Ralf Dinort
Stefan Lemke

GM Football – Eingangspavillon des Headquarters von General Motors in Detroit

Herrn Dr.-Ing. *Herbert Klimke* zur Vollendung seines 65. Lebensjahres gewidmet

Der Artikel beschreibt Konstruktion, Herstellung und Montageplanung eines gläsernen Pavillons über einem elliptischen d. h. footballförmigen Grundriß von 30 m Länge und 10 m Breite. Die punktgehaltene Verglasung wird dabei in den 14 m hohen Fassaden von einem Seilnetz gestützt, welches in vertikaler Richtung vom Rand des räumlichen fischbauchförmigen Hauptträgers zum Boden spannt. In horizontaler Richtung verlaufen die Seile zwischen den seilumspannten Stützen des Hauptträgers. Von besonderer Bedeutung war bei der Planung dieses biaxial gekrümmten Seiltragwerkes die Detaillierung nicht nur im Hinblick auf Ästhetik, sondern insbesondere auf Montierbarkeit und Toleranzausgleich, sowie die Entwicklung eines schlüssigen Montagekonzeptes und der dazugehörigen Berechnungen.

GM Football – Vestibule of the General Motor's Headquaters, Detroit. *The article describes the construction, production and erection scheduling of a glazed vestibule over an elliptical, i. e. football-shaped outline of 30 m length and 10 m width. The point supported glazing of the 14 m high façade is supported by a spatial cable net structure, which stretches in vertical direction from the spatial fish-belly girder to the ground and in horizontal direction between the cable sagged columns at the tapered corners of the building. While workshop planning of this biaxial curved cable net structure, beside the aesthetic requirements, it was also necessary to consider the mountability and adjustablity, as well as the development of a conclusive assembly concept and the pertinent computations.*

1 Einleitung

Am Fuße der vier Hochhaustürme des Renaissance Centers von Detroit entsteht seit April 2004 ein weiterer Vertreter seilverspannter Stahlkonstruktionen mit punktgehaltener Glaseindeckung – der sog. „GM Football" (Bild 1).

Der konkreten Umsetzung dieses Bauwerks vorausgegangen war Mitte der 1990er Jahre die Entscheidung von General Motors (GM), den Verwaltungssitz des Global Headquarters wieder in die Innenstadt von Detroit zurückzuverlegen und damit einen eminent wichtigen Beitrag zur Revitalisierung der seit den 1960er Jahren „brachliegenden" Downtown zu leisten.

Ein bereits bestehender Hochhauskomplex, das heute sog. „Renaissance Center", wurde zu diesem Zweck von GM erworben und unter der Federführung des Generalplaners Hines und des weltberühmten Architekturbüros SOM (Skiddmore, Owings & Merrill) in Chicago im Rahmen eines auf 500 Mio. Dollar taxierten Sanierungsprogramms umgestaltet und bis dato teilweise umgebaut.

Der „GM Football" ist neben dem sog. „GM Circulation Ring", ein an Stahlzugstangen abgehängter, kreisförmiger Glassteg (Kreisdurchmesser ca. 50 m) im Innern des Renaissance Center, und dem sog. „GM Wintergarden", einer seilunterspannten, stählernern Gitterschale (4000 m² Fläche) – gefertigt im MERO-Plus System – mit einer linienförmig gelagerten Glaseindeckung, bereits das dritte Projekt, das MERO in Kooperation mit Turner Constructions Inc. – einem Tochterunternehmen von HOCHTIEF – für GM realisiert.

Der GM Football, der auf der Stadt zugewandten Seite des Renaissance Centers steht und zukünftig als dessen Eingangspavillon dienen wird, war ursprünglich mit einer komplett in Edelstahl gefertigten Tragkonstruktion entworfen worden, an der ein komplexes Edelstahlseilnetz verspannt werden welche die punkgehaltene Glas-

© SOM / Michael McCann

Bild 1. Visuallisierung „GM Football" – Copyright SOM
Fig. 1. Visualization „GM Football" – Copyright SOM

hülle halten sollte. Im Zuge der weiteren Entwurfsplanung wurde die Edelstahlvariante für die Tragkonstruktion jedoch von einer farbbeschichteten Stahlvariante, die weiterhin seilverspannt blieb abgelöst.

