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

Herausgeber: Bauen + Wohnen

Band: 24 (1970)

Heft: 10: Städteplanungen : Mitbestimmung bei Planungsfragen = Urbanisme : participation dans les questions de planification = Townplanning : participation on planning questions

Artikel: Vorgespannte räumliche Seil-Stabtragwerke = Structures spatiales à câbles et à barres prétendues = Prestressed cable-and-strut structures

Autor: Rudolph, Peter

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-347882

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. 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. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

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. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

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. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.12.2025

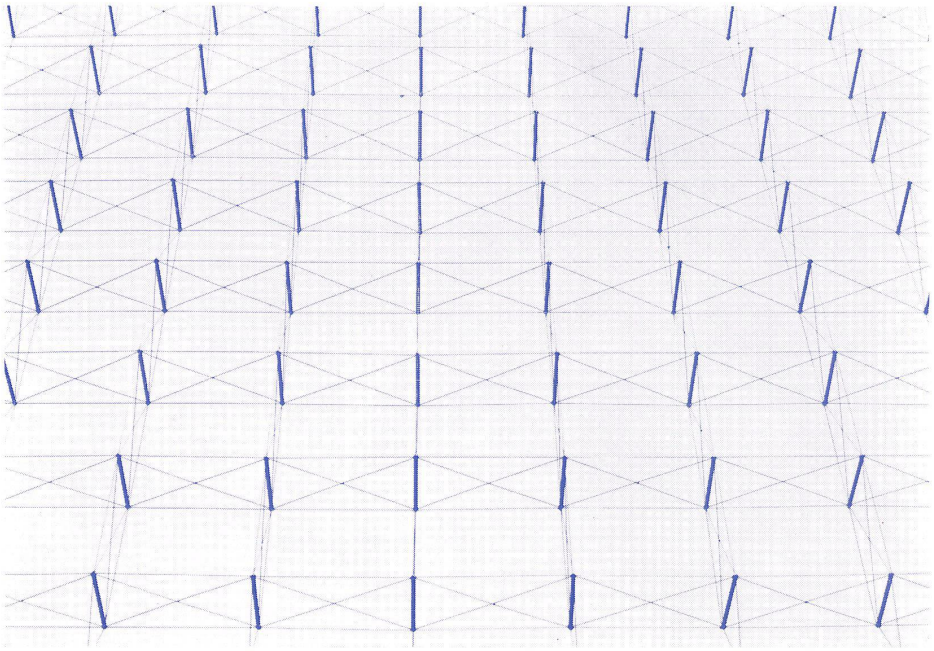
ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Peter Rudolph, Berlin

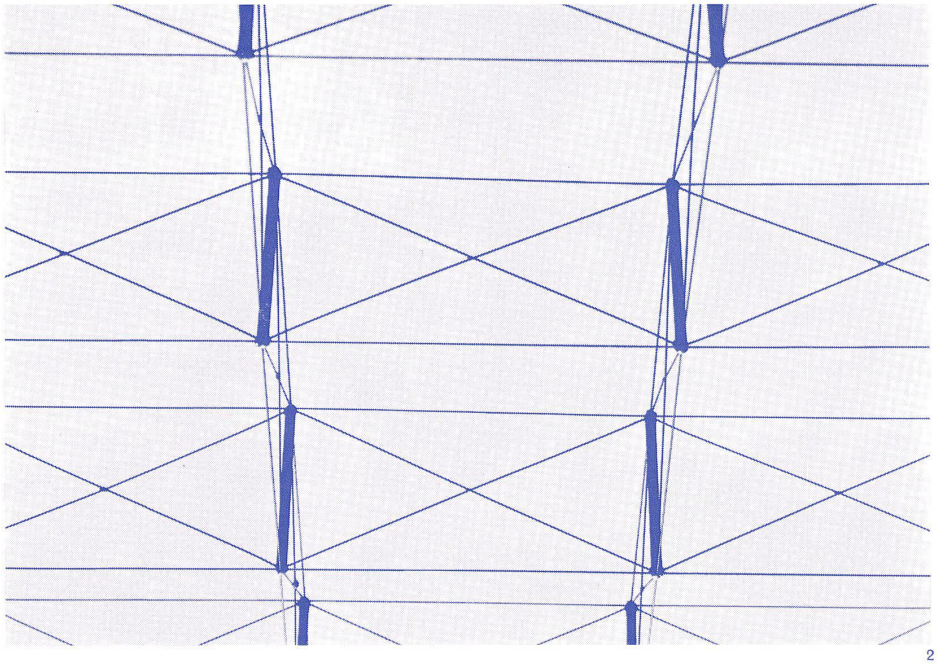
Vorgespannte räumliche Seil-Stabtragwerke

Structures spatiales à câbles et à barres prétendues

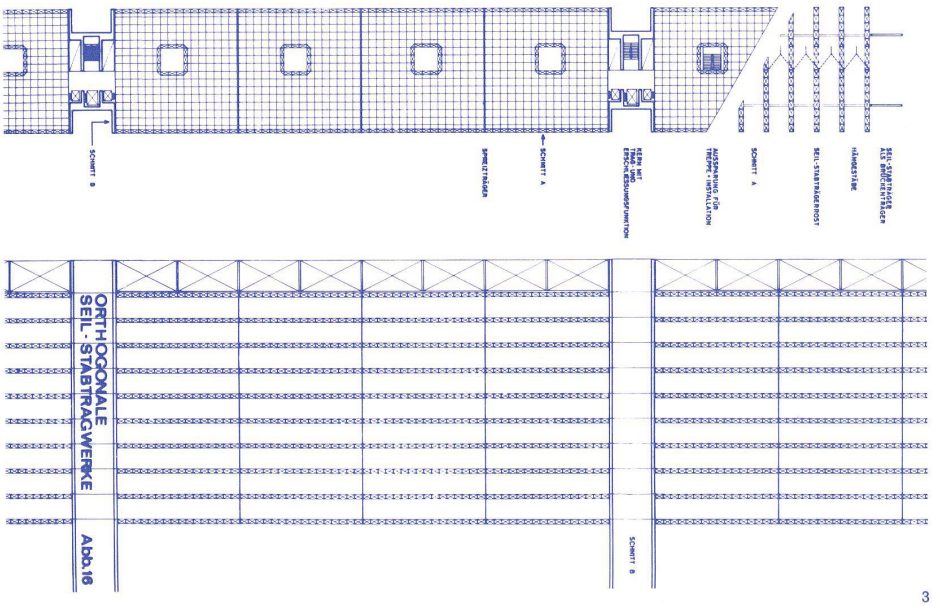
Prestressed cable-and-strut structures



1



2



3

Die Motivation für die Entwicklung von speziellen, genau definierbaren und einzuordnenden Tragstrukturen basiert auf der Vorstellung, die Ergebnisse für fortschrittliche Bausysteme als integrierende Bestandteile einer Disziplin anzubieten, für die ebenfalls die Intensionen anderer Wissenschaftsbereiche methodisch einzubeziehen wären. Die Zielvorstellung entspricht nicht der Herstellung von unzusammenhängenden Spezialergebnissen dieser Disziplin, sondern der interdisziplinären Systematik, diese und alle anderen Spezialergebnisse koordinierend für die Erstellung der Planungskonzeption solcher Bausysteme bereitzuhalten.

Das funktionelle Ziel besteht darin, die konstruktiven Voraussetzungen herzustellen

1. für die additive Errichtung von unbezweifelbar für die meisten menschlichen Beschäftigungen idealen Bezugsflächen (horizontale Ebenen), und zwar in einer möglichst weitgehenden konstruktiven Unabhängigkeit von der ursprünglichen und zu wiederholenden Bezugsfläche (Erdoberfläche) bezüglich Anzahl und Abstand untereinander und zum Erdboden (Stockwerksbau) und
2. für die Errichtung von ebenen, raumeinschließenden Hüllen zur Herstellung und Fixierung künstlich veränderbarer Volumina (Hallen).

Das Prinzip, die Zugbeanspruchbarkeit eines Materials von den anderen Beanspruchungsmöglichkeiten zu isolieren und daher den Querschnitt des Materials auf diese Beanspruchungsart zu beschränken, bildet die Grundlage der untersuchten Systeme. Die Gesetzmäßigkeiten und Anforderungen, die dieses Prinzip stellt, werden analysiert. Um die Möglichkeit herzustellen, in einem Tragsystem aus Zugelementen Kraftangriffspunkte auf einer Geraden oder Ebene anzuordnen, müssen Spreizstäbe in dieses Tragsystem integriert werden.

Das Ergebnis dieser Entwicklung sind Tragstrukturen, deren Zusammengehörigkeit dadurch erkennbar ist, daß sie alle auf einem Grundelement, einem Seil-Stabträger, basieren.

1, 2
Modell M 3: orthogonales Seil-Stabträgerrostsystem.

Maquette M 3: Maille orthogonale portante à câbles et barres.

Model M 3: orthogonal cable-and-rod system.

3
Seil-Stabträgerbrücke mit abgehängten Seil-Stabtragwerksdecken (Ausschnitt einer urbanen Struktur).

Tablier porteur à câbles et barres avec structures de planchers suspendues (Partie d'une structure spatiale urbaine).

Cable-and-rod supporting deck with suspended cable-and-rod ceilings (detail of an urban spatial structure).

