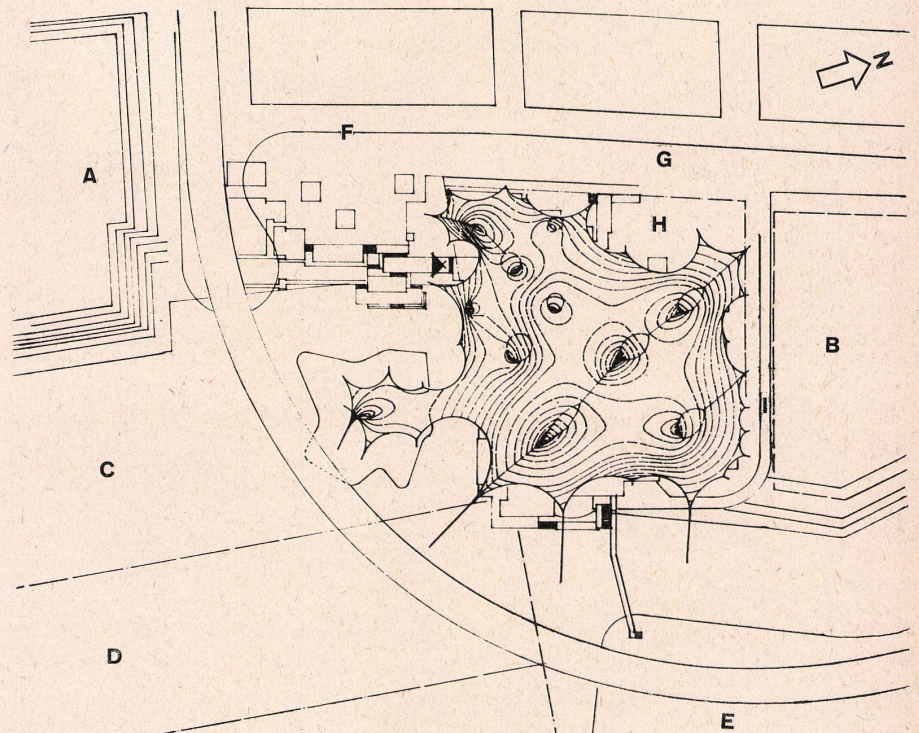
rechnerische Formfindung war nicht möglich, da für die Berechnung dieser Struktur erst die Form bekannt sein mußte.

Der Prozeß zog sich über verschiedene Stadien mit sieben vollständig erstellten Modellen hin. Der erste Abschnitt bestand darin, die Form für die gewählten Randbedingungen zu finden; der zweite, die Form den Belastungen anzupassen.

Für die Formfindung gab es 6 Hauptkriterien:

1. Jeder Netzpunkt soll auf einer antiklastischen (= sattelförmigen) Fläche liegen (d. h. er soll gleichzeitig auf einer positiven und auf einer negativen Krümmung liegen, um nach vier Richtungen im Raum stabilisiert zu sein).
2. Die Richtung des zweiläufigen Netzes muß so angeordnet werden, daß die einzelnen Seile möglichst stark gekrümmt sind.
3. Die Krümmung des Netzes soll über die ganze Fläche möglichst konstant sein. Ebene Zonen müssen vermieden werden, da sie besonders unter Schneelast große Formveränderung erleiden.
4. Die Richtung der Seile soll so angeordnet werden, daß die Maschen, die in der Ebene quadratisch sind, durch die antiklastische Krümmung des Netzes eine möglichst geringe rhombische Verformung erleiden.
5. Die Seilknoten müssen in beiden Richtungen auf harmonischen Kurven liegen, um eine kontinuierliche Spannungsverteilung zu erhalten.
6. Die Spannungen sollen in allen Gebieten möglichst gleich groß sein.

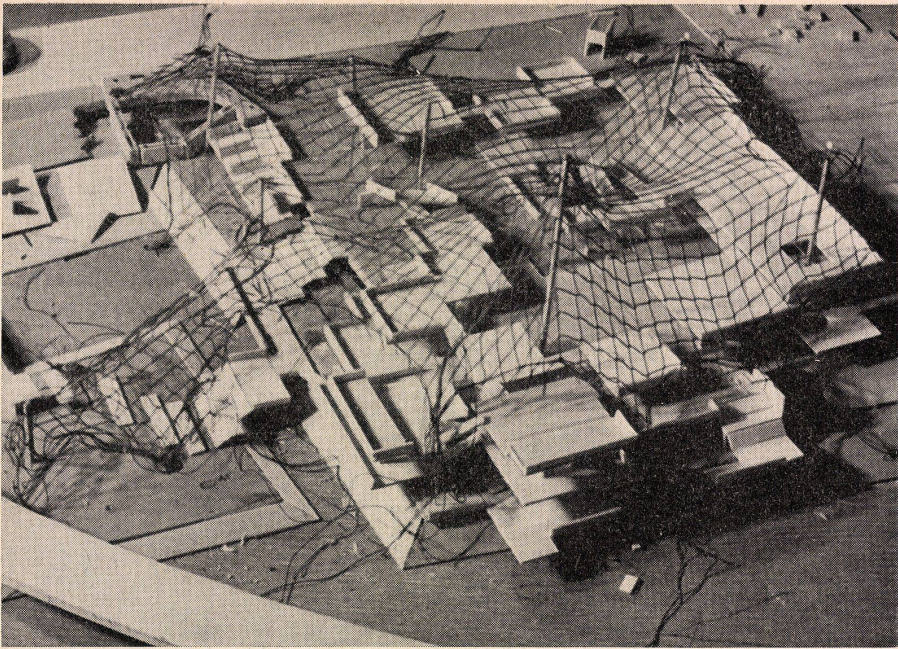
Die letzte Forderung nach gleichen Spannungen in der Fläche würde für eine echte Membrane (= zugbeanspruchte Haut) bedeuten, daß die Minimalfläche gesucht ist. Die Minimalfläche anzustreben, war auch der Ausgangspunkt der Formfindung.



1 Lageplan ca. 1:2000 mit Höhenlinien des Seilnetzes. Situation avec courbe de niveau du filet de câbles. Site plan with contours of the rope network.

- A Ausstellungspavillon Großbritannien / Pavillon de la Grande-Bretagne / Exhibition pavilion, Great Britain
- B Ausstellungspavillon Australien / Pavillon de l'Australie / Exhibition pavilion, Australia
- C Lagune / Lagoon
- D Regattabahn / Bassin pour régates / Regatta track
- E Ausstellungsbahn / Train exposition / Exhibition track
- F Monorail
- G Hauptstraße / Route principale / Main street
- H Plastikhof / Cour matière plastique / Sculpture court

\* Vortrag im Rahmen eines Seminars über zugbeanspruchte Konstruktionen, gehalten an der Architekturabteilung der TH Hannover. Einen Bericht über Studienarbeiten, die innerhalb dieses Seminars entstanden sind, werden wir in einem der nächsten Hefte abdrucken.



2  
Erstes Arbeitsmodell.  
Premier modèle de travail.  
First working model.

Trussing or supporting of a soap slat with two catch ropes.

5  
Abspannung bzw. Unterstützung einer Seifenlamelle mit einer Schlaufe.

Haubannage, respectivement support d'une lamelle de savon au moyen d'un passant.

Trussing or supporting of a soap slat with a loop.

6  
Abspannung bzw. Unterstützung einer Seifenlamelle mit einer Schlaufe. Seitenansicht: Projektion parallel zur Schlaufenebene.

Haubannage, respectivement support d'une lamelle de savon au moyen d'un noeud coulant. Vue latérale: projection parallèle au niveau du passant.

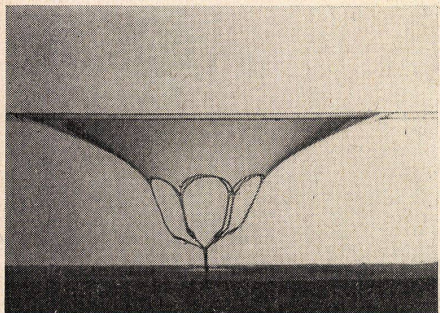
Trussing or supporting of a soap slat with a loop. Lateral view: projection parallel to loop level.

3  
Abspannung bzw. Unterstützung einer Seifenlamelle mit sechs rosettenförmig angeordneten Fangseilen.  
Haubannage, respectivement support d'une lamelle de savon au moyen de 6 câbles contrefiches placés en forme de rosace.

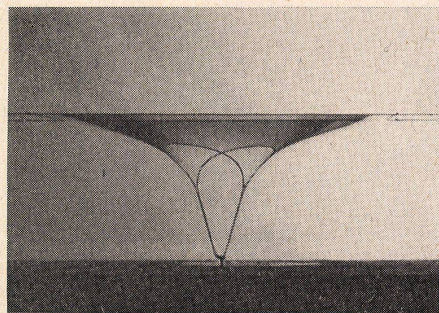
Trussing or supporting of a soap slat with six rosette-shaped arrangements of catch ropes.

4  
Abspannung bzw. Unterstützung einer Seifenlamelle mit zwei Fangseilen.

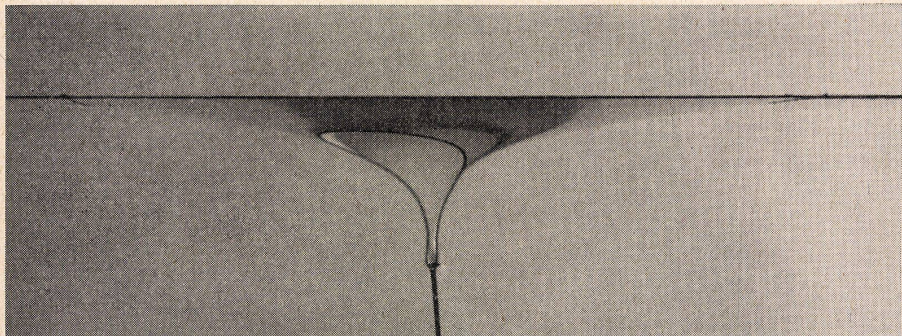
Haubannage, respectivement support d'une lamelle de savon au moyen de deux câbles contrefiches.



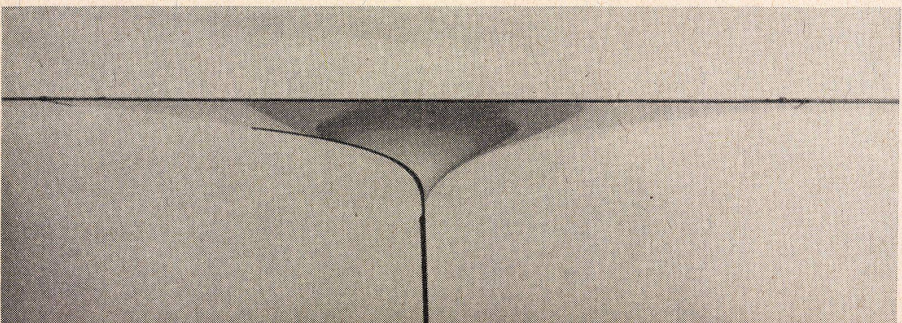
3



4



5



6

Als erstes Arbeitsmodell entstand eine sehr grobe Form aus einem Fischernetzgewebe (Bild 2). Von Anfang an waren acht Masten geplant. Höhe und Lage der Masten wurden auf die Netzform und auf die darunterliegende Ausstellungslandschaft abgestimmt. Im zweiten und dritten Modell aus feinem Diolentüll konnte die Form wesentlich genauer ausgearbeitet werden. Einzelne Partien wurden immer wieder herausgeschnitten und durch korrigierte Teile ersetzt.