Auf Basis dieser Vorgaben von SOM wurden von MERO, in Kooperation mit dem Tragwerksplaner IF, die zentralen Konstruktionsdetails entwickelt und eine umfassende Werk- und Montageplanung erstellt. Die Beschaffung und Montage der Bauteile selbst wurden in quasi globaler Kooperation zwischen MERO International, Deutschland, und dem MERO-Tochterunternehmen MERO Structures in den USA abgewickelt. Das „Go" für die Abwicklung des GM Football fiel endgültig Anfang September 2003, mit einem projektierten Montage-Endtermin für Ende Juli 2004.

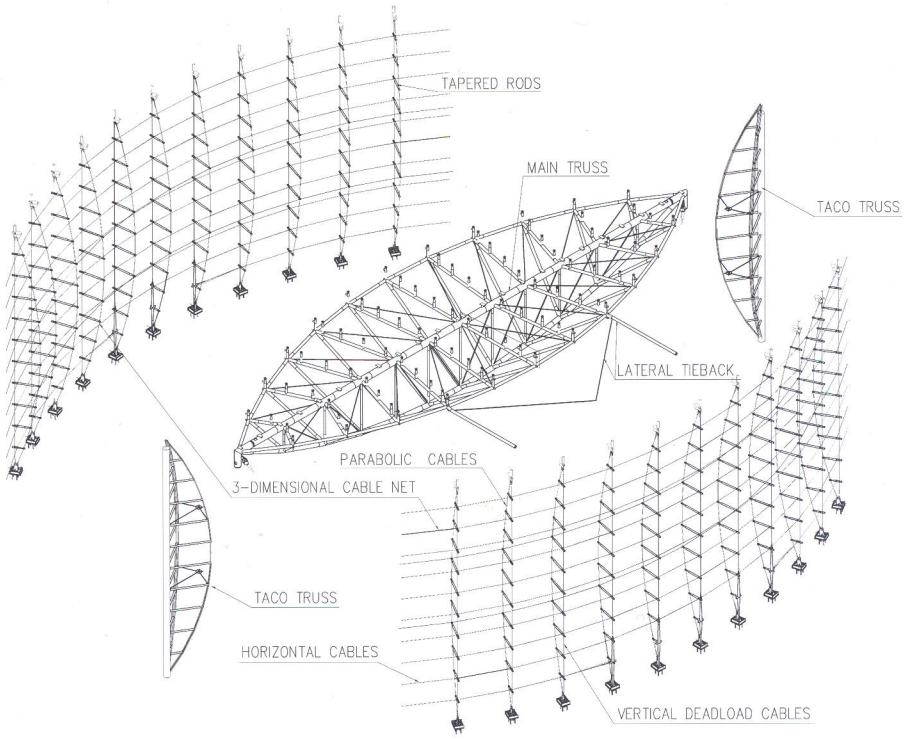

Bild 2. Hauptelemente des Football Tragwerks
Fig. 2. Main components of the „Football" – structure

2 Die Konstruktion

2.1 Die Tragkonstruktion

Die Konstruktion des Footballs wird durch die in (Bild 2) dargestellten Haupttragelemente bestimmt.