Sie sind den Tragwerken mit überwiegend zugbeanspruchten Konstruktionselementen zuzuordnen, da die vorhandenen Stäbe nicht zusammenhängend angeordnet sind, kleinere Normalkräfte als die zugbeanspruchten Elemente aufzunehmen und eine vergleichsweise kurze Länge haben.
Tragwerke, die auf der Kombination von Seil-Stabträgern basieren, sind brauchbar für Konstruktionssysteme von Hoch- und Verkehrsbauten, bei denen Strecken- oder Flächenlasten auf eine Gerade oder auf eine Ebene bezogen zu den Endpunkten oder Rändern abgetragen werden, wenn diese Endpunkte oder Ränder fixiert sind.
Bei konsequenter Anwendung entstehen durch geringes Materialgesamtgewicht und durch Verwendung weniger, leicht transportierbarer und montierbarer Serientypenteile vorteilhafte, der genannten Funktion entsprechende Tragwerke, die einen technologischen Fortschritt darstellen, weil sie durch geringes Eigengewicht größere Dimensionen bezüglich Spannweite, Stapelung und kompakter Anordnung durch Vermischung verschiedener Tragwerksarten und damit Vorteile für die tragwerksabhängige Ausbau- und Installationstechnik und für funktionelle Zusammenhänge ermöglichen. Diese konsequente Anwendung als Voraussetzung läßt progressive Strukturformen entstehen, die aus einer Koordination konstruktiver, nutzungs- und variabilitätsbezogener Funktionen resultieren.

Tragverhalten von zugbeanspruchten Tragwerken

Die Tragwerke mit überwiegend zugbeanspruchten Tragelementen unterscheiden sich darin, daß bei ihnen alle angreifenden Kräfte in Resultierende zerlegt werden, die axial entlang der Tragelemente verlaufen und gegebenenfalls über größere Umwege vom Kraftangriffspunkt ausgehend sich von den Fundamenten entfernen, von den Tragwerken mit druck- und biegebeanspruchten Tragelementen, bei denen die Kräfte, wenn auch differenziert und über horizontale Umwege, sich von den Fundamenten nicht entfernen.

Die zugbeanspruchten Tragelemente haben nur die Möglichkeit, eine nach innen gerichtete Kraft als Komponente des Widerstandes gegen diese Kraft nach außen zu leiten. Dabei ändert sich bei diesen Komponenten mit der Richtung die Widerstandsgröße, während mit der Länge ihre Beanspruchung nicht zunimmt. Daher spielen die Umwege nach außen für die Dimensionierung dieser Tragseile keine Rolle, sondern nur für die Konstruktionselemente, die diese Kräfte wieder zurückleiten müssen. Denn alle Kräfte, die durch zugbeanspruchte Konstruktionselemente nach außen abgeleitet werden, müssen durch druck- oder biegebeanspruchte Bauteile wieder zu den Fundamenten zurückgeführt werden. Die Baustruktur muß nach außen gespreizt werden, und zwar in einem Maße, das eine nutzungsentsprechende Ausbeute der eingeschlossenen Fläche oder des eingeschlossenen Volumens ermöglicht. Druckmaste als Spreizelement haben den Vorteil der direkten momentenfreien Lastübertragung.
Dabei entstehen die Tendenzen, entweder die abzuleitenden Kräfte auf einen Mast zu konzentrieren oder die Stäbe diskontinuierlich in größerer Anzahl anzuordnen. Die Entscheidung darüber ist statisch gesehen abhängig von dem Verhältnis der Spreizlänge zu dem Abstand der zu spreizenden Konstruktionsteile und von dem Verhältnis der Stablänge zu seiner Belastung. Diese zwei Tendenzen deuten eine Unterteilung der abgehandelten Tragwerke an.

Konzentrierte Mastspreizung

Je kleiner bei einem Druckstab das Verhältnis von Stabkraft zur Knicklänge ist, desto ungünstiger wird in Stützenlängenmitte das Verhältnis der Querschnittflächenanteile zueinander, die für die Druckspannung und für die Knickspannung genutzt werden. Durch diese Voraussetzung entsteht die Tendenz, Druckmasten erstens in der Knicklänge zu reduzieren und zudem Konstruktionsanordnungen zu finden, wo die Zusammenlegung mehrerer Druckstäbe zu einem ermöglicht wird ohne nachteilige Auswirkung auf die davon abhängigen Tragwerksteile.
Die Systeme mit konzentrierter Mastspreizung werden grob in abgehängte Schwergewichtstragwerke und in Tragwerke, die als geschlossene Systeme in sich selbst oder als offene Systeme mit den Fundamenten auf der Erdoberfläche verspannt sind, eingeteilt. Die genannten vorteilhaften Anordnungen sind bei den Masthäusern möglich, wo ein Mast die Endpunkte der radialen Schrägseile von der Bezugsebene abspreizt. Dabei sind die vom Mast abhängigen Tragseile keinen Nachteilen unterworfen, denn durch ihre Zugbeanspruchung wirkt sich ihre Länge nicht querschnittsvergrößernd aus. Da jedoch die Länge des Mastes im Vergleich zur Breite der Basis beträchtlich werden kann, sind Anordnungen denkbar, bei denen der Mast in sich verspannt ist oder mehrere Teilmaste übereinandergestellt und mit dem abhängigen Seilsystem oder unabhängig mit der Basis verspannt werden.
Auch für die Seilgeometrie entstehen durch die Systemkonzentration auf die Mastspitze vorteilhafte Anordnungen, da dadurch keine geometrischen oder Spannungsüberschneidungen entstehen. Bei größerer horizontaler Ausdehnung und bei mehreren Volumenschwerpunkten können solche Mastsysteme miteinander korrespondierend kombiniert werden.

Radiale Masthalle

Definition: Halle ist ein nicht gestapelter Raum mit spezieller Stützenfreiheit oder speziell ausgebildetem Dach.
Dieses System setzt sich zusammen aus einem in der Grundform senkrechten Mast, von dessen Spitze radiale Tragseile zu einem konzentrischen Ringfundament (biegebeansprucht, mit Auflast oder mit Zugankern versehen) führen, die wiederum durch konzentrische Spannseile auf Höhenlinien komplettiert werden. So entsteht eine gegenläufig gekrümmte Seilnetzfläche. Mast und Seilnetz stabilisieren sich gegenseitig.

Radiales Masthaus

Der Übergang von der Masthalle zum Masthaus erfolgt dann, wenn die gegenseitige Stabilisierung der Tragseile und dadurch des Mastes anstelle der Spannseile von Stockwerksdecken übernommen wird, welche im systementsprechenden konsequenten Fall als zugbeanspruchte Systeme ausgebildet sind. Anschließend werden die statischen Voraussetzungen für die Masthäuser analysiert:
Um eine räumliche Spreizung zu erreichen, müssen mindestens drei Punkte in einer Ebene und ein vierter außerhalb dieser Ebene auseinandergespreizt werden. Die einfachste Regelform entsteht durch drei im ebenen Bodenfundament verankerte Punkte als Ecken eines Dreieckes und durch den durch einen Stab abgestützten vierten Punkt. Eine Differenzierung der Form entsteht durch Addition der Kanten, die zur Spitze führen. Sie bringt gleichzeitig eine Vergrößerung des Volumens, eine Vermehrung der zugbeanspruchten Konstruktionselemente unter Beibehaltung der druckbeanspruchten. Es ist die geometrisch und konstruktiv einfachste Form, die nach den genannten Kriterien entwickelt werden kann. Die Verankerung der Seilenden in Fels oder in einen Druckring am Boden bietet die einfachste Möglichkeit der konstruktiven und montagetechnischen Durchführbarkeit.
Wenn die Bindung des Druckringes an den Boden wegfällt, entsteht bei der günstigsten Kräfteverteilung ein symmetrisches Gebilde, bei dem der Druckstab zu beiden Seiten des Druckringes hervorsteht, wobei seine Enden mit der Peripherie des Ringes verspannt sind. Diese Struktur ist, unabhängig von Fundierung und sogar Erdanziehung, stabil und kann in verschiedenen Größenordnungen vorteilhaft sein. En miniature erscheint sie als Fahrradrad; in größerer Dimension kann sie als Hallendach, schwimmendes Gebäude oder – der Vollständigkeit halber genannt – als künstlicher Satellit Verwendung finden. Eine Addition des Systems bei Kupplung der Druckringe in horizontaler Richtung ist möglich. Der Ring kann sich zur Platte ausweiten. Ein zusammenhängendes Gebilde von Radialseilsystemen spannt sich zwischen den oberen und unteren Enden der Druckmaste.
Alle diese Radialstrukturen sind gut geeignet, zugbeanspruchte, verspannte Zwischendecken mit Innenausschnitt aufzunehmen, weil die Radialseile in der Lage sind, durch sinnvollen Seillinienverlauf entsprechend große Horizontalkräfte aufzunehmen. Die relativen Anteile der horizontalen und vertikalen Kräfte an der auftretenden Gesamtkraft richten sich nach der Form des Gebildes, und zwar zwischen den Grenzen, daß der unterste Abschnitt der Radialseile waagerecht gespannt wird, wobei der horizontale Kraftanteil unendlich groß wird, d. h. als Mechanismus wirkt und deshalb unmöglich ist, oder daß die Tragseile senkrecht verspannt sind und keinen horizontalen Kraftanteil aus Normalkräften haben.
Theoretisch sind alle zwischenliegenden Fälle möglich, jedoch sind die zutreffenden Kriterien für die Formbildung und notwendige Spannungsentwicklung für alle dadurch beeinflußten Konstruktionselemente so auszuwerten, daß ein günstiges Verhältnis von auftretenden Kräften zu anderen notwendigen Funktionen entsteht.