Besonders schwierig war die Ermittlung der Randseilkurven und des Schlaufenverlaufs an den inneren Hoch- und Tiefpunkten. Die Verwendung von inneren Fangseilen (= Schlaufen) zur Stabilisierung und Vorspannung eines Seilnetzes wurde bei diesem Projekt zum ersten Mal realisiert. Die Anwendung dieses neuartigen Tragwerksystems erforderte eine Reihe von Vorversuchen.

Die punktförmige Unterstützung eines Seilnetzes ist konstruktiv schwierig, da im Unterstützungspunkt, in dem sich bestenfalls zwei Seile treffen, sehr hohe Spannungen auftreten, die in erster Linie von diesen zwei Seilen aufgenommen werden müssen. Führt man ein Fangseil ein, das die Kräfte aus einem großen Gebiet des Netzes sammelt und in die Spitze einleitet, hat man relativ gleichmäßige Spannungen in der Fläche. Dieses Fangseil, das in seinen Ausgangspunkt zurückläuft, wird Schlaufen- oder Augenseil genannt.

Die Idee, zugbeanspruchte Häute, also Membranen, mit Schlaufen zu verformen bzw. zu unterstützen, entstand 1963 bei einer Versuchsreihe mit Seifenhäuten in Frei Ottos Entwicklungsstätte für den Leichtbau in Berlin. Es wurden verschiedene Unterstützungsmöglichkeiten untersucht, wobei man zunächst von mehreren Fangseilen in rosettenförmiger Anordnung ausging und dann die Zahl der Fangseile verringerte (Bilder 3 bis 6). Die Kurve der »Schlaufe« ist eine Raumkurve gleicher Krümmung. Sie ist jedoch bislang noch nicht mathematisch bestimmt worden.

Bei einem Seilnetz erfährt diese Kurve eine Formänderung, wenn die Seilmaschen nicht quadratisch, sondern rhombisch sind, wegen die Spannungen bei einem sattelförmigen Seilnetz – auf die Fläche bezogen – im Gegensatz zur Seifenhautmembrane ungleich sind.

Zur Untersuchung der Form schlaufengespannter Netze wurden 1964 einige Modellstudien unternommen (Bilder 7 bis 10). 1966 wurde diese Konstruktionsidee zum erstenmal bei dem Projekt für den Ausstellungspavillon in Montreal angewendet.

7 Schlaufenunterstütztes Seilnetz zwischen acht Randseilen: Seitenansicht.

Filet de câbles supporté par des passants entre 8 câbles marginaux: vue latérale.

Loop-supported rope network among eight peripheral ropes: lateral view.

8 Schlaufenunterstütztes Seilnetz zwischen acht Randseilen: Aufsicht. Die Schlaufe zeigt in der Grundrißprojektion eine kreisähnliche Form.

Filet de câbles supporté par des passants entre 8 câbles marginaux. Vue plongeante. Le nœud coulant présente une forme circulaire dans la projection horizontale.

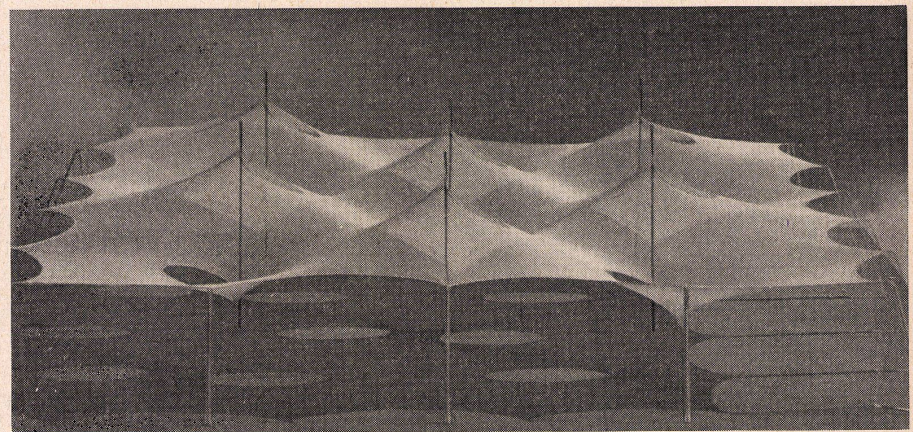
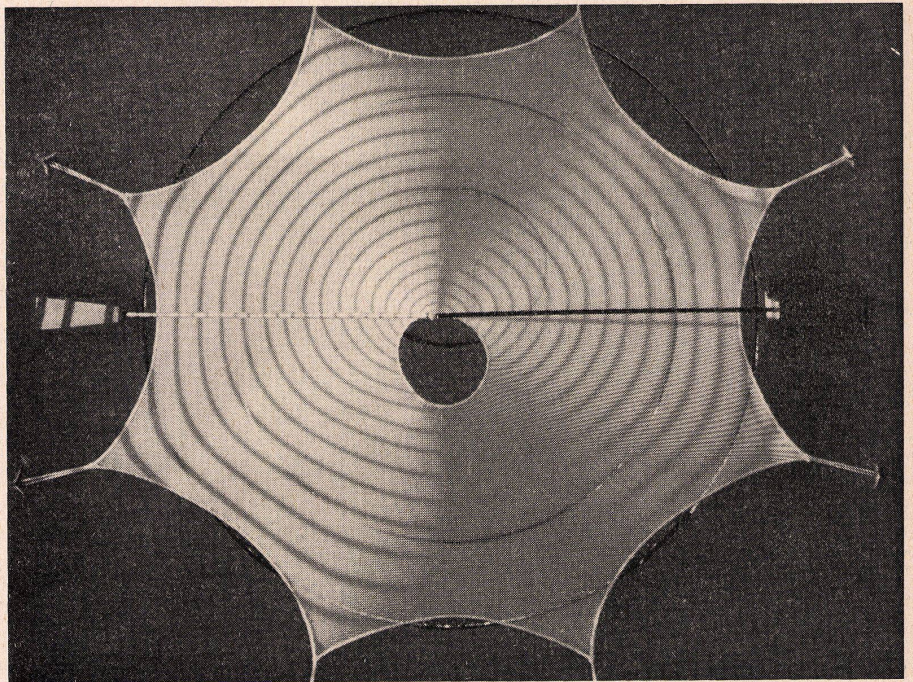
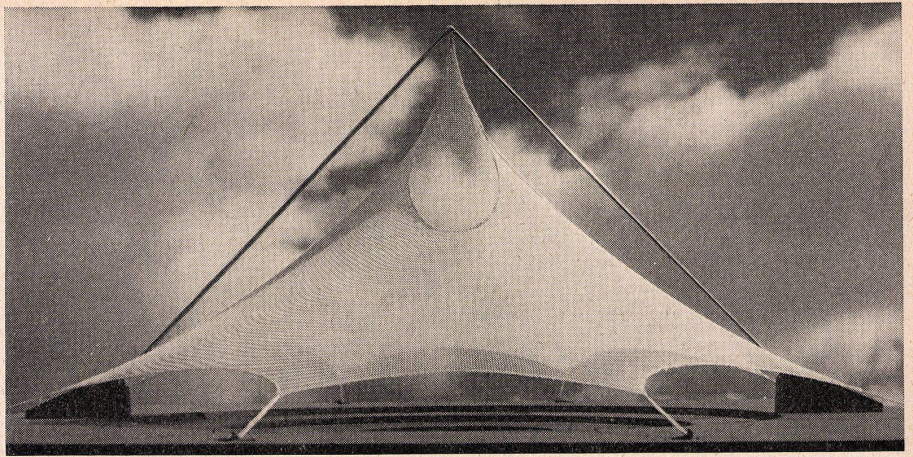
Loop-supported rope network among eight peripheral ropes: top view. The loop displays a circular shape in the plan projection.

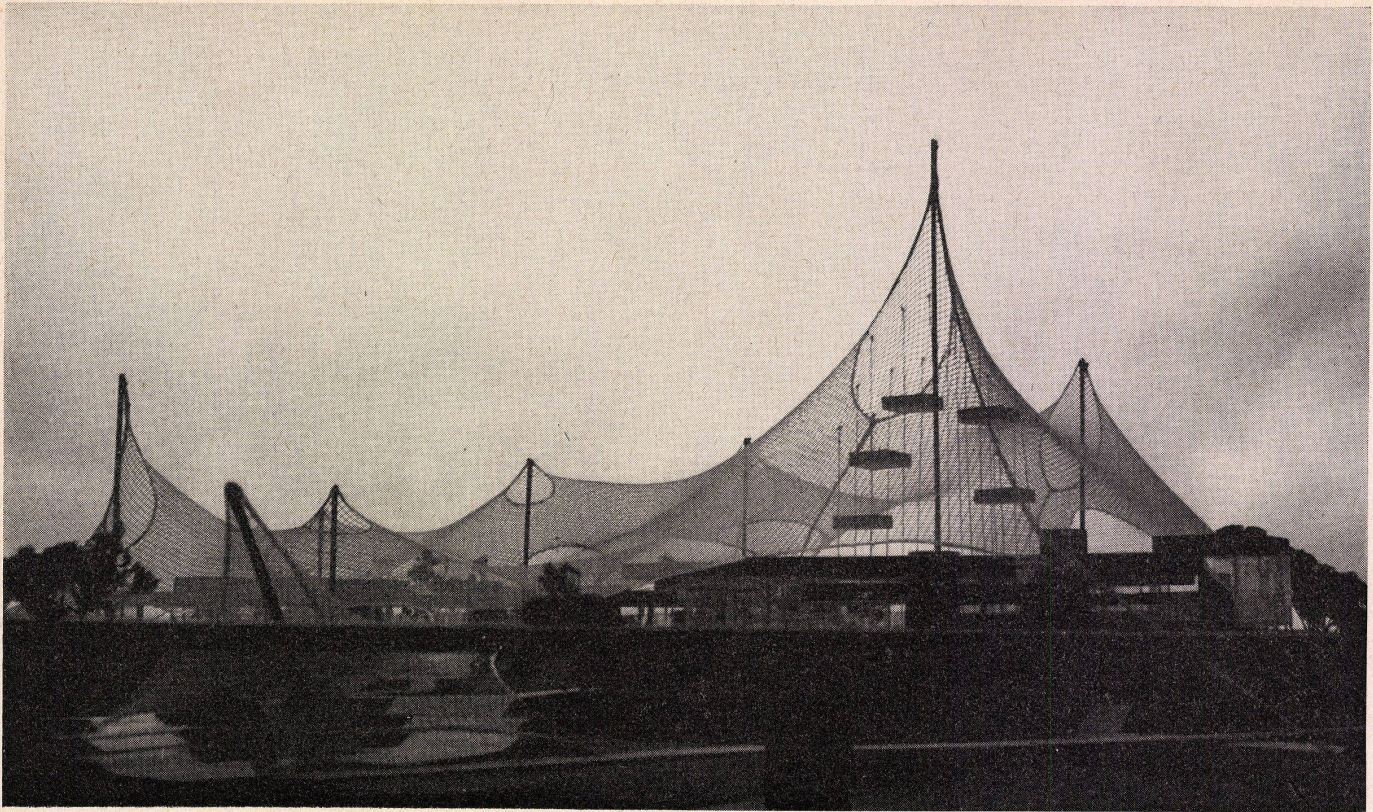
9 und 10

Schlaufenunterstütztes Seilnetz mit Hoch- und Tiefpunkten über regelmäßigem Raster.