Da ist zunächst der dreidimensional geformte Fischbauch-Hauptträger, der im Projekt als „Main Truss" bezeichnet wird. Das Rückgrat in seiner senkrechten Mittelebene bildet ein ebener Fachwerkbinder. Sein Obergurt und parabelförmiger Untergurt werden durch Pfosten gespreizt. Die diagonalen Zugkräfte werden in Edelstahl-Zugstangen geführt. Die Flanken des Fischbauchs bilden in der Obergurtebene liegende Gurtrohre. Diese werden durch vom Mittelbinder auskragende Druck- und Zugstäbe in einer Parabelform gestützt. An diesen Außengurten schließen die vertikalen Seilbinder des Seilnetzes an. Die Seilkräfte leitet der „Main Truss" weiter in die in Fassadenrichtung mit je zwei Doppelseilen umspannten Hauptstützen, die zum einen den „Main Truss" tragen und zum anderen für die Horizontalseile die Endauflager bilden. Von den Architekten werden die Hauptstützen wegen ihrer dem mexikanischen Gericht ähnelnden Form auch „Taco Truss" genannt. Die „Taco Trusses" sind am Fundament in einer Kalotte (Bild 3) gelenkig aufgelagert und am „Main Truss" biegesteif mit einem im Rohrinneren liegenden vorgespannten Kopfplattenstoß angeschlossen. Weiter gibt es die vertikalen Seilbinder, bestehend aus einem äußeren geraden und einem inneren parabolisch gekrümmten Seil, die durch sich verjüngende Druckpfosten, den sog. „Tapered Rods", zu fischbauchförmigen Seilbindern gespreizt werden. Das ge-

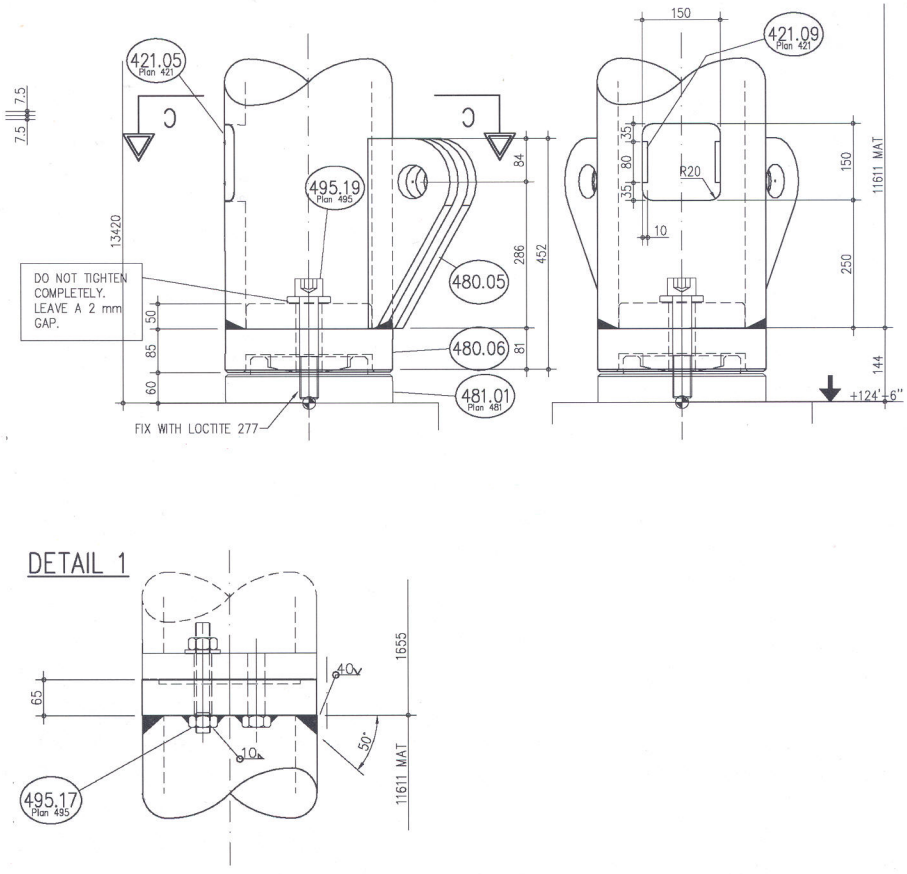

Bild 3. Kalottenlager und Kopfplattenstoß des Taco Trusses
Fig. 3. Calotte bearing and butt joint of „Taco Trusses"