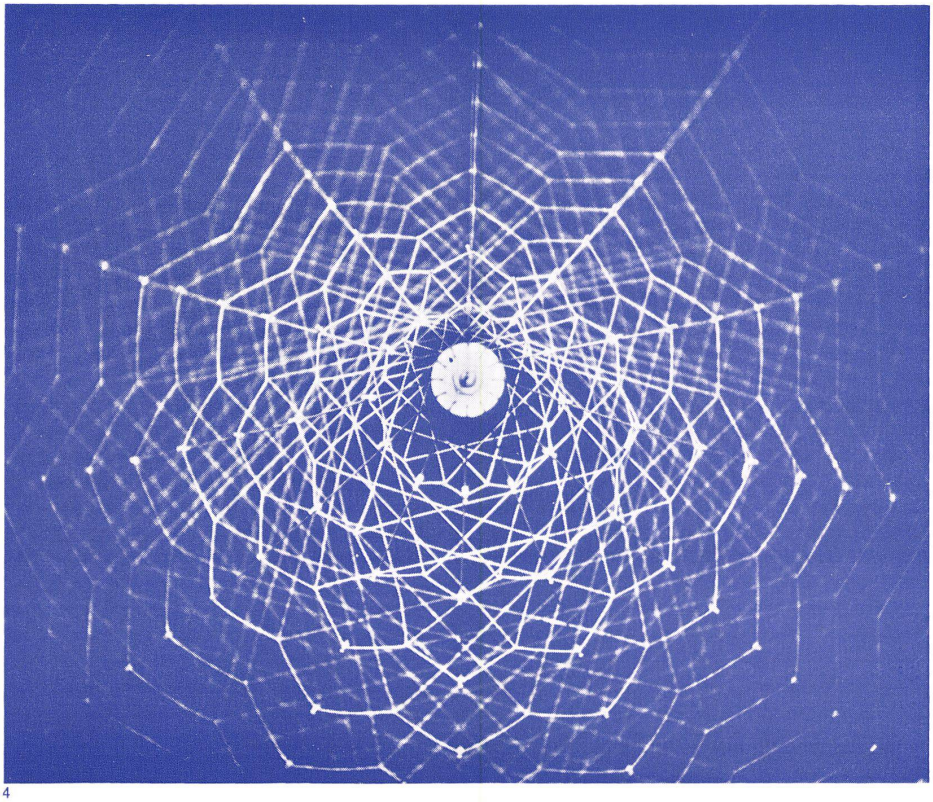
Differenzierung des Masthauses

Für komplexe Bauaufgaben sind vielseitige Kombinationsmöglichkeiten denkbar. Durch die statischen Konsequenzen der Stabilität verspannter Seilgefüge, im Rahmen der Komponentenaufteilung die Seilanordnungen zu differenzieren, ergeben sich verschiedene Kombinationsarten.
Durch horizontale Addition können nebeneinanderstehende, gleich- oder verschiedenartige Masthäuser an der Basis durch hallenartige oder stockwerksbildende Füllelemente zusammengeschlossen werden, und zwar nach linearem Reihenprinzip oder nach zentralem Ballungsprinzip.

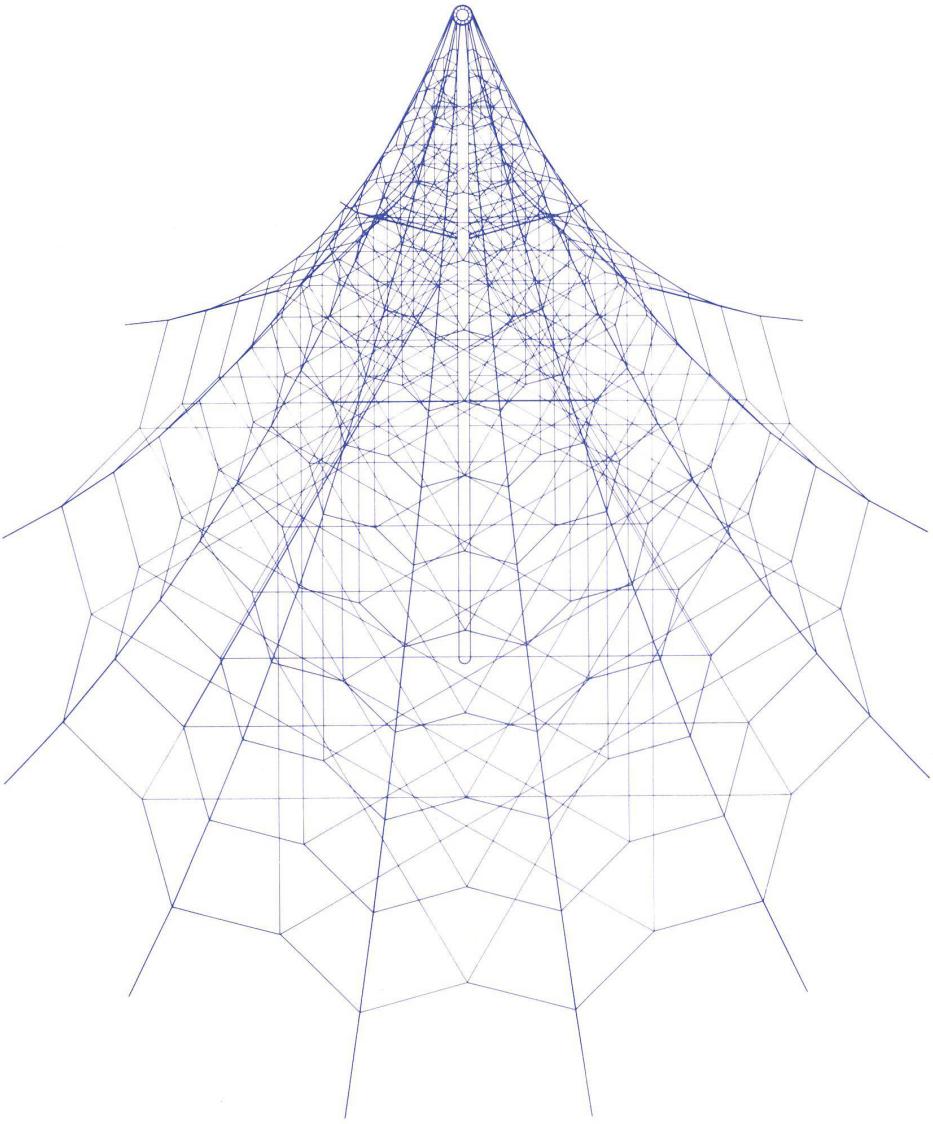
Bei vertikaler Addition kann der interne statische Aufbau variiert werden, indem gleichsam durch Übereinanderstülpen von Seillagen mehrere radiale Tragseilscharen den Mast und die Stockwerksdecken stabilisieren. Kombinationen von Hallen- und Stockwerkssystemen sind herzustellen durch die Wahl der inneren Deckenausschnitte und durch ihre Abstimmung untereinander. So können periphere Deckenstreifen eine innere Halle umschließen, welche von Galerien, Brücken, Rampen und vertikalen Verkehrsträgern ausgefüllt werden kann.
Die Schwimmfähigkeit eines Masthauses wird erreicht, indem die Basis als Druckring oder -scheibe ausgebildet wird und sich ein spiegelbildlicher Kegel an den nach unten verlängerten Mast anschließt. Das eingeschlossene Volumen unter der Wasseroberfläche übernimmt den Auftrieb, Abspannungen von der unteren Mastspitze nach unten stabilisieren das gesamte Gebilde bei Wellengang und unterschiedlichen Gezeiten.
Kombinationen verschiedener Arten können gemischt werden.