Filet de câbles supporté par des passants avec points hauts et bas sur un réseau régulier.

Loop-supported rope network with high and low points above regular grid pattern.

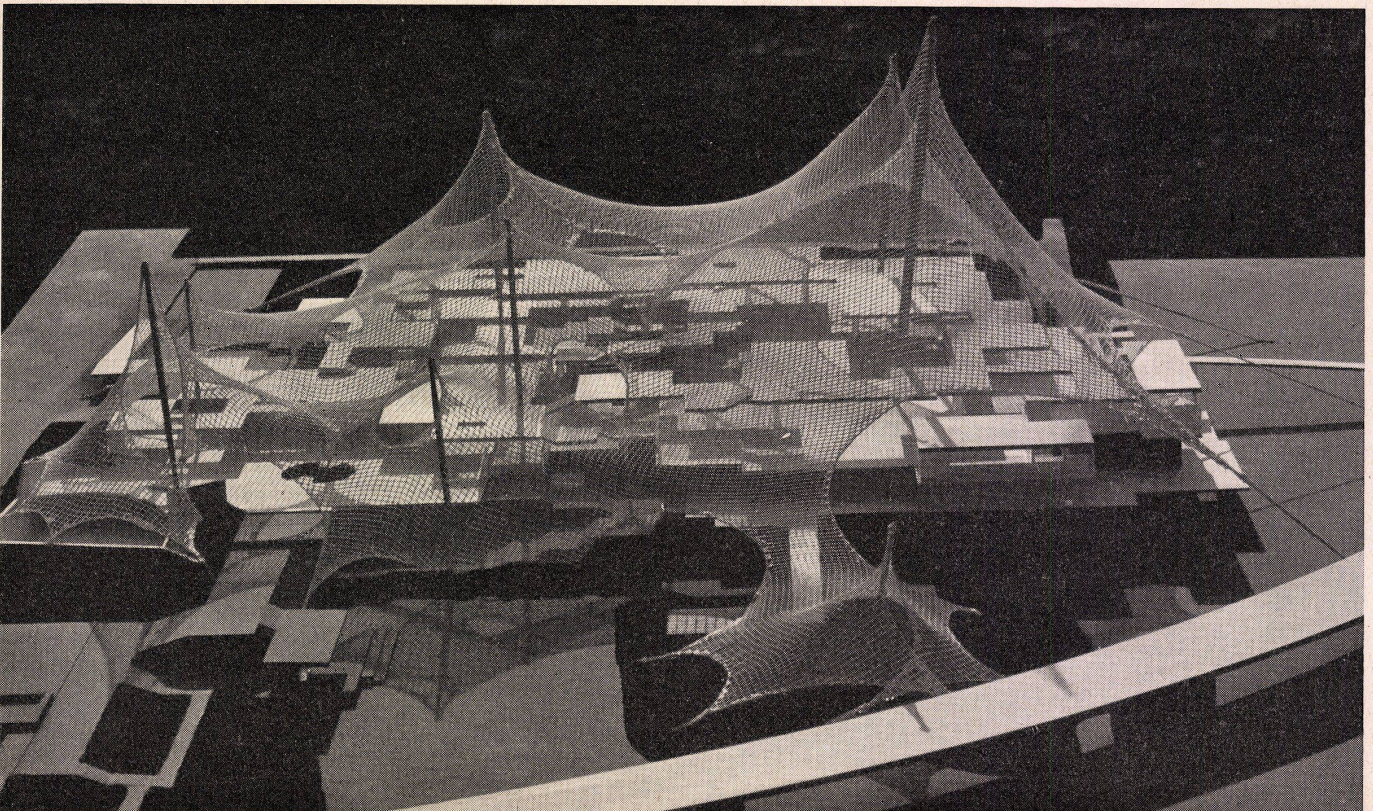




11  
Wettbewerbsmodell des deutschen Pavillons für die  
Weltausstellung in Montreal. Ansicht von Süden.  
Maquette de concours du pavillon allemand pour  
l'Exposition universelle de Montréal. Vue du sud.  
Competition model of the German pavilion for the  
World's Fair in Montreal. View from south.

11

12  
Entwurfsmodell.  
Maquette de projet.  
Model.



12

13

Abspannung einer Seifenlamelle durch Schlaufe. Bei erhöhter Seilkraft verringert sich der Schlaufenradius und damit auch die Krümmung der Lamelle. Die Schlaufe läßt sich vollständig aus dem Schlaufenhaus herausziehen, ohne daß dieses dabei zerstört wird.

Haubanage d'une lamelle de savon par un passant. Le rayon du passant et par conséquent la courbe de la lamelle diminue lorsque la force des câbles augmente. On peut enlever complètement le passant de son habitacle sans pour autant détruire ce dernier.

Trussing of a soap slat by means of loop. With increased rope tension the loop radius is reduced and thus too the bending of the slat. The loop can be completely pulled out of the loop housing without being destroyed.

14

Schlaufe mit einmündendem Gratseil (Seifenhautversuch).

Tirant avec câble d'arête débouchant (essai de peau de savon).

Loop with entering crest rope (soap skin test).

15

Modell für die Windkanalversuche.

Maquette pour les essais en soufflerie.

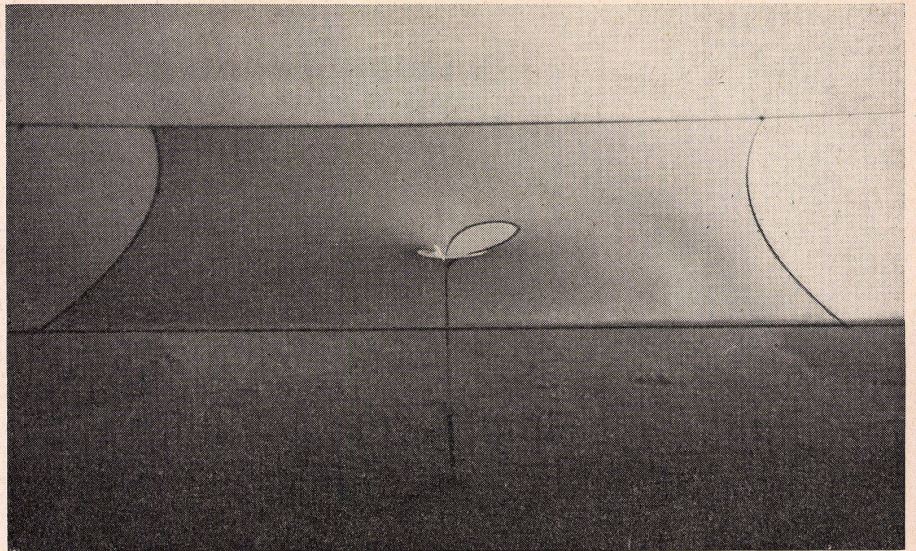
Model for the wind tunnel tests.

Der erste Versuch, das ganze Netz aus einem ebenen Stück zuzuschneiden, wurde wieder aufgegeben, da die Maschen in einigen Gebieten zu starke rhombische Verformungen aufwiesen (Bild 2). Eine Montage-naht wurde eingeführt, die sich quer über das Netz zieht (Bild 11 und 12), und der Zugschnitt dieses antiklastischen (zweiseitig gegensinnig gekrümmten) Netzes also aus zwei ebenen Netzteilen hergestellt.

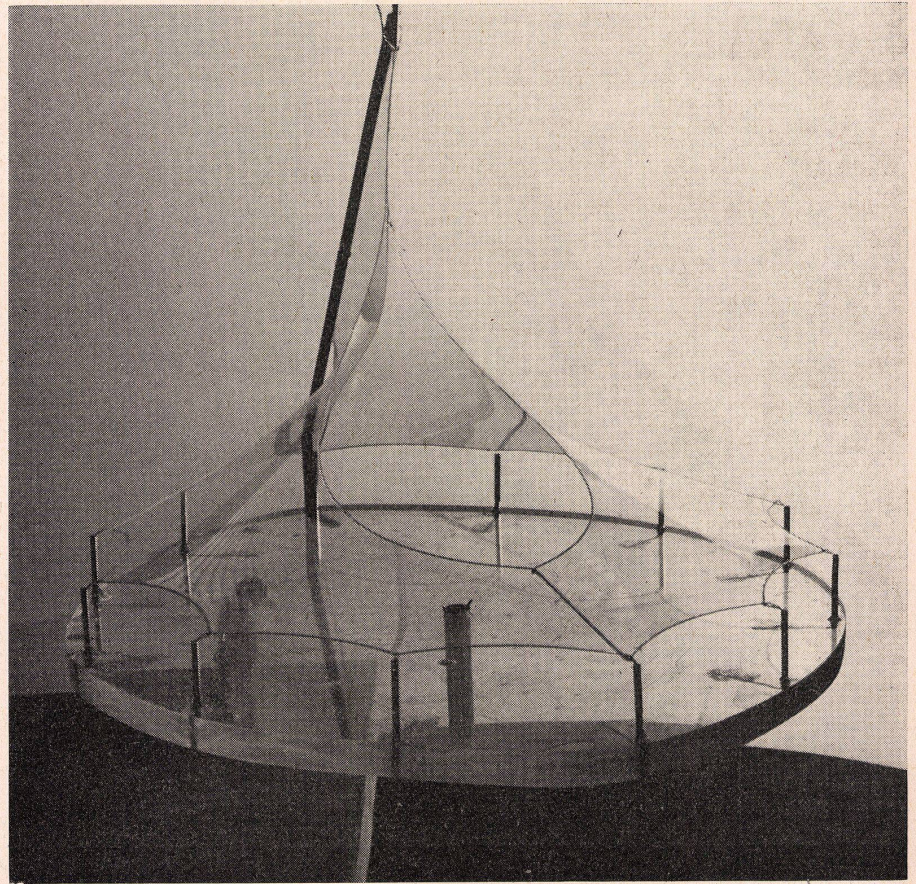
Nachdem dieser Entwurf (Bild 11) bei dem Wettbewerb den 1. Preis erhalten hatte und zur Ausführung bestimmt wurde, versuchte man die Form noch mehr zu verfeinern.