rade Seil, welches parallel hinter der Glasebene liegt, dient in erster Linie als Eigengewichtsseil für das Glas der Fassade. Das Parabelseil nimmt die Winddruckkräfte auf die Fassade auf. Die horizontalen Seile werden an den „Tapered Rods" geklemmt und schließen mit ihren Enden an den Doppelseilen der „Taco Truss"-Umspannung an. Sie dienen zur Abtragung der Windsogkräfte auf die Fassade. Zur horizontalen Stabilisierung des Footballs ist der Main Truss mit einem horizontalen Verband den „Lateral Tiebacks" am Hauptgebäude, dem Renaissance Center Building, angeschlossen. Am äußeren Ende der „Tapered Rods" sind die „Spider" der punktgehaltenen Gläser verstellbar aufgeschraubt. Die „Spider" für die horizontale Dachverglasung sind auf die „Tapered Rods" geschraubt, die von den Sprossen des „Main Truss" senkrecht aufgehen.

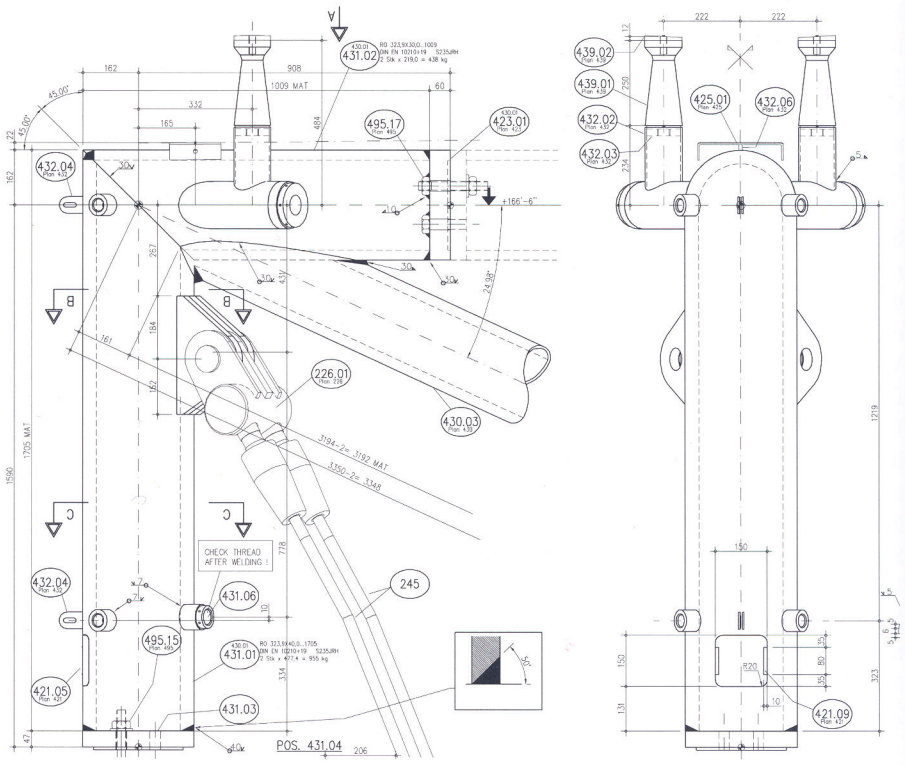

Bild 4. Eckdetail Taco Truss – Main Truss
Fig. 4. Corner detail, ‚Taco Truss' – ‚Main Truss'

2.2 Die Werkplanung Stahlbau

Es war der Anspruch der Architektur, daß es am gesamten Stahltragwerk keine sichtbaren Stöße, seien sie geschraubt oder geschweißt, zu sehen gäbe. Da der aus dickwandigen, dafür aber schlank erscheinenden Hohlprofilen zusammengesetzte „Main Truss" wegen der auf Fertigbau ausgelegten Gesamtlogistik nur geschraubte Verbindungen aufweist, lag bei der Konstruktion das Hauptaugenmerk auf deren Gestaltung in bezug auf Funktionalität und Design. Lediglich zwei im hoch zugbeanspruchten Untergurt liegende Montagestöße wurden aus statischen Gründen geschweißt ausgeführt (Bild 7). Die hier zu übertragende maximale Zugkraft beträgt $Z_d = 3000$ kN.