Diskontinuierliche Stabspreizung

Es gibt eine Methode, alle Druckelemente eines Tragwerkes voneinander isoliert anzuordnen, um zu gewährleisten, daß alle inneren Kräfte in Zug- und Druckspannungen aufgeteilt werden und daß jedes Tragwerksteil in jedem Belastungsfall nur jeweils eine dieser beiden Beanspruchungsarten aufzunehmen hat, damit es entsprechend dieser Beanspruchungsart ausgebildet werden kann. Da als Tragwerk ein zusammenhängendes Gebilde entstehen soll, müssen zwangsläufig die zugbeanspruchten Elemente eine Verbindung untereinander herstellen. Auf diese Weise wird sichergestellt, daß keinerlei Momentenbelastung in einem solchen Tragwerk entstehen kann, da alle Kraftanschlüsse infolge der flexiblen Zugelemente gelenkig ausgebildet sind. Außerdem haben diese Tragwerke wie alle anderen auch Funktionen zu erfüllen hinsichtlich Belastbarkeit und Benutzbarkeit im räumlichen Sinne. Deshalb besteht in jedem diversen Fall die Notwendigkeit, Druckstäbe und Seile nach einem Prinzip anzuordnen, das diese Funktionen erfüllt. Für die Erfüllung bestimmter Funktionen ist eine geometrische Differenzierung des Tragwerkes notwendig, die nicht mit der konzentrischen Mastspreizung erreichbar ist. Dort ist die differenzierte Stabspreizung anzuwenden.
Um die Vorteile der Separierung aller Druckelemente auszunutzen bei Kontinuität der Zugelemente – Materialeinsparung durch ideale Ausnutzung der Elementenquerschnitte und Ausnutzung von hohen Materialfestigkeiten für größere Spannweiten –, sind die schon genannten Verhältnisse der Spreizlänge zu dem Abstand der zu spreizenden Konstruktionsteile und der Stablänge zu seiner Belastung zu kontrollieren. Dicht stehende Druckstäbe gleicher oder ähnlicher Belastungsrichtung sind zu koordinieren. Zugelemente können zum Vorteil ihrer Herstellung und ihrer Verbindungselemente (Knoten) differenziert werden. Kraftumwege



4

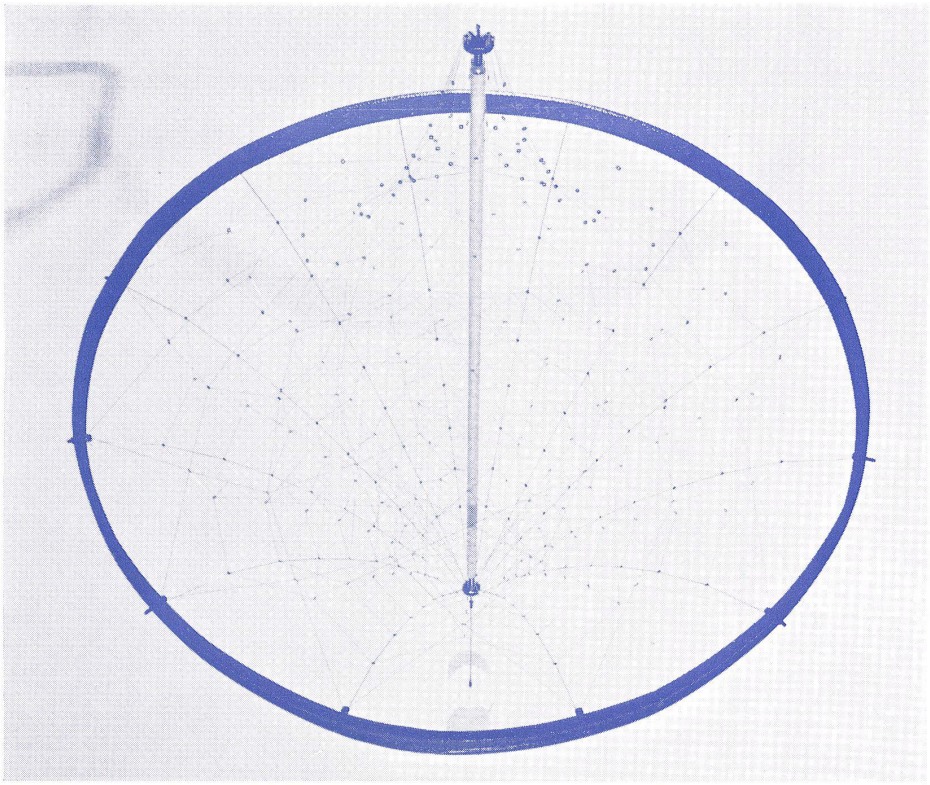


5

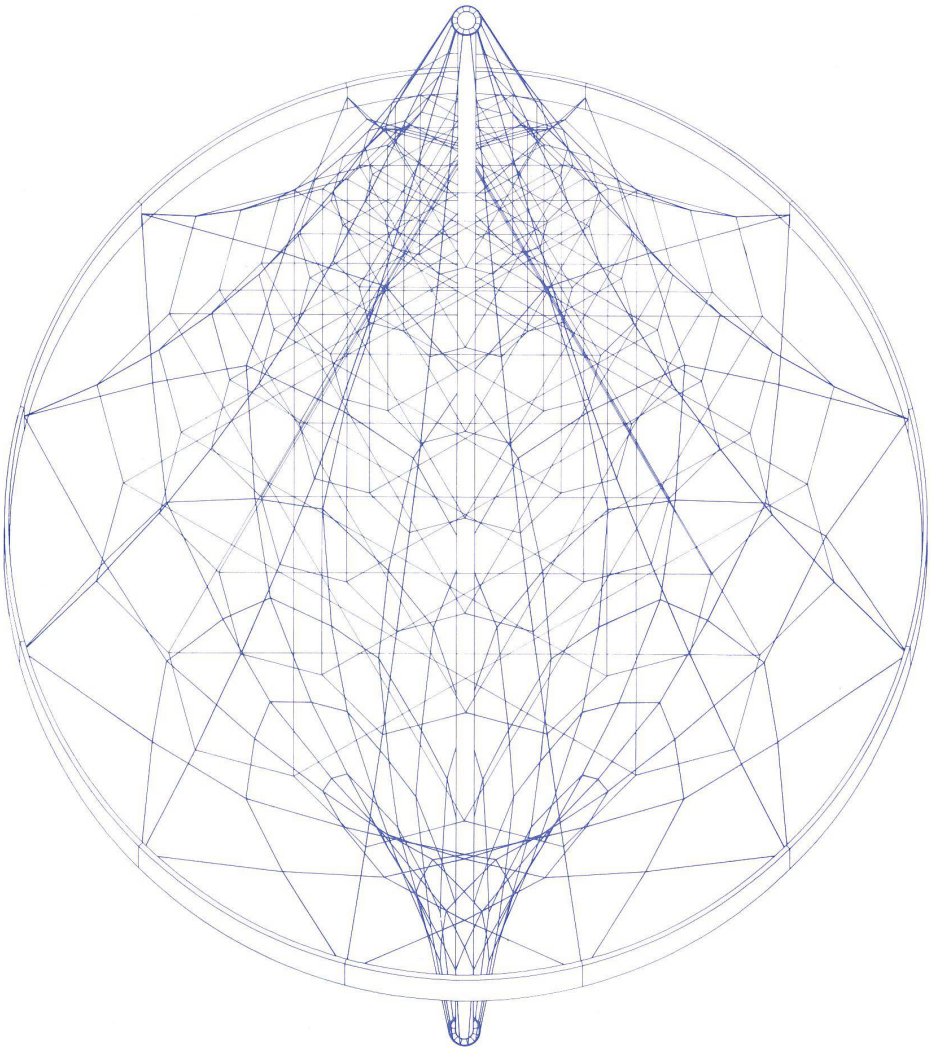
4, 5
Modell M 1: rotationssymmetrisches, radiales Schrägseilwerksystem mit Mittelmast (Masthaus).

Maquette M 1: Structure radiale (Rotation symétrique) à câbles inclinés avec mât central (Maison mât).

Model M 1: Radial structure (symmetrical rotation) with inclined cables and central mast structure.



6



sollten wegen der materialdehnungsbedingten Verschieblichkeit vermieden werden, wenn sie keine konstruktiven und funktionellen Vorteile bringen wie z. B. Konzentrierung von Druckelementen oder freie Überspannung bestimmter Bereiche.
Zu einem Prinzip zählen solche Tragwerke, bei denen die Stäbe nicht die Form der Tragstruktur bilden, sondern nur vorhanden sind, um die Verschiebung des Systems bei Belastung zu verhindern und um damit das Tragverhalten herzustellen. Die Stäbe könnten bei Entlastung herausgenommen werden, ohne daß das System der Seile seine Form verändern würde. Sie garantieren die Unverschieblichkeit des Seilgefüges. Diese Konstruktionsanordnung tritt auf, wenn das Tragwerk zwischen zwei Punkten oder innerhalb einer Umfassung verspannt wird und Kräfte senkrecht zu dieser Verspannungslinie oder -fläche aufzunehmen hat. Alle im einzelnen später erläuterten Seil-Stabträgersysteme sind in diese Gruppe einzureihen.

Grundform Seil-Stabträger

Dieser Seil-Stabträger weist eine sehr einfache geometrische Form auf, beste Kombinationsmöglichkeiten und Wirkungsweise und ein großes Spektrum von Anwendungsmöglichkeiten, welche Eigenschaften im folgenden erläutert werden.
Zwei horizontale Gurtseile, ein oben- und ein untenliegendes, sind zwischen den seitlichen Kraftanschlußpunkten angeordnet. Dazwischen sind in regelmäßigen Abständen senkrechte Spreizstäbe eingesetzt. Die entstehenden Rechtecke werden durch diagonal verlaufende Seilabschnitte ausgefüllt, deren Schnittpunkte miteinander und mit den Stabenden fixiert werden. Veränderliche Daten sind das Verhältnis von Spannweite zur konstruktiven Höhe, die Anzahl der Stäbe einer angenommenen Länge und somit das Seitenverhältnis der Rechtecke sowie das Querschnittsverhältnis von Gurt- und Diagonalseilen und die davon abhängige Querschnittswahl der Druckstäbe.
Bei vorgesehener Belastung längs der Stabachse tritt eine Verformung des Seil-Stabgefüges auf, die durch Anordnung der spannungsaufnehmenden Tragelemente zu Dreiecken in engsten Grenzen gehalten wird. Durch diese Verformung entsteht eine Dehnung der Zugelemente und eine Stauchung der Druckstäbe, die mit den entstehenden Spannungen korrespondieren. Diese Spannungen sind Komponenten des Widerstandes gegen die auftretende Belastung.
Infolge der Seitenverhältnisse der großflächigen Dreiecke entstehen Spannungsresultierende, die so günstig durch Seilkomponenten aufgenommen werden, daß keine wesentlichen Spannungssteigerungen auftreten. Zum Widerstand gegen Verformung und damit zum Tragverhalten tragen dabei alle, auch sich überschneidende Dreiecke bei, deren Ecken aus Kreuzungen sich fixierender Seile oder Stäbe bestehen, mit Aus-

6, 7
Modell M 2: rotationssymmetrisches, radiales Schrägseilwerksystem mit Mittelmast und Druckring (schwimmendes Masthaus).