Da nur noch 18 Monate bis zur Fertigstellung des Pavillons zur Verfügung standen, ging man weitgehend vom Wettbewerbsentwurf aus. Im Maßstab 1:100 wurde ein genaues Stoffmodell gebaut (Bild 12), wobei, um die oben genannten sechs Forderungen weitgehend zu erfüllen, immer wieder Rand- und Augenpartien verbessert werden mußten. Dazu waren weitere Schlaufenversuche mit Seifenhäuten notwendig, da es sich herausstellte, daß die Größe der Schlaufe von der Krümmung und Spannung des Seiles abhängt: die Seifenversuche zeigten, daß sich die Schlaufe bei Vergrößerung der Kraft verkleinerte und sich aus der Seifenhaut herausziehen ließ (Bild 13). (Die Krümmung der Haut läßt sich über einen bestimmten Betrag hinaus nicht vergrößern.) Da bei einigen Schlaufen durch die Montagenahat Gratseile angreifen, die eine Formänderung der ursprünglichen Schlaufe bewirken, wurden auch für diesen Fall Seifenhautversuche durchgeführt (Bild 14).

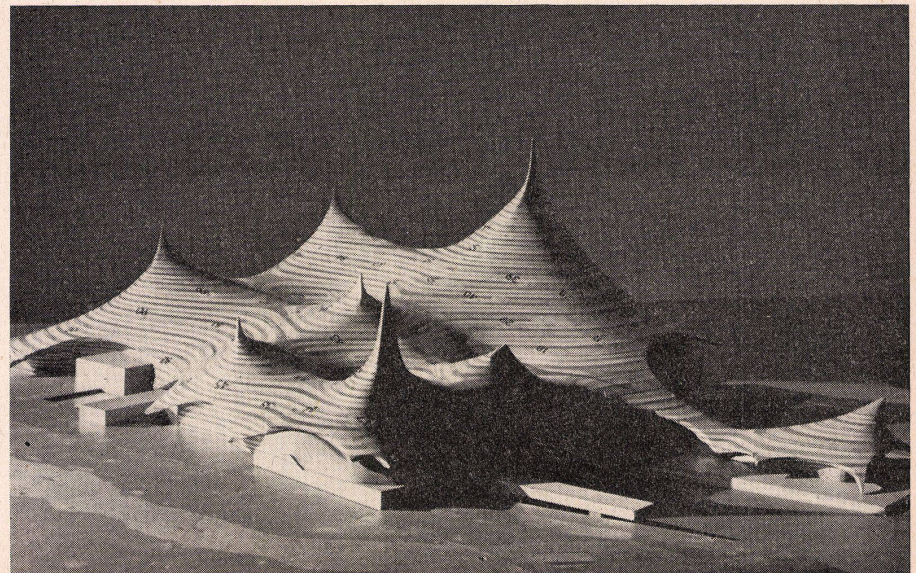
Um die Stabilität der Form gegen den Winddruck abschätzen zu können, wurde ein Windkanalmodell im Maßstab 1:150 nach dem Höhenlinienplan des Entwurfsmodells gebaut (Bild 15). An 130 Stellen dieses Modells waren feine Bohrungen angebracht, an denen die Druckdifferenz gegenüber dem statischen Druck des Windkanals gemessen werden konnte. Die einzelnen Bohrungen wurden über Schläuche mit Glasröhrchen verbunden, die zur Hälfte mit Alkohol gefüllt waren. Die Druckdifferenzen erzeugten eine Veränderung des Alkoholpegels in den Röhrchen, die zur anschließenden Auswertung fotografisch festgehalten wurden. Die Versuche wurden mit zwei Windgeschwindigkeiten von 20 und 40 m/sec aus acht verschiedenen Windrichtungen durchgeführt.



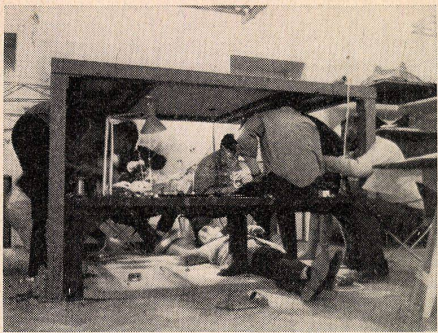
13



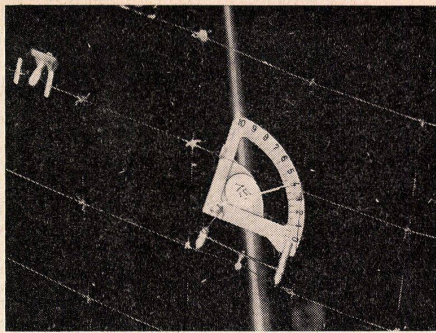
14



15



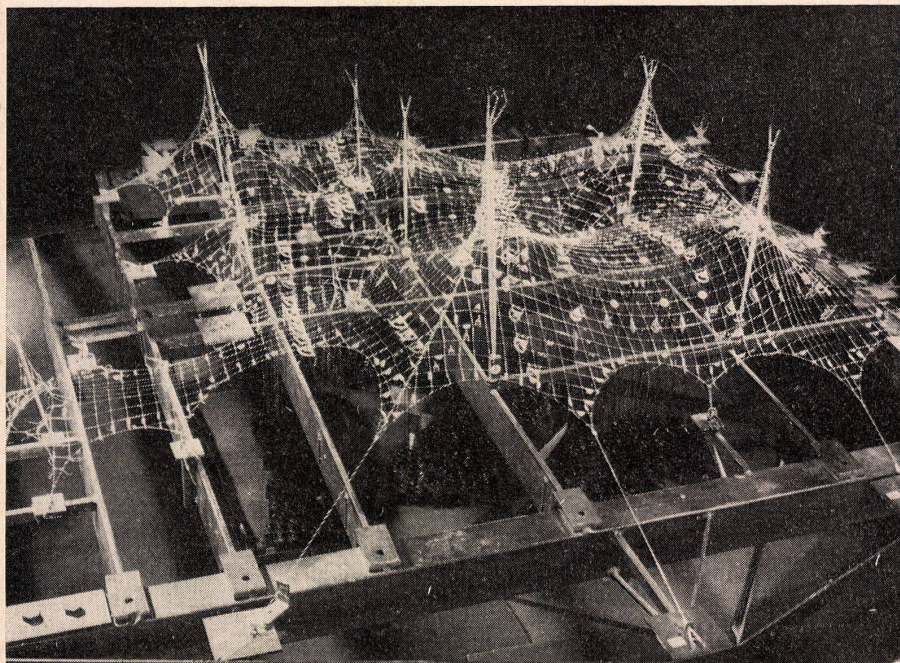
16  
Einbau des Meßmodells.  
Installation de la maquette de mesure.  
Installation of the pilot model.



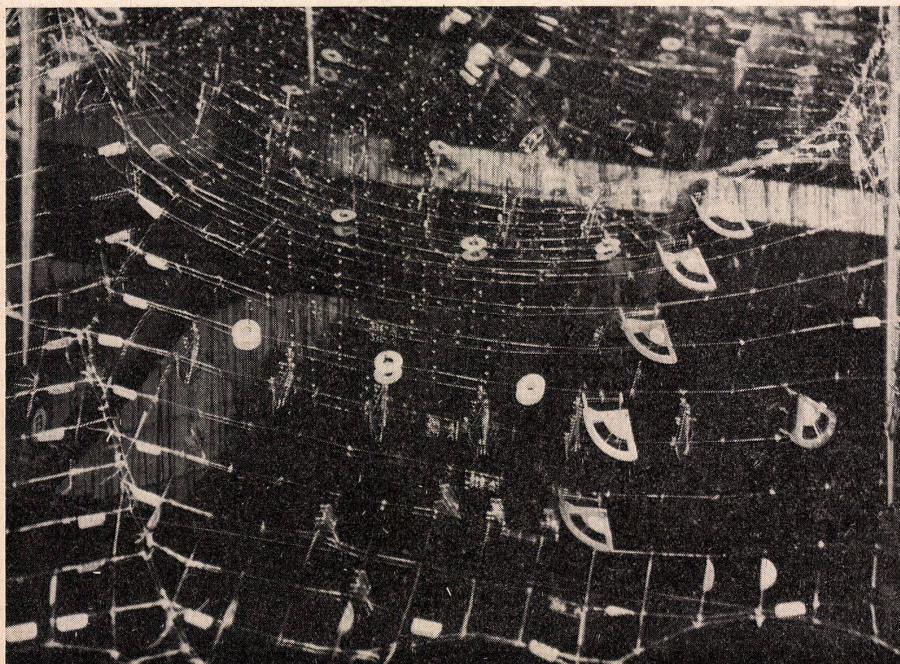
17  
Spannungsmesser (Breite ca. 2,5 cm).  
Voltmètre (largeur environ 2,5 cm).  
Tension meter (width around 2.5 m.).

18  
Meßmodell.  
Maquette de mesure.  
Pilot model.

19  
Doppelt belichtete Foto zur Verformungsbestimmung bei Schneelast.  
Photo doublement exposée pour déterminer la déformation lors d'une charge de neige.  
Double-exposed photograph to determine deformation under snow load.



18



19

Um die Grundform unter Vorspannung exakt ermitteln zu können, mußte ein Meßmodell gebaut werden, das ein möglichst gleiches Verhalten wie der Bau aufweist und aus dem alle Maße für die Vorfertigung von Netz und Haut herausgemessen werden konnten. In einem verwindungssteifen Rahmen von  $1,6 \times 2$  m wurde im Maßstab 1:75 das Seilnetz nach dem Zuschnitt des letzten Stoffmodells aus 0,15 mm starkem nichtrostenden Stahldraht errichtet (Bild 16-18).

Die Vorfertigung des Seilnetzes ergab zunächst große Schwierigkeiten, da die Netzknoten zwar unverschiebbar, aber drehbar sein mußten, denn das zunächst rechteckige ebene Netz erfährt bei der räumlichen Krümmung eine Winkelverschiebung bis zu  $30^\circ$ . Die Drähte konnten daher nicht direkt aufeinandergelötet werden, sondern wurden durch dünne Kupferdrähte, die unter  $45^\circ$  aufgelötet waren, gegeneinander verrötelt. Im Modell wurde jedes vierte Seil durch einen Draht dargestellt; die Maschen hatten also eine Länge von 2,67 cm.

Die Seilenden mußten in ihrer Länge variierbar sein, um Korrekturen durchführen zu können. Dies wurde zunächst mit Perlonfäden erreicht, die durch die Glieder einer feinen Kette, die parallel zu den Randseilen verlief, gezogen wurden. Später wurden Kupferdrähte angelötet, da sich Feinkorrekturen durch An- und Ablöten der Kupferdrähte schneller ausführen ließen.