Die Stöße des „Main Truss"-Obergurtes wie auch dessen Anschluß an die „Taco Trusses" wurden mit einem vorgespannten Kopfplattenstoß ausgeführt (Bild 4). Dieser auf kleinstem Raum auszuführende und im Rohr liegende Stoß nutzt die Stellen mit minimalen Momenten, um das Anschlußbild möglichst klein zu halten. Das Vorspannen der Schrauben im Rohr wird mit sehr kleinen hydraulischen Schraubenspannzylindern ermöglicht, die durch Handlöcher im Gurtrohr eingesetzt werden können. Die Anschlüsse aller übrigen Fachwerk-Druckstäbe wurde in Tradition der bekannten MERO-Raumfachwerke mit zentralen Einschraubenverbindungen realisiert (Bild 5).

Für die reinen Zugstäbe im Tragwerk wurden Zuganker aus Edelstahl des Fabrikates Macalloy gewählt. Als Stahl für den „Main Truss" sowie die „Taco Trusses" kam Stahl S235JRG2 zum Einsatz. Lediglich die Endstücke der „Tapered Rods" in der Dachebene wurden in Edelstahl ausgeführt. Um die eigenwillige Kombination von Edelstahl und Schwarzstahl für die Ausführung zu definieren und um Mißverständnisse zwischen Architekt, Bauherr und MERO zu vermeiden, wurden alle Bauteile in speziellen Plänen mit ihren Materialeigenschaften und Beschichtungen dargestellt. Bild 6 zeigt einen entsprechenden Planausschnitt.

Die gesamte Konstruktion sollte später im Stahlbaubetrieb vormontiert werden. Um die geometrische Genauigkeit, die durch ein Aufmaß protokolliert werden sollte, auch beim endgültigen Aufbau zu erhalten, wurden die Schweißstöße mit Kontrollmarkierungen versehen (Bild 7). Die markierten Distanzen waren unter Beachtung des nicht unerheblichen Schweißnahtschrumpfes bei der Montage wieder einzustellen.

Erschwerend kam für die spätere Stahlbaufertigung hinzu, daß wegen der Forderung möglichst vieler gleicher Glaselemente und natürlich horizontal verlaufender Fugen die Konstruktion mit einer entsprechenden Überhöhung von 60 mm in der Mitte hergestellt werden mußte. Alle Einzelstablängen wurden für die überhöhte Geometrie umgerechnet und die Materiallängen entsprechend an-

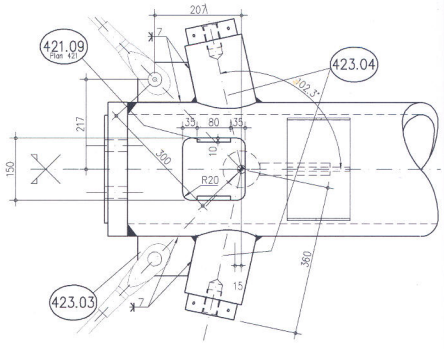

Bild 5. Typische MERO-Obergurtknoten mit Einschrauben – Zentralverbindung für Gefachstäbe, Montagestoß des Gurtes mit Handloch und Anschluß Verbandstäbe Draufsicht
Fig. 5. Plan view of a typical MERO detail: top flanges sleeves with core thread to take in the horizontal roof truss mullions. Access hole for butt joint assembling