Maquette M 2: Structure radiale (Rotation symétrique), à câbles inclinés avec mât central et anneau de compression (Maison mât flottante).

Model M 2: Radial structure (symmetrical rotation) with inclined cables and central mast structure and pressure ring (floating mast structure).

nahme der Dreiecke, von denen eine Seite im Belastungszustand entlastet wird.
Bei vorgespannten Seil-Stabträgern entsteht die Spannung nicht nur durch Belastung aller Seile und Stäbe, sondern das System ist vorgespannt, damit die Zugelemente in keinem Fall auf Druck belastet werden. Die einzelnen Dreiecke verformen sich bei gleicher Belastung geringfügiger als bei nicht vorgespanntem System, obwohl die gleiche für den Widerstand gegen Belastung notwendige Spannung entsteht. Das Tragwerk kann Kräfte in beiden entgegengesetzten Richtungen der Stabachsen aufnehmen, da jedes Tragseil durch Ineinandergreifen der Dreiecke zugleich Spannseil ist. Für jeden gleichmäßigen Belastungsfall läßt sich, korrespondierend mit den Seilquerschnitten, eine optimale Vorspannung errechnen, die bei maximaler Belastung geringsten Durchhang entstehen läßt.
Die Summe der vertikalen Auflagerkomponenten entspricht der Summe der Belastung, während die horizontalen Seilkräfte der Vorspannung des Systems zuzüglich der horizontalen Kraftkomponente entsprechen. Für den Anschluß an ein Seilsystem oder für einen sonstigen gelenkigen Anschluß eignet sich am besten der Einpunktanschluß, bei dem die beiden Gurtseile von dem letzten Druckstab aus zu einem Punkt zusammengeführt werden.

Differenzierung innerhalb des Trägerquerschnittes

Zur Vermeidung einer seitlichen Ausknickung der oberen Stabenden und zur konstruktiven Ausbildung der Seil-Stabanschlüsse kann die Querschnittsform des Seil-Stabträgers variiert werden. Da das horizontale Moment gering ist, genügt eine kleine symmetrische Exzentrizität der Seil-Stabanschlüsse. Anwendbar sind Querschnitte in V-Y-X-T-I-Form. Momente in den Stäben sind zu vermeiden, können aber bei geringerer Exzentrizität durch die entsprechende Ausbildung der Stabköpfe aufgenommen werden.

Addition

Eine Längsaddition ist statisch insofern günstig, weil an der unterstützten Kupplungsstelle die entgegengesetzten horizontalen Spannungskomponenten sich gegenseitig aufheben. Die additive Reihung ist deshalb um so vorteilhafter, je öfter sie sich wiederholt, weil der konstruktive Aufwand, die gleichgroßen horizontalen Kräfte in den Boden zu führen, in jedem Fall nur zweimal auftritt, während die vertikalen Unterstützungen jeweils nur der anteiligen vertikalen Belastung entspricht. Ebenso sind auch horizontale Verzweigungen des Systems möglich, solange sie den horizontalen Kraftkomponenten entsprechen.

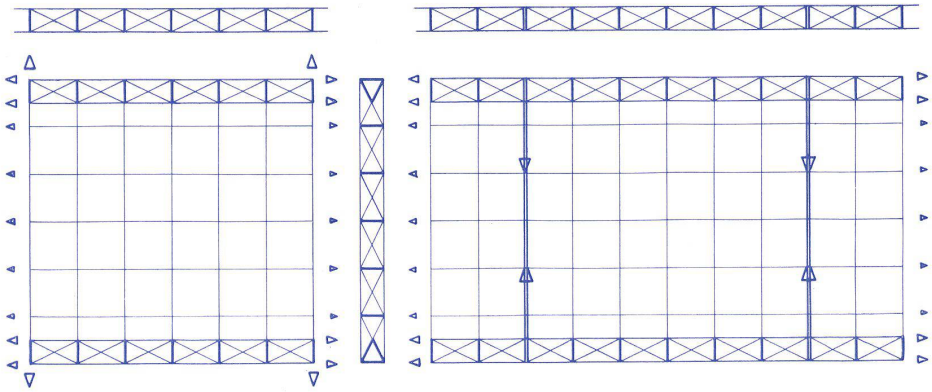
Zweiläufige orthogonale Durchdringung

Die Vorteile der Durchdringung von Seil-Stabträgern beim Überspannen von Flächen bestehen einmal in der Aussteifung der Träger gegen Umkippen der Stäbe, zum anderen in der differenzierten Kräfteverteilung besonders bei ungleichmäßig verteilten Lasten, analog wie bei Trägerrostsystemen mit sich durchdringenden biegesteifen Trägern.
Die orthogonale Durchdringung im Quadrat- oder Nahquadratraster ergibt ein räumliches Tragwerk, welches Abdeckungen, horizontale und vertikale Anschlüsse nach orthogonalen Typisierungsprinzipien erlaubt. Stapelung des gleichen Systems mit gleichen Abmessungen sind für den Stockwerksbau realisierbar, wenn Maßnahmen zur Ableitung der horizontalen Spannkräfte angewendet werden. Solche Maßnahmen sind bei geringem Abstand des Rostsystems vom Boden biegesteife Stützen oder Abspannungen über Pendelstützen an jedem Trägerende. Eine Ableitung der Kräfte über horizontal liegende, biegesteife Rahmen ist möglich auch unabhängig von dem Abstand zum Boden.
Im Zusammenhang mit dem Seil-Stabträgerrost erscheint es sinnvoll, den Abfangträger ebenfalls als Seil-Stabträger mit horizontaler Wirkungsweise auszubilden. Hiermit wird ein komplexes System angeboten, die horizontalen Auflagerspannungen aufzufangen und den Seil-Stabträgerrost für den Stockwerksbau zu realisieren. Dabei werden Randträger mit Dreiecksquerschnitt in die geometrische Form des Rostes eingefügt und die Spannungskräfte zur Seite abgeführt bis zu einem Punkt, der mit dem entsprechenden, gegenüberliegenden durch einen horizontalen Druckstab auseinandergespreizt wird. Diese Methode ist speziell geeignet für Tragwerke, die sich in der Länge addieren, so daß dieses Spreizelement durch den Tragwerkrost gegen Knicken in horizontaler Richtung ausgesteift wird, während es sich in vertikaler Richtung durch seine statische Höhe, die der des Rostes entspricht, selbst aussteift.
Druck- oder Hängestützen, die an diesen Trägern angreifen, übernehmen die vertikalen Lastanteile. Entweder führen Druckstützen die Lasten direkt in den Boden oder Hängestäbe über längsliegende Brückenträger, die ebenfalls nach dem Seil-Stabsystem zwischen die Hauptkerne gespannt sind. Ausschnitte für Treppen werden auch von solchen Seil-Stabrandträgern eingefaßt.
So entsteht ein Deckensystem, bei dem abgesehen von den senkrechten, diskontinuierlichen Stäben nur wenige gut ausgesteifte Spezialelemente vorhanden sind, die die querlaufenden Spannkräfte ausgleichen, während die längslaufenden, sich nicht addierenden Spannkräfte – sowohl die der Brükkenträger als auch die der einzelnen Stockwerksdecken – nur an den Enden des Systems abgefangen werden.

Tangentialsystem

Mit diesem System wird erreicht, daß bei zentralsymmetrischer Anordnung nur gerade Seil-Stabträger vorhanden sind, an deren Kreuzungspunkten die Stäbe liegen oder die Diagonalseile sich kreuzen, entsprechend der etwa gleichmäßigen Aufteilung des Trägers durch die Stäbe. Die entstehenden viereckigen Felder erhalten ihre Form und Größe durch die geometrische Zwangsläufigkeit und können nur durch andere Sehnenlagen variiert werden.
Die Sehnen des peripheren Kreises sind Tangenten des zentralen Ausschnittes. Die Randspannungen des Ausschnittes werden auf direktem Weg über die Träger abgeleitet. Die Peripherie des Ausschnittes ist durch die Durchdringung der Träger so steif, daß leicht ein sekundäres Fülltragwerk angeschlossen werden kann. Zusätzliche Unterstützungen können an jedem Stab und an jeder Diagonalseilkreuzung angebracht werden, gleichmäßige Verteilung vorausgesetzt.
Es besteht eine Aussteifung gegen tangentiale Kräfte und gegen Verformung des Grundkreises. Die horizontalen Spannkräfte werden geradlinig, daher ohne Umwege an die übergeordnete Unterstützungsstruktur angeschlossen.
Die Feldausschnitte, deren Größe und Ähnlichkeit sich nach innen kontinuierlich verändern, können durch zusätzliche Unterteilungen mit Stäben, aber ohne Gurtseile unterteilt, und die offenen Randausschnitte durch ebensolche Maßnahmen geschlossen werden, so daß die Zusatzstäbe die gleiche Belastung aushalten wie die der Seil-Stabträger.
Die Auffüllung und Abdeckung des Rostes für den Gebrauch als Stockwerksdecke kann durch biegebeanspruchte Abdeckplatten oder mittels HP-Netzen geschehen, die in die Vierecke eingehängt werden, indem die oberen Stabenden als Hochpunkte und die Diagonalkreuzungen als Tiefpunkte eingesetzt werden. Jeweils die Netze auf der gleichen Peripherie sind gleich.