Die Rand- und Schlaufenseile waren an Spannmitgliedern befestigt und konnten durch diese Längenveränderungen erfahren.

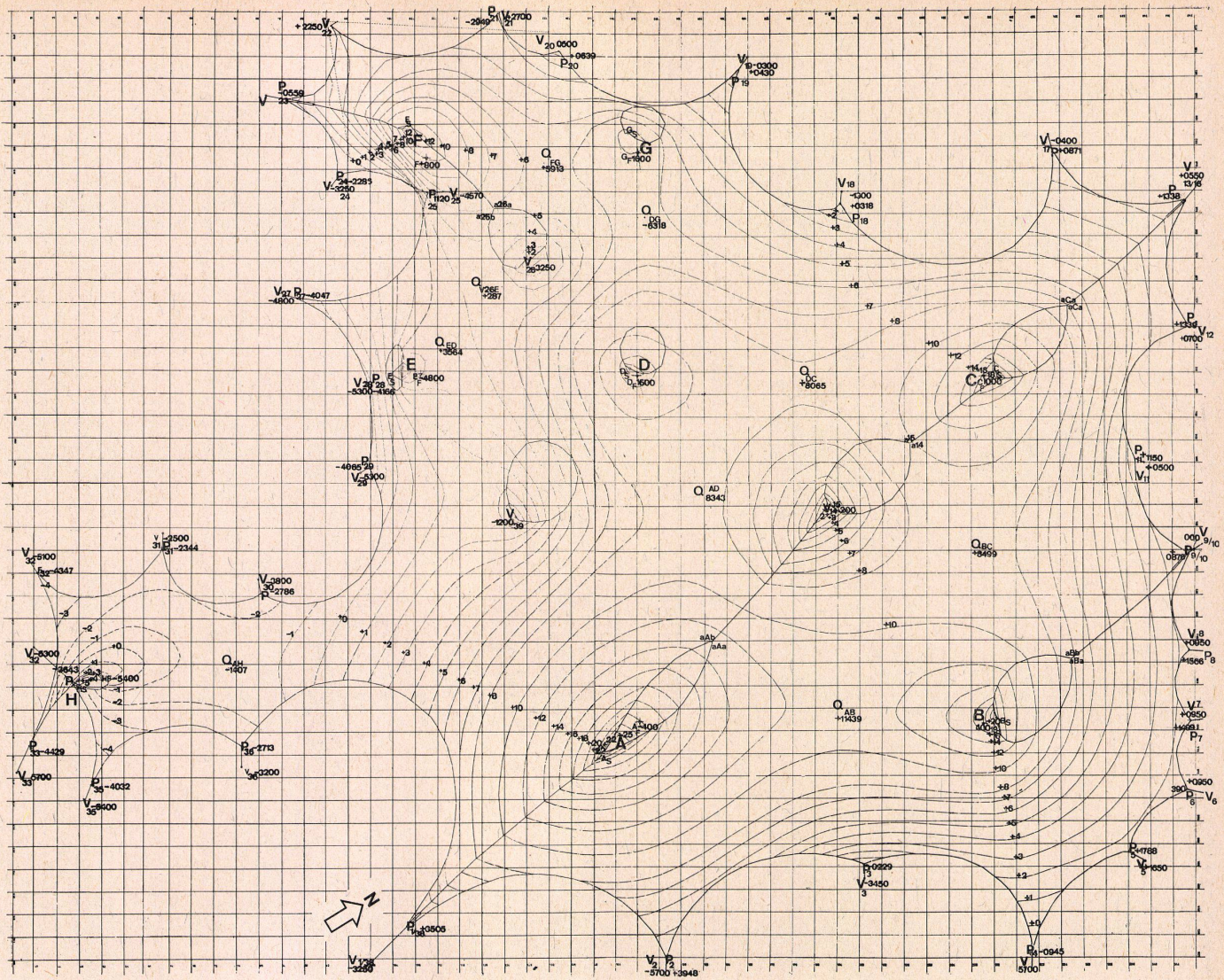
Um die Spannungen der Seile vergleichen zu können, wurden mechanische Spannungsmesser entwickelt, die gerade eine Maschenweite ausfüllten (Bild 17). Sie bewirken durch eine Dreipunkt Lagerung eine geringe Umlenkung des Seiles, die bei einer Spannungszunahme geringer wird.

Die Verformung wird durch Hebelwirkung auf eine Skala übertragen, an der die Spannung ablesbar ist. Diese Spannungsmesser haben sich als besonders praktisch erwiesen, da sie schnell einzusetzen sind und die Spannung absolut messen können.

Nachdem die Netzknoten in beiden Seilrichtungen auf harmonische Kurven gebracht und die Spannungen im Netz nahezu ausgeglichen waren, zeigte es sich, daß die einer Minimalfläche angenäherte Form nicht an allen Stellen die konstruktiv richtige Form ergibt.

Die Minimalfläche hat die Eigenschaft, tangential in die Ränder einzuzuließen und die dazwischenliegenden Strecken möglichst eben zu überbrücken: im Meßmodell legte sich das Seilnetz dicht an die Mastspitzen und verlief dort fast senkrecht, während das mittlere Sattelgebiet nahezu eben war. Die gefundene Form mußte nun der Beanspruchung durch Schnee- und Windlasten angepaßt werden, d.h. die Krümmung der besonders stark beanspruchten Gebiete mußte erhöht werden, um die Verformung des Seilnetzes durch äußere Kräfte in konstruktiv vertretbaren Grenzen zu halten. Um die gewünschte Formänderung zu erreichen, wurden Spannungsgleichheiten mit eingeplant und einige Seile verdoppelt. Damit konnte eine stärkere sattelförmige Krümmung der verformungsanfälligen Gebiete erreicht werden (Bild 18).

Der Windkanalversuch ergab, daß die Verformung unter Windlast vernachlässigt werden konnte. Zur Kontrolle der Verformung unter Schneelast wurden nachträglich Belastungsversuche ausgeführt. Die Schneelast von  $100 \text{ kp/m}^2$  ergab für das Meßmodell eine Last von ca. 71 p je Netzknoten. Die Auswertung der Belastung geschah fotografisch mit Doppelbelichtungsphotos (Bild 19). Jeder belastete Knoten erhielt eine vertikale Meßstrecke mit zwei weißen Punkten, die einem Abstand von einem Meter entsprach. In der Doppelbelichtungsphoto, welche das Netz gleichzeitig im unbelasteten und im belasteten Zustand zeigt, ließ sich aus der Relation der vertikalen Punktverschiebung



20

zur Meßstrecke die Verformung des Netzes auf wenige Zentimeter, im Maßstab 1:1 gerechnet, bestimmen.

### Formermittlung

Alle bisherigen Arbeiten dienten dazu, die konstruktiv richtige Form für dieses Tragwerksystem zu finden. Nun ergab sich das Problem, diese Form kommunizierbar zu machen, d. h. sie so zu ermitteln, daß exakte Zeichnungen für Fundamente und Grundrisse und für die Vorfertigung der Maste, Randseile und Netzseile angefertigt werden konnten. Außerdem wurden die Raumkoordinaten einiger Seilnetzpunkte zur Berechnung der Kräfte benötigt.

Der erste Schritt der Formbestimmung bestand in der Aufzeichnung der Höhenlinien und der Grundrißprojektion des Netzes (Bild 20). Dafür wurde ein Höhenlinientastgerät gebaut. Der Meßmodellrahmen erhielt eine Zeichenebene über dem Modell, die aus einer fein geschliffenen Marmorplatte bestand und exakt parallel zur Modellebene justierbar war. Auf dieser Platte lief das Punktsetzgerät, das unter dem Zeichenstift ein Lot trug, mit dem die einzelnen Punkte des Modells abgetastet werden konnten. Bei der Ermittlung der Höhenlinien wird das Lot zunächst auf eine bestimmte Höhe eingestellt, mit der das Modell umfahren wird. Bei der Berührung des Lotes mit einem Seilnetzpunkt setzt dann das pneumatisch betätigte Gerät einen Punkt. Es wurde damit eine Genauigkeit von 0,2 mm erreicht.

Für die Vorfertigung des Seilnetzes mußte jede Seillänge und jeder Seileinlaufwinkel am Randseil bestimmt werden. Die fotografische Maßabnahme erwies sich als ge-

eignet: Das Seilnetz wurde in Abschnitten von ca. 8 cm Länge fotografiert (Bild 21), die Ausschnitte wurden vergrößert auf eine Zeichenebene projiziert und dort im Maßstab 1:10 aufgezeichnet.

Daneben wurde eine zweite Vermessungsmethode ausprobiert: Das Netz wurde stereometrisch fotografiert und die Fotos in einem 3-D-Koordinator ausgewertet. Die Raumkoordinaten jedes Netzknotens wurden auf Lochstreifen gespeichert. Es ist beabsichtigt, in Montreal mit diesen Lochstreifen eine automatische Zeichenmaschine beliebige Schnitte durch das Netz zeichnen zu lassen.

Technisch wesentlich schwieriger als die Ermittlung des Netzzuschnittes war die Ermittlung des Hautzuschnittes. Die Kunststoffmembrane, die in ca. 50 cm Abstand unterhalb des Netzes verläuft, stellt eine antiklastisch (sattelförmig) gekrümmte Fläche dar und ist als solche nicht in die Ebene abwickelbar. Sie mußte aus möglichst kleinen Bahnen bzw. Feldern mit Hohlschnitt aneinandergesetzt werden, damit sich eine einigermaßen kontinuierliche antiklastische Krümmung ergab. Um die fischbauchförmigen Hohlnähte zu ermitteln, wurde die ganze Haut aus kleinen Pausleinstücken im Modell unter das Netz gebaut. Die Pausleinstücke trugen jeweils Koordinatenraster, die gegeneinander vermessen wurden (Bilder 22 und 23).

Die modelltechnischen Untersuchungen zur endgültigen Formfindung und zur Formermittlung am Meßmodell, die unter der Leitung von Frei Otto im Institut für leichte Flächentragwerke in Stuttgart durchgeführt wurden, erforderten einen Zeitaufwand von rund 20 000 Arbeitsstunden.

20

Höhenlinienplan ca. 1:650.

Plan des courbes de niveau.

Contour plan.