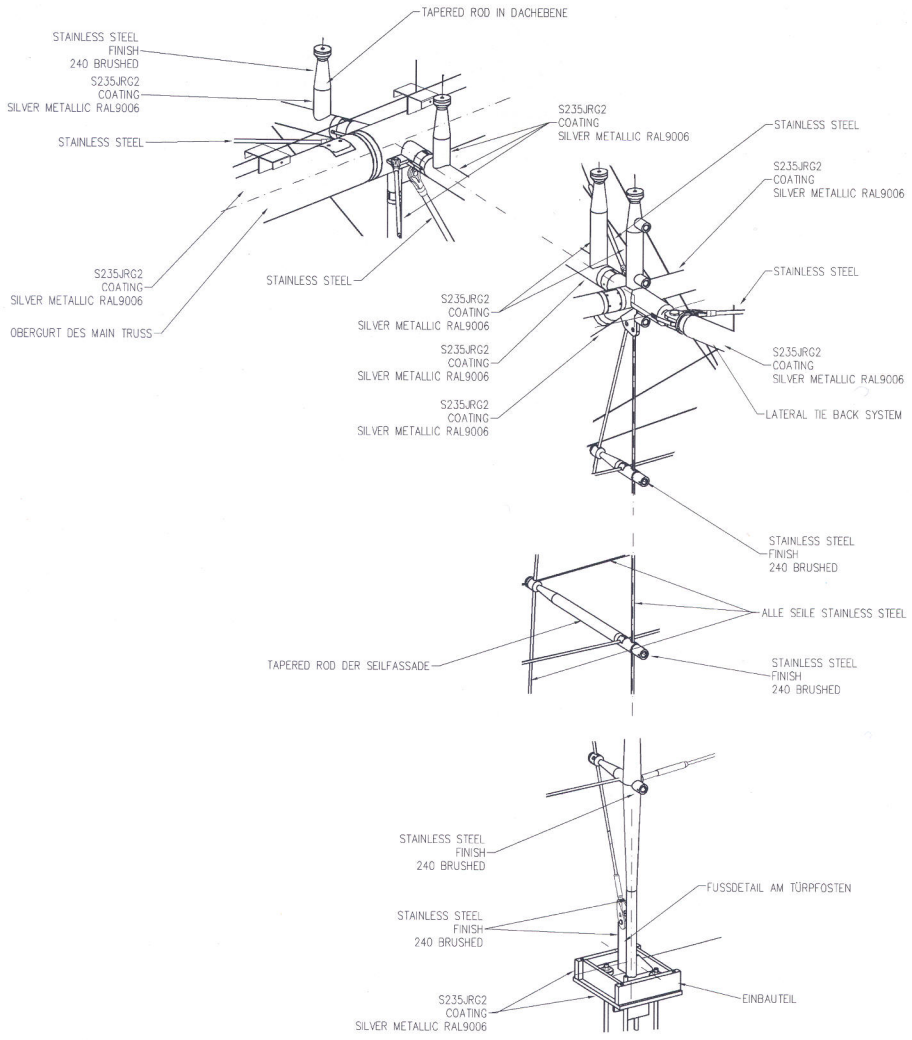

Bild 6. Materialien und Beschichtung
Fig. 6. Materials and coatings

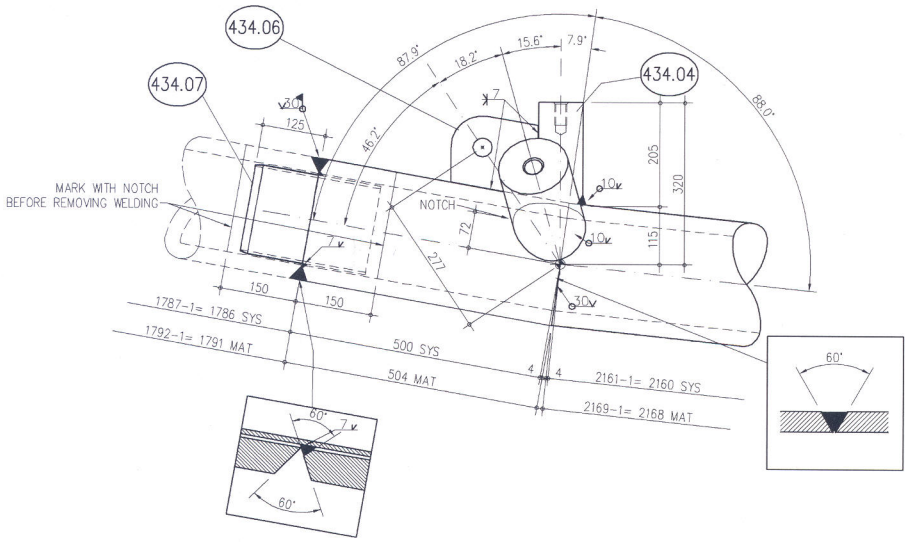

Bild 7. Untergurtknoten mit Montageschweißstoß für $Z_d = 3000$ kN und Kontrollmarkierungen (notches)
Fig. 7. Site welded joint at lower flange for adjustment.

gepasst. Obwohl der Unterschied der Einzellängen lediglich im 1 bis 2-mm-Bereich lag, war dies die einzige Möglichkeit, die homogene Überhöhung ohne Zwängungskräfte zu erreichen.

2.3 Das Seilnetz – eine spannende Sache …

Wie jedes ausschließlich auf Zug beanspruchte Flächentragwerk lebt auch das hier vorliegende Seilnetz von seiner Vorspannung. Zudem besitzt es im Gegensatz z. B. zu einem ebenen Tennisschläger eine biaxial gegensinnige Verkrümmung. Diese bewirkt, daß das Seilnetz auch ohne utopisch hohe Vorspannkräfte und mit relativ kleinen Verformungen in der Lage ist, jede Belastung über ihre zugehörige Krümmungsrichtung abzutragen, vorausgesetzt, daß die Krümmungen wie im Beispiel Football eine vernünftige Größenordnung besitzen (Bild 8).