SEIL-STABTRÄGER in Längsaddition



SEIL-STABTRÄGER mit Randträgern

mit Randträgern + Spreizträgern

8
Seil-Stabträger in Längsaddition.
Seil-Stabträger mit Randträgern.
Seil-Stabträger mit Randträgern und Spreizträgern.

Treillis porteurs à câbles et barres en addition longitudinale.
Treillis porteurs à câbles et barres avec poutres de rive.
Treillis porteurs à câbles et barres avec poutres de rive et poutres d'écartement.

Cable-and-rod structure, longitudinal addition.
Cable-and-rod structure, with peripheral girders.
Cable-and-rod structure, with peripheral girders and spreaders.

Anwendung

Das orthogonale System ist charakterisiert durch die schwerpunktlose, abgleichende, beliebig begrenzbare, erweiter- und reduzierbare Struktur. Die Anwendbarkeit ist durch die Möglichkeit der vielfältigen Differenzierung und durch die Reduzierung der seitlichen Anschlußpunkte für die horizontalen Kräfte nach Entwicklung der Randträger in breitem Rahmen gewährleistet. Auch ist eine Typisierung der Konstruktions- und Ausbauteile systemgemäß.

Einzelträger (Brückenträger)

abhängig von seitlichen Anschlußpunkten
an eingespannten Masten oder Stützen
an abgespannten Masten oder Stützen
in räumlichem Seil- oder Stabsystem integriert
mit unten- oder obenliegender Platte als Brücke
mit unten- und obenliegenden Platten als Brückengebäude
mit abgehängten Geschossen als Brückenträger
mit aufgeständerten Geschossen als Brückenträger
mit senkrechten oder schrägen Abspannungen zum Boden für zwischengespannte Geschosse
mit senkrechten Abspannungen zwischen je zwei übereinanderliegenden Brückenträgern für zwischengespannte Geschosse

Die Einzelträger sind allein mit den beschriebenen differenzierten Trägerquerschnitten zur Eigenstabilisation oder durch Addition mehrerer Einzelträger nebeneinander als Primärtragwerk für Brücken verschiedener Art zu verwenden: Die Träger können einzeln verlaufen zur Aufnahme von Leitungen usw. oder Laufkatzen, parallel geführt nebeneinander zu Aufnahme von unten- oder obenliegenden Plattformen, Fahrbahnen oder sonstige Nutzflächen mit konventionellen biegebeanspruchten ein- oder zweiseitig gerichteten Plattensystemen oder mit Seil-Stabträgerrosten, die zwischen querliegende Spreizstäbe gespannt werden. Außerdem kann eine sinnvolle Anzahl von Geschoßdecken konventioneller Art oder nach Seil-Stabträgerprinzip, oder eine Zellenstruktur abgehängt oder aufgeständert werden. Die konstruktive Einheit läßt sich in der Höhe addieren und in der Länge, was besonders günstig ist, da die Horizontalkräfte der sich an der Vertikalunterstützung verbindenden Anschlußpunkte zweier aneinandergereihter Träger sich gegenseitig aufheben. Diese Brückenträgereinheiten sind bis auf die weit voneinander entfernten Vertikalunterstützungen von der Bezugsebene unabhängig, so daß sich von unten her nach anderen Prinzipien konzipierte Strukturen entwickeln können.

Einzelrost und horizontale Addition (Hallen)

abhängig von seitlichen Anschlußpunkten
abhängig von Randträgern und Eckanschlußpunkten
an eingespannten Masten oder Stützen
an abgespannten Masten oder Stützen
in Stab- oder Seilsystem integriert

Ebene orthogonale Hallendächer können aus parallelen Seil-Stabträgern einsinnig gespannt oder besser sich orthogonal durchdringend aus einem Rost bestehen. Für die Paralleltäger ist jedes Seitenverhältnis denkbar, für die Trägerroste ist das Quadrat oder das Nahquadrat die Grundform, mittels stärker dimensionierter, quergespannter Seil-Stabträger etwa im Abstand der Hallenbreite können aber Additionen in jeder Länge ohne Erhöhung der längswirkenden Horizontalkräfte hergestellt werden bei Erhaltung der sich durchdringenden Tragwirkung.
Viele Gebäudefunktionen lassen die Tendenz zum Großraum erkennen, der den Bedürfnissen entsprechend aufgeteilt wird. Eine freie Grundrißfläche ohne oder mit weit auseinanderliegenden Innenstützen sollte zur Verfügung stehen für die Flexibilität und Variabilität des Ausbaus und der Einrichtung.

Gestapelte Roste (Stockwerksbau)

1. vertikale Abstandshalter:

Geschoßtiefe beliebig
abhängig von Randträgern, horizontalen Spreizstäben und Kraftumleitung über Druckstützen direkt (begrenzte Geschoßhöhen)
oder über Zugstäbe auf Umwegen in den Boden (beliebige Geschoßhöhen)

2. schräge Abstandshalter:

Geschoßtiefe entsprechend dem Schrägseilverlauf
abhängig von Randträgern, seitlichen Anschlußpunkten und Kraftumleitung über Schrägseile teils direkt, teils über Umwege in den Boden (beliebige Geschoßhöhen)

Die Roste in gestapelter Anordnung können alle Stockwerksfunktionen erfüllen, wenn die Randverspannungen und Abstandshalter konstruktiv gelöst sind. Je größer die Einzelflächen und die Additionen in beiden Richtungen ausfallen, desto kleiner ist die Relation der Randprobleme bei gleichmäßiger sinnvoller Unterstützung der Roste zu den konstruktiven Vorteilen.
Deshalb ist die einzige Bedingung für die konsequente Anordnung die Kalkulation eines sinngemäßen Größenverhältnisses von Abstand der primären Seil-Stabstruktur vom Erdboden zur addierten Länge der Hauptspannrichtung, um die Abspannungen der Systempunkte in die richtige Relation zu der davon abhängigen Gesamtlänge zu setzen.
Die beiden Methoden, die Horizontalkräfte zweier gegenüberliegender Längsseiten durch horizontale Spreizstäbe auszugleichen oder die Horizontalkräfte über Schrägseile abzuleiten, prägen die konstruktive Anordnung: Im ersten Fall können die Roste in gleicher oder in differierender Größe übereinanderliegen, im zweiten Fall richtet sich ihre Größe nach dem Verlauf der Schrägseile.
Wenn die vertikalen Kräfte über Druckstützen in den Boden geleitet werden, muß die Knicklänge der Stützen berücksichtigt werden, die Geschoßhöhen sind entsprechend begrenzt, und das Tragwerk ist konventionell zu nutzen. Werden die Vertikalkräfte jedoch durch zugbeanspruchte Tragelemente über Trägerbrücken oder filigrane Seil-Stabroste und weit entfernte Kernstützen abgeleitet, dann können beliebige Rostabstände und Aussparungen in verschiedensten Anordnungen hergestellt werden, Teile können nachträglich eingefügt oder demontiert werden. Raumstrukturen wären zu realisieren.

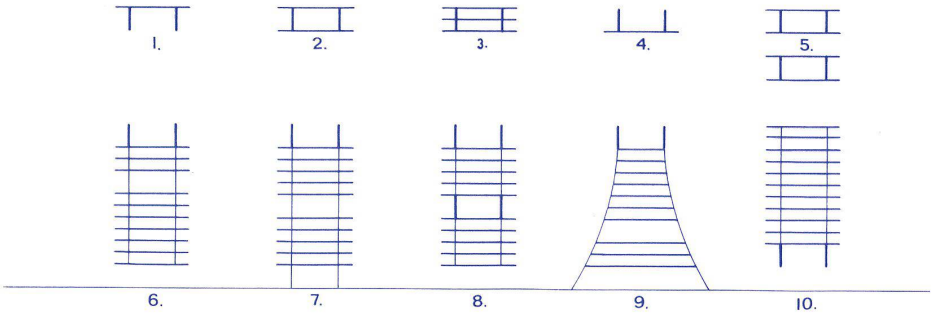
Urbane Strukturen

Während Zentralsysteme als Einzelformen vorteilhafte Eigenschaften besitzen, können Orthogonalsysteme eher die Merkmale progressiver Stadtstrukturen erfüllen.