A-H Maste / Mâts / Masts

AF-HF Mastfußpunkte / Points du pied de mâts / Mast bases

AS-HS Mastspitzen / Bouts du mât / Mast tops

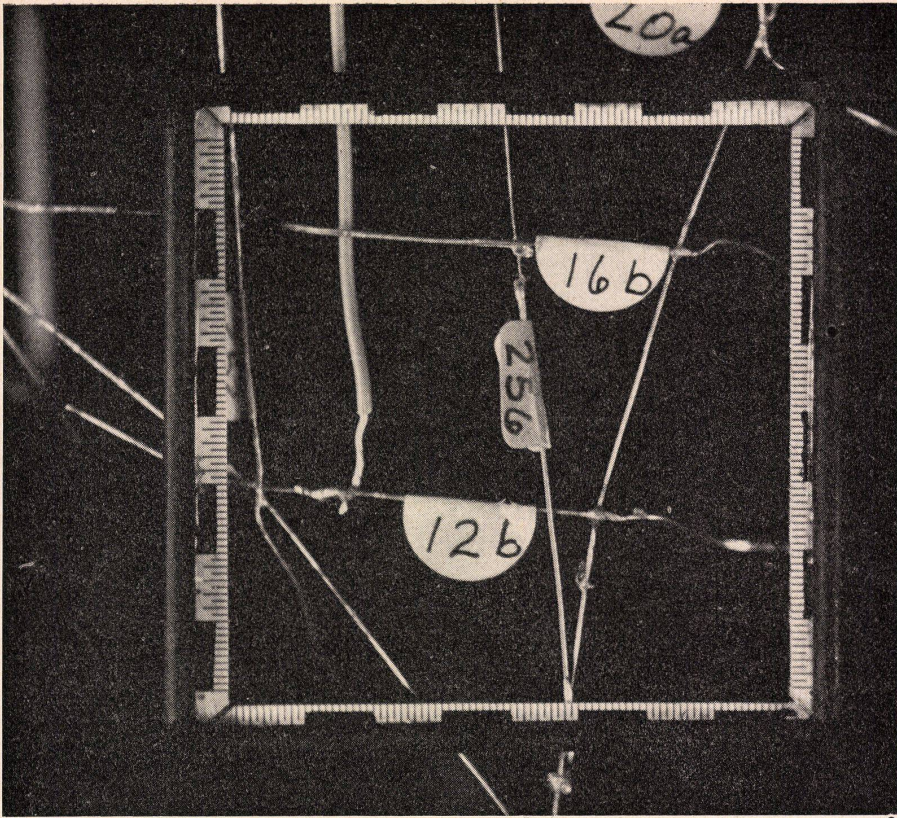
V Verankerungen / Ancrages / Anchorings

P Systemschnittpunkte / Points d'intersection du système / System section points

Q Seilnetzsattelnde / Points de filets de câbles / Rope net saddle points

Azimet der strichpunktierten Höhenlinien: 100 cm / Azimut des courbes de niveau en traits et points: 100 cm / Azimuth of the broken contour lines: 100 cm.





21

Fotografische Seilnetzabwicklung (Längen- und Einlaufwinkelübertragung).

Déroulement photographique du filet de câbles (transmission des angles).

Photographic rope net evolution (longitudinal and shrinkage angle transmission).

22

Einbau der Membrane in das Meßmodell.

Installation des membranes dans la maquette de mesure.

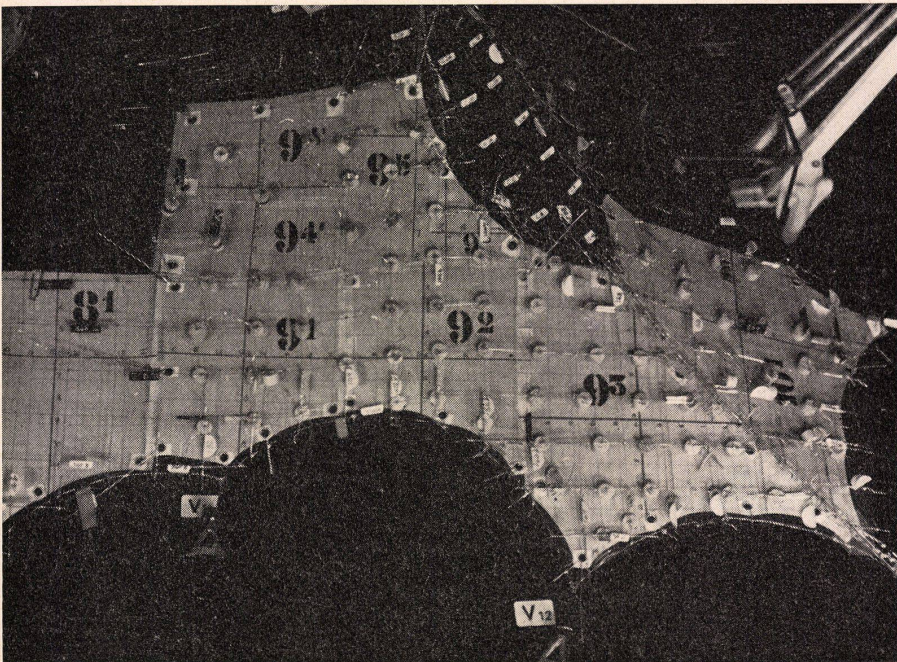
Installation of the membrane in the pilot model.

23

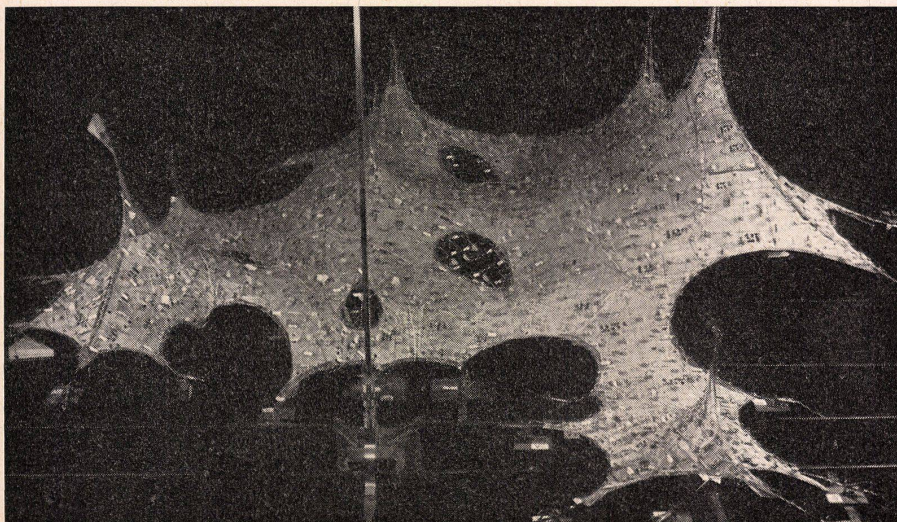
Meßmodell mit untergehängter Haut.

Maquette de mesure avec peau suspendue en-dessous.

Pilot model with suspended skin.



22



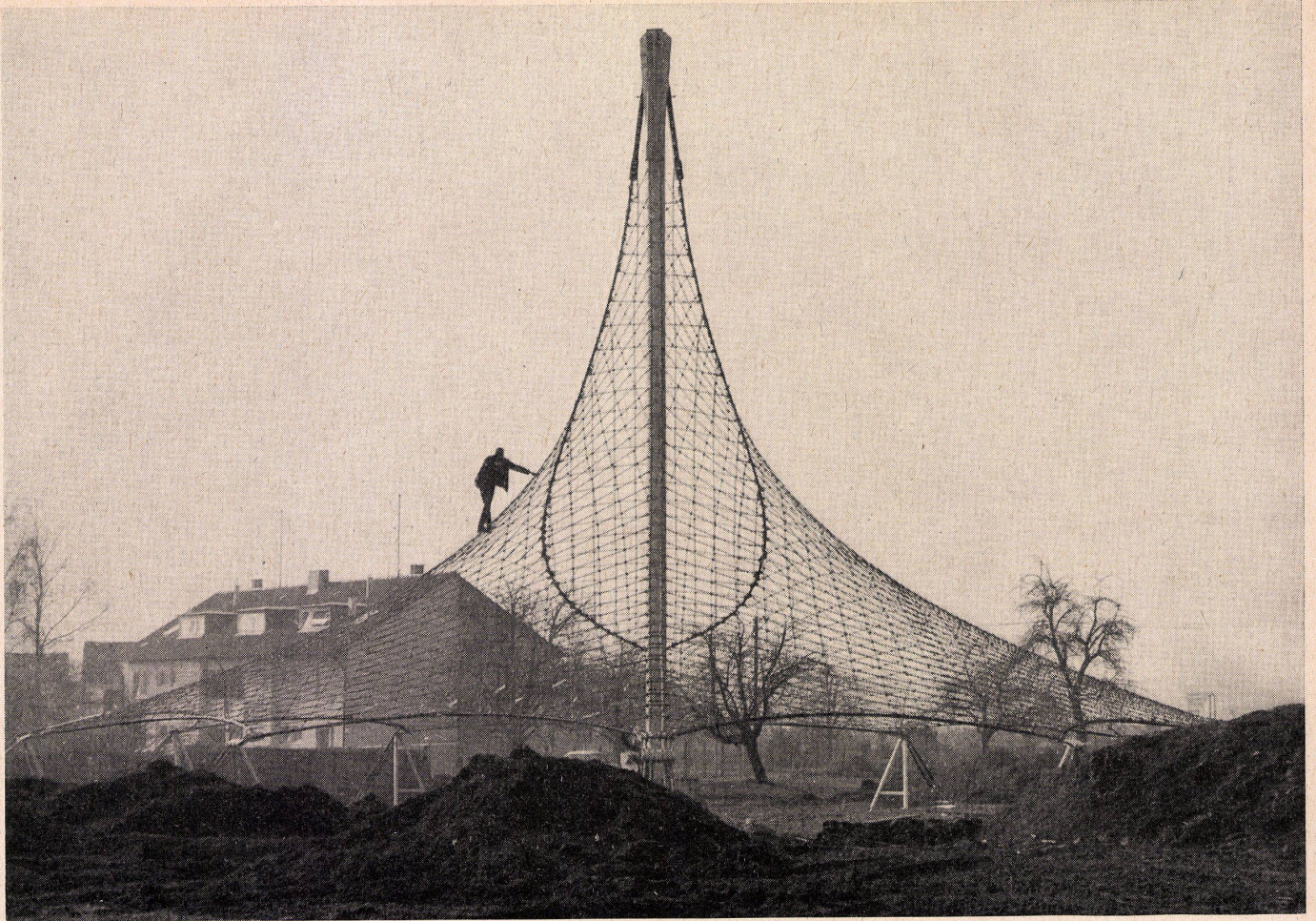
23

### Herstellung und Montage

Die statischen Berechnungen entstanden in Abhängigkeit von den Modellversuchen (Statik: Leonhardt und Andrá, Mitarbeiter Egger). Da die Firmen für die Anfertigung der Seile, Masten und Klemmen mehrere Monate benötigten, mußten die Dimensionen der Elemente schon festliegen, bevor die Form im Modell endgültig bestimmt war. Dies geschah auf Grund überschlägiger Berechnungen, die relativ einfach waren, da die Bemessung des Netzes von der Vorspannung abhängig ist. Es wurde eine Vorspannung je Seil von 1000 kp angenommen. Die Bruchlast der Netzseile beträgt ca. 10 t, die der Randseile ca. 200 t. Aus herstellungstechnischen Gründen beschränkte man sich auf zwei verschiedene Abmessungen. Gewählt wurden für die Netzseile 12 mm  $\Phi$ , für die Randseile 54 mm  $\Phi$ . Kreuzklemmen, welche die Seile verbinden, mußten entwickelt werden, da keine brauchbaren Klemmen im Handel waren. Drehbare Kreuzklemmen wurden wegen der hohen Kosten ausgeschlossen. Die 40000 Klemmen mußten leicht und schnell montierbar und billig in der Herstellung sein. Sie sind dreiteilig, wurden im Gesenk geschmiedet und können mit nur zwei Schrauben verbunden werden.