Beim Football werden die Vertikalseile mit 50 kN und die Horizontalseile mit etwa 20 kN vorgespannt. Die Edelstahlseile des Seilnetzes sind ausschließlich offene Spiralseile nach DIN 3054. Sie haben einen Durchmesser von ∅ 16 mm und besitzen eine Steifigkeit $E \cdot A$ von 19600 kN. Das bedeutet, daß sich ein 14 m langes Vertikalseil bei 50 kN Vorspannung um $dL=(F \cdot L)/(E \cdot A) = 50 \cdot 14000/19600 = 36$ mm dehnt. Anders gesagt, muß das Seil um näherungsweise diesen Betrag verkürzt hergestellt (konfektioniert) werden, um im eingebauten (gedehnten) Zustand die gewünschte Vorspannkraft zu besitzen. Was die Herstelltoleranzen von Stahl, Fundamenten und Seilen betrifft, bedeutet dies aber gleichzeitig, daß hier ein sehr hohes Maß an Genauigkeit gefordert ist. Eine Distanztoleranz der Anschlagpunkte des Seiles von 10 mm bedeutet beispielsweise schon eine Vorspannungsänderung von 28 % im betroffenen Seil, was aber sofort auch Auswirkungen über das Gesamttragverhalten des Netzes auf die Kräfte in den anderen Seilen hat.