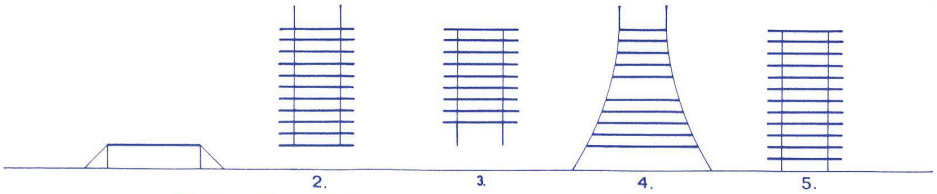
Funktionsaspekte:

Massierung des Volumens

Die Massierung läßt sich in linearen, kammförmigen, rostartigen und vollvolumigen Bauformen vollziehen, bzw. in jeder dazwischenliegenden Kombination und durch Überlagerung verschiedener Größendimensionen.
Prioritätenermittlung der Prämissen bei veränderbaren Zuständen zur Minimierung der Nachteile bei massierter Anordnung
Kontinuität der Bereiche bei wechselnder Dichte
Integration der Folgeeinrichtungen (integrale Zonung)
verschiedene Wertigkeit der horizontalen Richtungen



ANWENDUNGSSYSTEME SEIL-STABTRÄGER



ANWENDUNGSSYSTEME SEIL-STABTRÄGERROST

9

9, 10
Anwendungssysteme Seil-Stabträger.
Anwendungssysteme Seil-Stabträgerrost.

Mise en œuvre de treillis porteurs à câbles et barres.
Mise en œuvre de mailles à câbles et barres.

Application systems, cable-and-rod structures.
Application systems, cable-and-rod grid.

11–13
Modell M 4: rotationssymmetrisches Seil-Stabträgerrostsystem nach Sehnenprinzip.

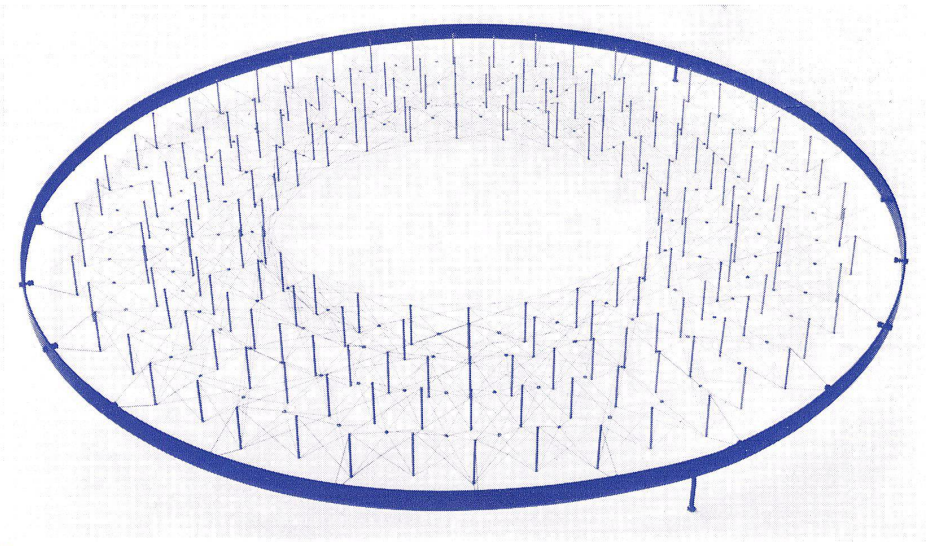
Maquette M 4: Maille portante de rotation symétrique à câbles et barres (Système tangentiel).

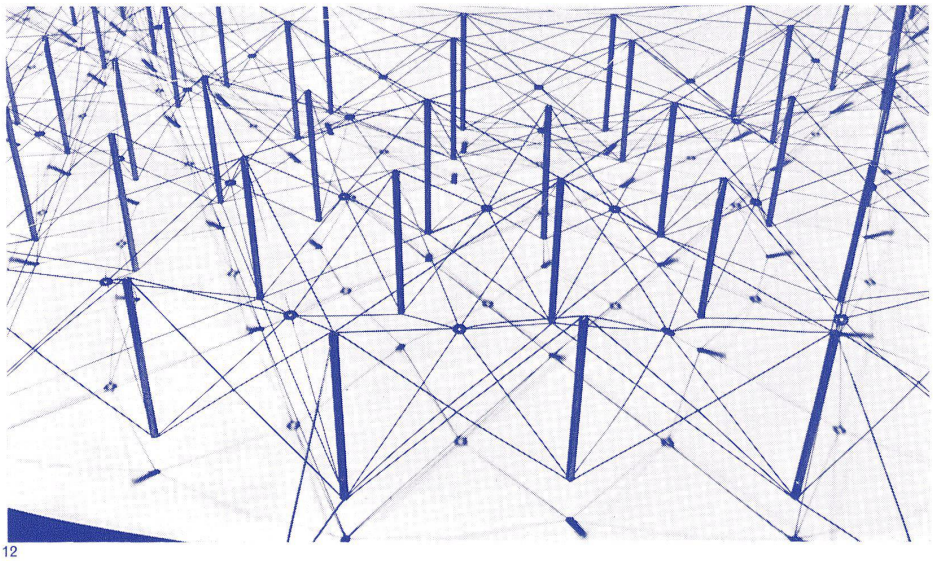
Model M 4: radial (symmetrical rotation) cable-and-rod grid system (tangential principle).

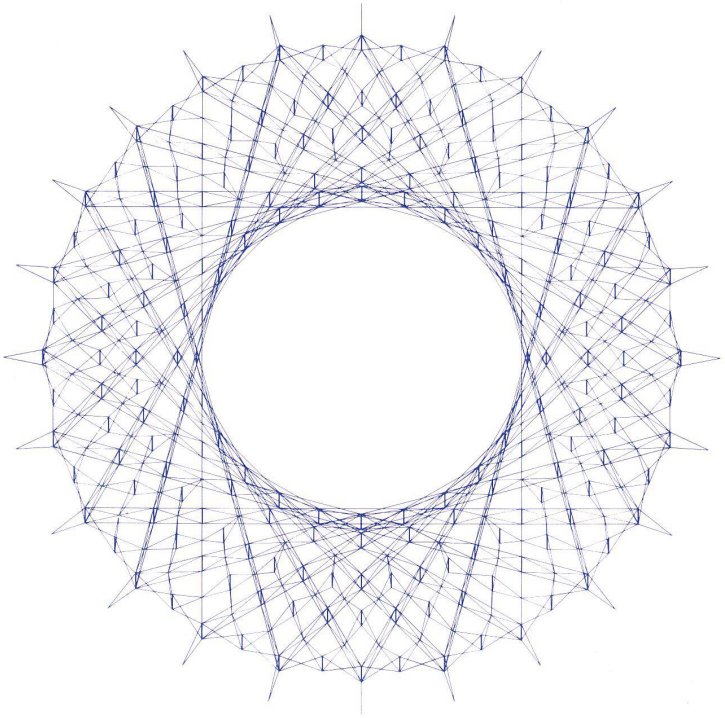
Kommunikationsaspekte:
Durchdringung der abhängigen Erschließungen
lineare Kommunikation durch abgestufte Transportmittel
Klimahüllen für frequentierte Kommunikationsbereiche

Transformationsaspekte
technische Veränderbarkeit (Tragwerk-Ausbau-Installation) innerhalb der Bereichs- und Einheitsgrenzen
Kollisionsfreiheit der Tragwerk-, Ausbau- und Installationselemente
Austauschbarkeit von Bereichsteilen bei Veränderung der Nutzungsstruktur
Abstufung der Veränderbarkeit und Reversibilität aller Elemente entsprechend ihrer Lebensdauer und ihrer statischen Integration
Reserven innerhalb der Struktur
für Makroerweiterung
Reserven innerhalb der Bereiche
für Mikroerweiterung
Gleichheitsprinzip ähnlicher Einheiten
bei Freiheit differierender Anordnung
Adaptabilität
Anpassung an vorhandene Funktionssysteme
Sanierungsmöglichkeit vorhandener und eigener Funktionssysteme
Funktionsfähigkeit eines Systemausschnittes
technologisch-ökonomische Aspekte:
Integrationsmöglichkeit verschiedener Tragwerks- und Bausysteme, entsprechend den Funktions- und Transformationsanforderungen, sowie dem technologischen Entwicklungsstand
industrielle und serielle Herstellung der Bauteile
Optimierung von Transport- und Montage-(Demontage-)vorgängen der Bauteile (auch nachträglich)
Optimierung des Verhältnisses von Nutzlast zu Eigengewicht der Elemente mit statischen Abhängigkeiten
Optimierung des Verhältnisses des Aufwandes der voneinander anhängigen Tragwerksysteme (primär-sekundär-tertiär), um Primärtragwerke bei geringer Vorinvestition für nachträgliche Ausfüllung vorzustrukturieren (notwendig für von Primärstrukturen abhängige Transformationsvorgänge)
Ästhetikaspekt:
Ästhetik als Identifikation der Benutzer mit dem Optimierungsprozeß der Planung und mit dessen Ergebnis
Organisationsaspekte:
Planungsprozeß – Selbstorganisation der Benutzer – Informationsprozeß

Das vielfältige Angebot konstruktiver Möglichkeiten des orthogonalen Seil-Stabträgerrostsystems mit seinen wechselseitigen Abhängigkeiten von übergeordneten Megastrukturen und Differenzierungsangebot in jeder Größenordnung durch Kombination von Hallen, Stockwerken, primären Trägerstrukturen, Verkehrsträgern usw. stellt ein Instrumentarium zur Realisierung solcher Projekte. Die großen freien Spannweiten bei geringer konstruktiver Deckenhöhe und geringem Eigengewicht und die Möglichkeit der Stützenfreiheit zwischen den Kernen bei Großstrukturen mit abgehängten Stockwerken jeweils unterhalb eines Tragkomplexes lassen die Durchdringung von Hallen- und Stockwerkssystemen zu, indem sich die Hallen unter die Stockwerkskomplexe schieben oder indem zwischen zwei gebündelten Stockwerkseinheiten stützenfreie Reserveflächen zur Verfügung bleiben. (Abb. 3)


11


12



13

Systemmodelle

Die Modelle sind zur Verdeutlichung der räumlichen Anordnungen, zur Differenzierung und Korrektur der geometrischen Situation und zur Messung der Spannungs- und Dehnungsverhältnisse entwickelt und konstruiert. Außerdem konnten Versuche von Knotenpunktverbindungen und Seilüberschneidungen durchgeführt werden, wobei sich Resultate für die Realisation dieser Details in natürlicher Größe ergaben. Jedem der Modelle gingen Voruntersuchungen, Detaillierung von Modellausschnitten und gesamte Vormodelle voraus.