Frei Otto wollte für die Stützen besonders leichte, abgespannte Maste entwickeln. Aus Zeitmangel mußte die Entwicklung dafür vorzeitig abgebrochen werden und man einigte sich auf einfache Stahlrohre mit konischen Endstücken.

Um alle entwickelten Details im Maßstab 1:1 testen zu können, um die Genauigkeit der Formermittlungsmethoden zu untersuchen und um die Montageabläufe zu studieren, wurde in Stuttgart-Vaihingen ein Versuchsbau von ca. 30 Meter Durchmesser und 17 Meter Höhe errichtet. Der Versuchsbau stellt einen Ausschnitt aus dem Montrealpavillon dar (Bilder 24 und 25).

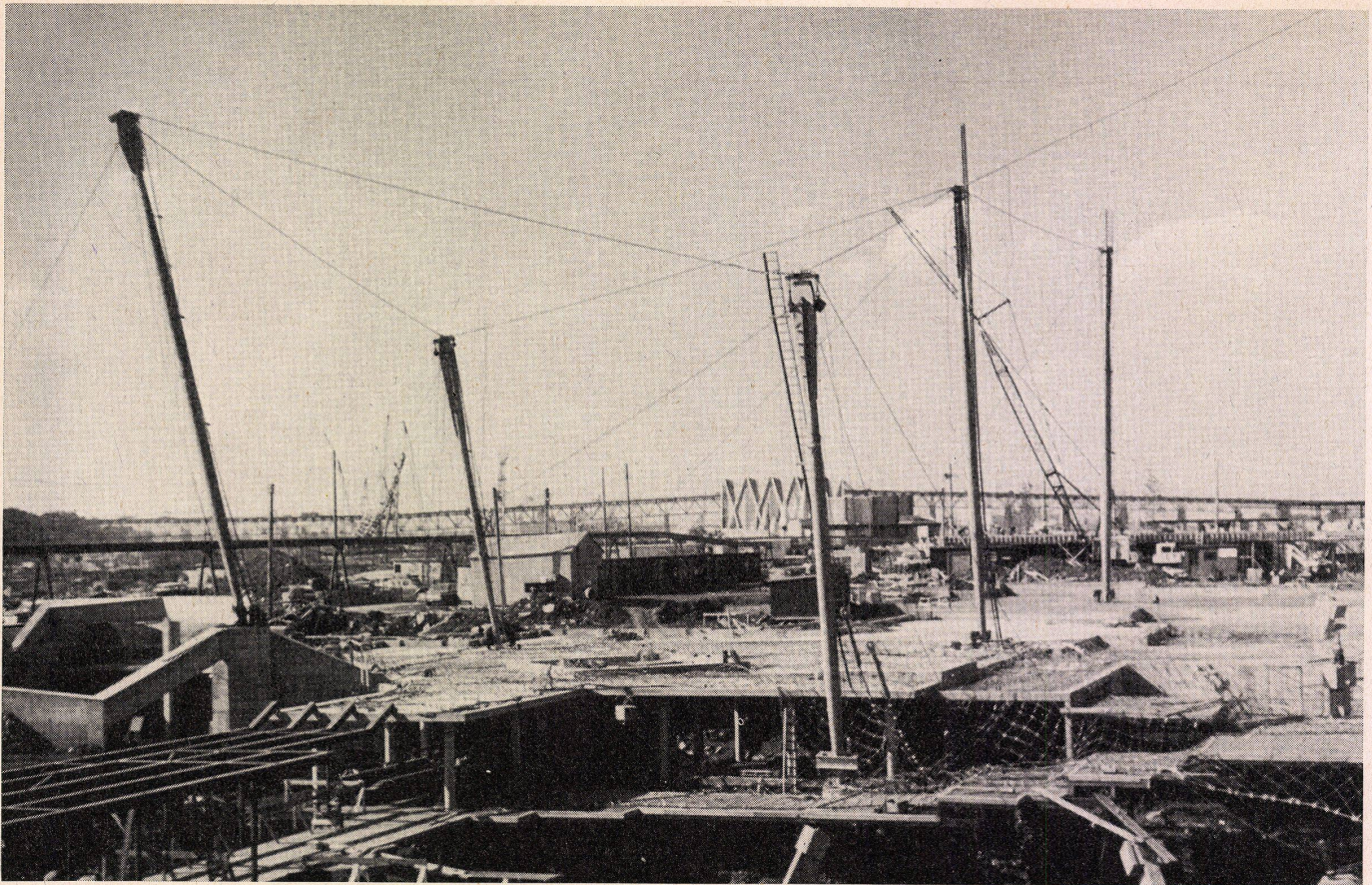


24

24 und 25  
Versuchsbau in Stuttgart-Vaihingen.  
Construction-essai à Stuttgart-Vaihingen.  
Test construction in Stuttgart-Vaihingen.



25



26-30  
Montage in Montreal.  
Montage à Montréal.  
Assembly in Montreal.

26  
Aufrichten und provisorisches Abspannen der Maste.  
Erection et haubanage provisoire des mâts.  
Erection and provisional trussing of the masts.

26

27  
Spannungskontrolle am Netz.  
Contrôle de tension du filet.  
Tension check on the net.



28

Aufziehen des Netzes an den Augenstäben.  
Installation du filet sur des barres à l'oeil.  
Stretching of the net over the eye poles.

29

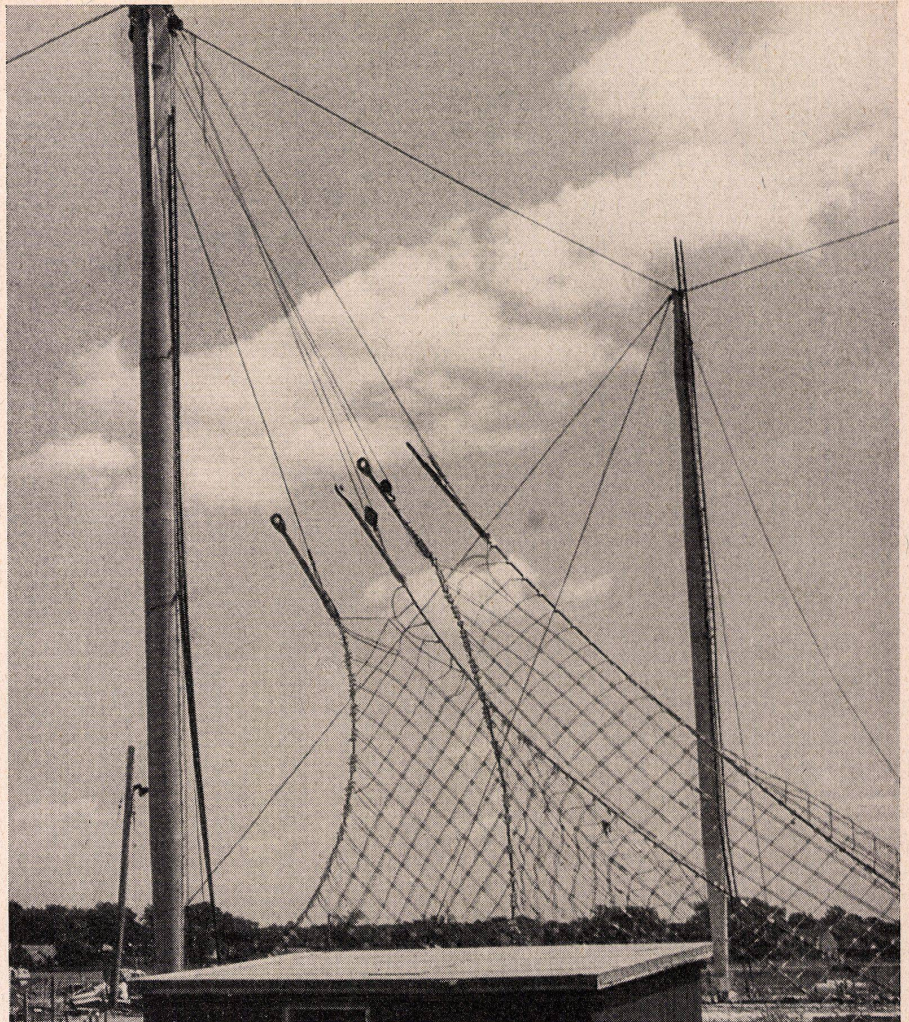
Montage der Haut: Aufziehen der lichtdurchlässigen Haut, die zwischen das Augenseil montiert wird.  
Montage de la peau. On hisse la peau transparente montée entre le câble à l'oeil.  
Assembly of the skin: stretching of the porous skin which is set up between the eye ropes.

Das Seilnetz wurde von der Firma Stromeyer in Konstanz vollständig vorgefertigt und in 8,5 Meter langen Rollen nach Montreal verschifft. Die verzinkten Maste, welche die Berliner Firma Steffens und Nölle herstellte, wurden in einem Stück als Decklast verschifft; nur der 38 Meter lange Mast A wurde in zwei Teilen geliefert und auf der Baustelle zusammenschweißt. Der Montageprozeß in Montreal verlief sehr ähnlich wie der des Versuchsbaus. Das Netz wurde ohne besondere Hilfsmittel über die Kopffrollen der zuerst errichteten und provisorisch abgespannten Maste hochgezogen. Das Begehen des Netzes war ohne Schwierigkeiten möglich, da der geringe Maschenabstand von 50 Zentimetern keine Sicherheitsmaßnahmen erforderlich machte.