Die aufgeführten Modelle sind alles Prototypen der in den vorausgegangenen Abschnitten behandelten Strukturformen, von denen die beiden ersten Modelle M 1 und M 2 vollständige und von übergeordneten Systemen unabhängige Anordnungen, die weiteren Modelle M 3, M 4 und M 5 Ausschnitte aus diesen oder anderen Strukturen darstellen, was an der massiven, druckbeanspruchten Kräftebegrenzung erkennbar ist.

In allen Modellen jedenfalls ist die gegenseitige Abhängigkeit erkennbar von übergeordneten und untergeordneten Konstruktionselementen, und die in dem jeweiligen Zusammenhang unwesentlicher Unterteilungen und Differenzierungen sind abstrahiert. Die Anordnung der statischen Kräfte- und Spannungskonstellationen im Modell wird durch das Einsetzen der Vorspannung erleichtert, da diese allen auf das System angreifenden Kräften überlagert ist und daher diese angreifenden Kräfte beim Aufbau des Modelles überflüssig macht. Diese Tatsache vereinfacht auch die Kontrollmethode für die Stabilität von Tragsystemen dieser Art, denn der Beweis für die Stabilität wird erbracht durch den Nachweis des kontinuierlichen Vorhandenseins der Vorspannung bei Nichtbelastung und bei extremen möglichen Belastungen. Meßbar sind die Seilspannungen und die geometrischen Differenzen einer Konstruktionsanordnung bei verschiedener Belastung.

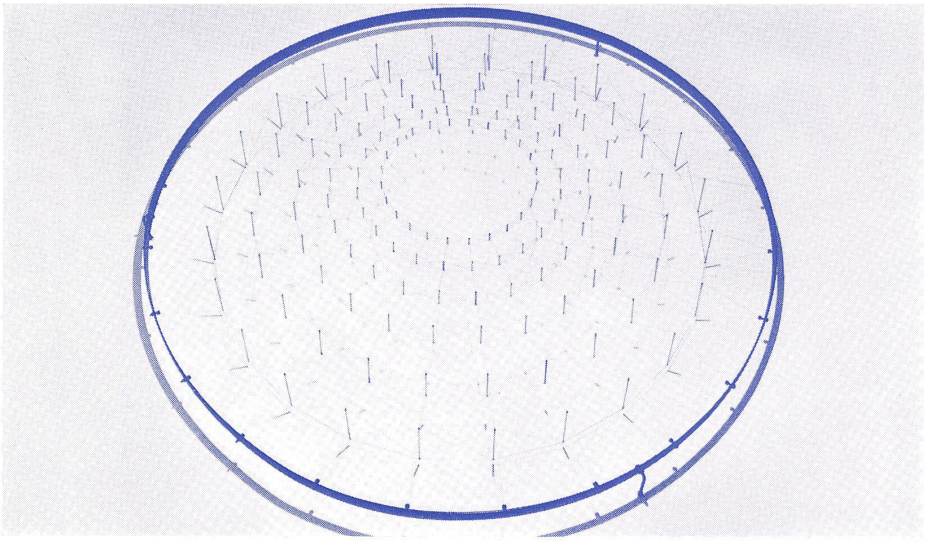
Modell M 1: Rotationssymmetrisches, radiales Schrägseilwerksystem mit Mittelmast (Masthaus)

Modell M 2: Rotationssymmetrisches, radiales Schrägseilwerksystem mit Mittelmast und Druckring. System eines statisch-konstruktiv unabhängigen und stabilen Gebildes, das zur Stabilisierung seiner Lage im Wasser schwimmen und durch Seile nach unten verspannt werden soll.

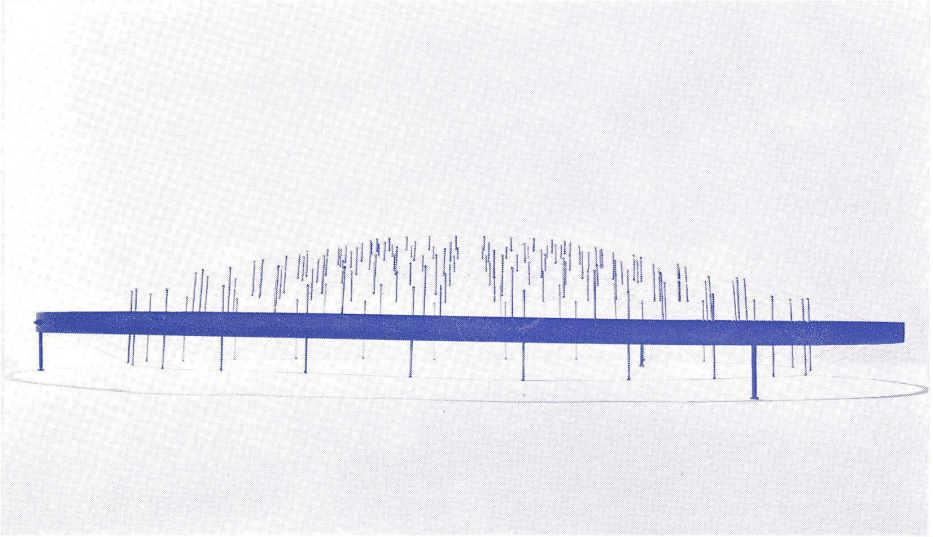
Modell M 3: Orthogonales Seil-Stabträgerrostsystem

Modell M 4: Rotationssymmetrisches Seil-Stabträgerrostsystem (Sehnenprinzip)

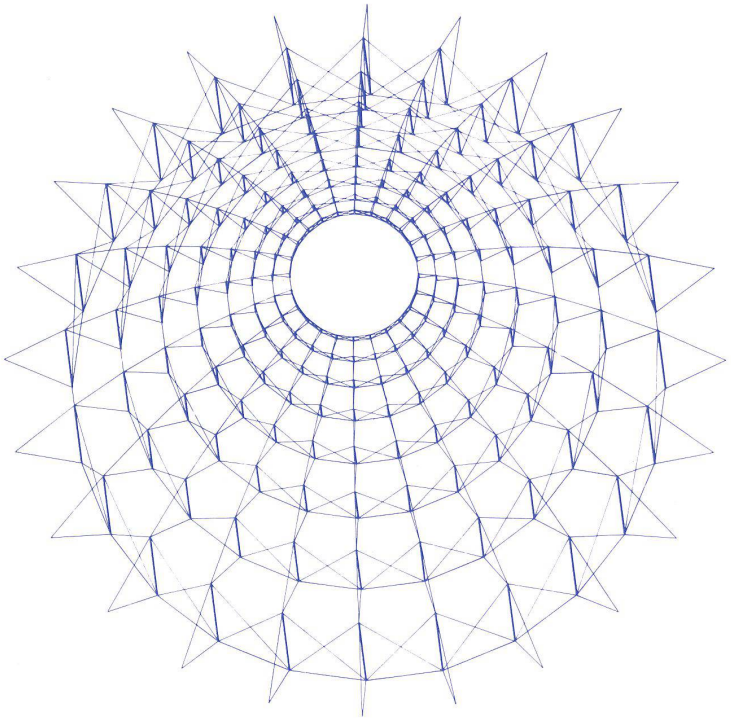
Modell M 5: Rotationssymmetrisches Kuppeltragwerk. Die peripheren Seil-Stabanordnungen mit untenliegendem Gurtseil sind als ringförmige Seil-Stabträger anzusehen, deren Aufhängung radial nach außen gespannt wird. Die gesamte Gurtbelastung wird durch das untenliegende Zugelement aufgenommen, während die Gegenverspannung und die Belastung durch die radialen Aufhängungen des nächsten ringförmigen Seil-Stabträgers radial nach innen gerichtet entsteht.



14



15



16

14–16
Modell M 5: rotationssymmetrische Kuppelstruktur.
Maquette M 5: Structure de rotation symétrique pour coupole.
Model M 5: radial (symmetrical rotation) cupola structure.