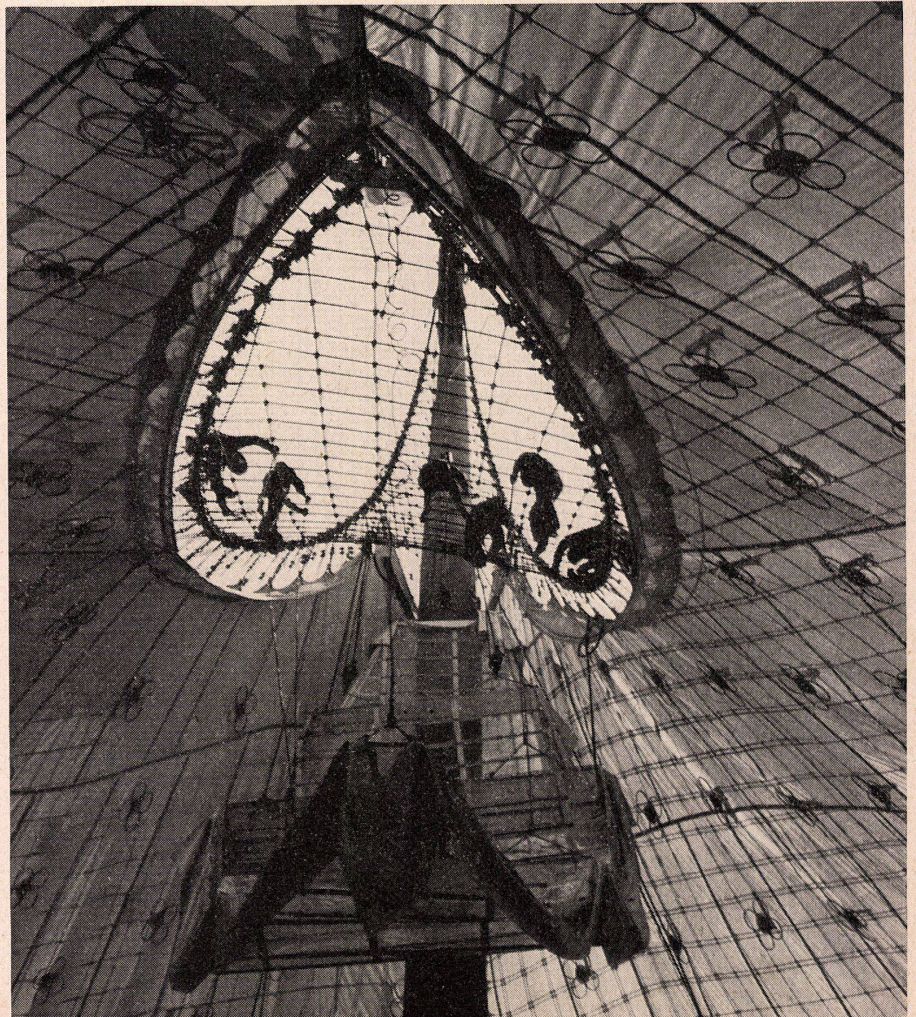
Der Montagevorgang in Stichworten:

- Aufrichten der Maste und provisorisches Abspannen (Bild 26),
- Zusammenbau der vormontierten Netzteile am Boden,
- Aufziehen des Netzes an den Augenstäben (Bild 27),
- Spannen des Netzes, Spannungskontrollen (Bild 28),
- Einbau der Traversen für die Hautaufhängung,
- Zusammenbau der vorgefertigten Hautteile zu Großfeldern,
- Aufziehen der Haut, Befestigung der Federteller an den Traversen (Bild 29),
- Verbindung der Großfelder in der Luft,
- Spannen der Haut (Bild 30).

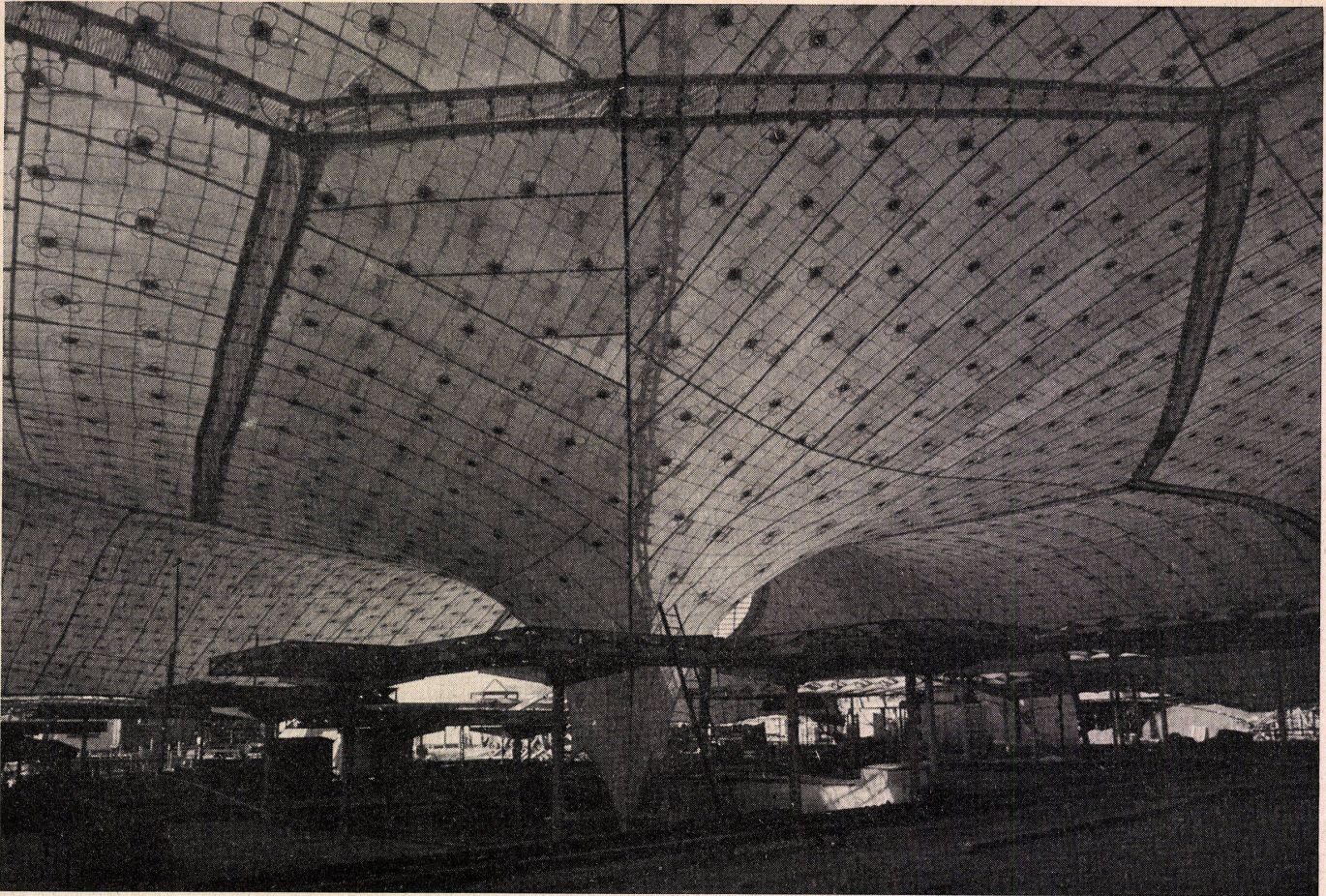
An der Formfindung der Großhülle arbeiteten Frei Otto und Rolf Gutbrod und als Mitarbeiter u. a. Hermann Kendel und Larry Medlin. Die Seifenhautversuche wurden unter Frei Otto und Bernd Friedrich Romberg in der Entwicklungsstätte für den Leichtbau, Berlin, durchgeführt. Die endgültige Formbestimmung anhand der Meßmodelle war ein Forschungsauftrag der Bundesbaudirektion Berlin an das Institut für leichte Flächen-tragwerke der Technischen Hochschule Stuttgart unter der Leitung von Frei Otto mit Eberhard Haug, Larry Medlin, Berthold Burkhardt, Jochen Schilling und Gernot Minke.



28



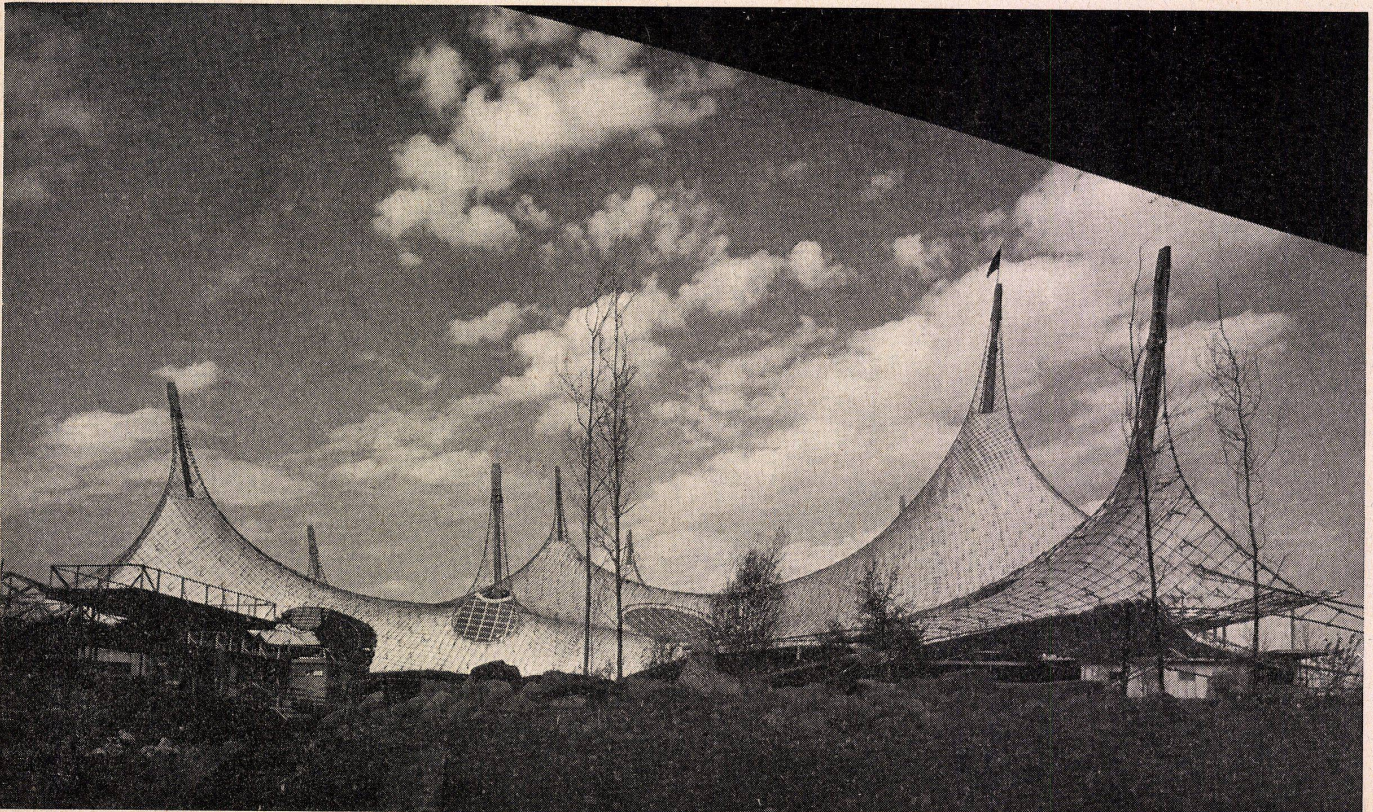
29



30  
Innenansicht: Montage der Terrassenelemente.  
Vue intérieure: montage des éléments de terrasses.  
Interior view: assembly of the terrace elements.

30

31  
Ansicht von Nordosten.  
Vue du nord-est.  
View from northeast.



31