Um den unvermeidlichen Bautoleranzen begegnen zu können und trotzdem dem Wunsch des Architekten zu entsprechen, nämlich ohne auffällige Spannschloßelemente auszukommen, wurden als Seilenden Gabelfittinge des Typs HYEND der Fa. Brugg-Drahtseil AG verwendet. Diese lassen im Kopf einen Toleranzausgleich von ±14 mm bei einem Seildurchmesser von ∅ 16 mm zu. Da an jedem Seilende diese Ausgleichsmöglichkeit besteht, können insgesamt ±28 mm Toleranz über eine Höhe von ca. 14 m aufgenommen werden. Wenn man dagegen die zulässigen Toleranzen nach DIN18202, die Konfektionstoleranzen von ±5 mm, Temperaturunterschiede der Bauteile während

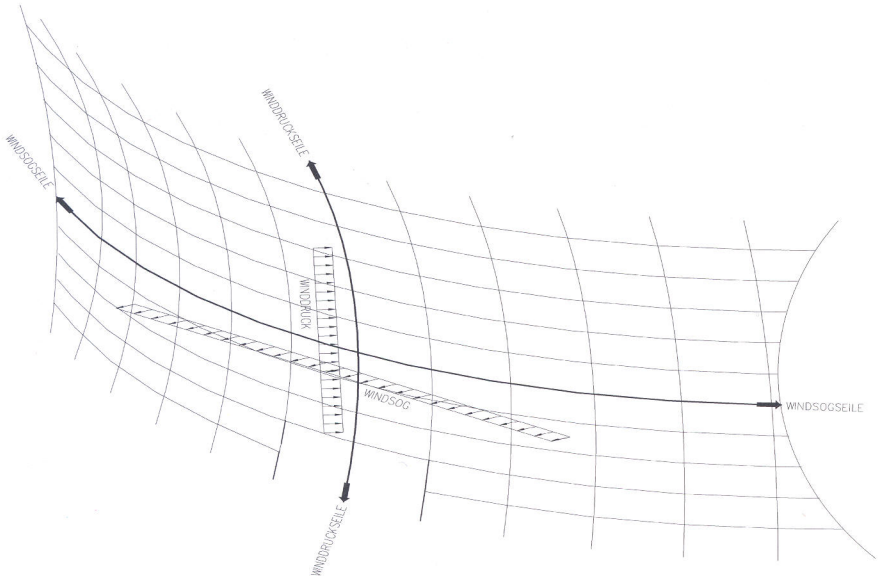

Bild 8. Lastabtragung im biaxial, gegensinnig verkrümmten Seilnetz
Fig. 8. Principe of load distribution at biaxial inverted cable net structure

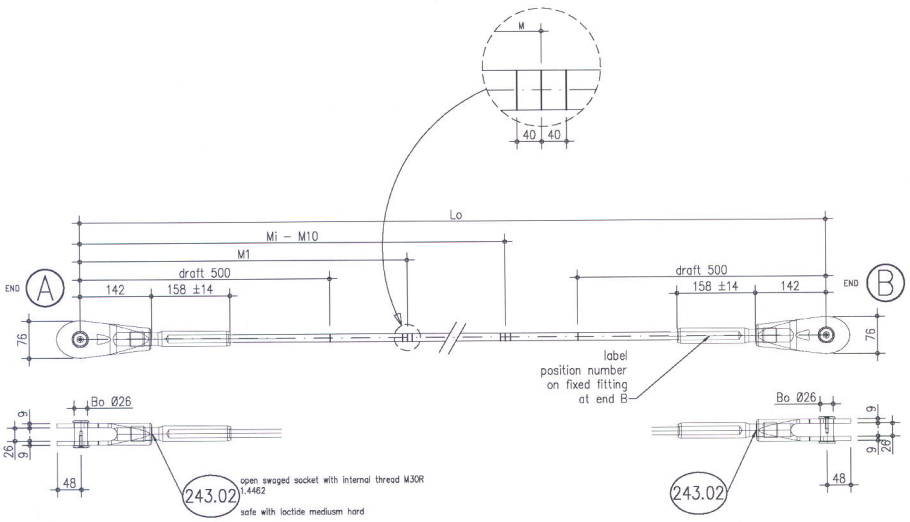

Bild 9. Typischer Seilplan mit allen für die Machart wichtigen Angaben
Fig. 9. Typical workshop drawing for a cable.

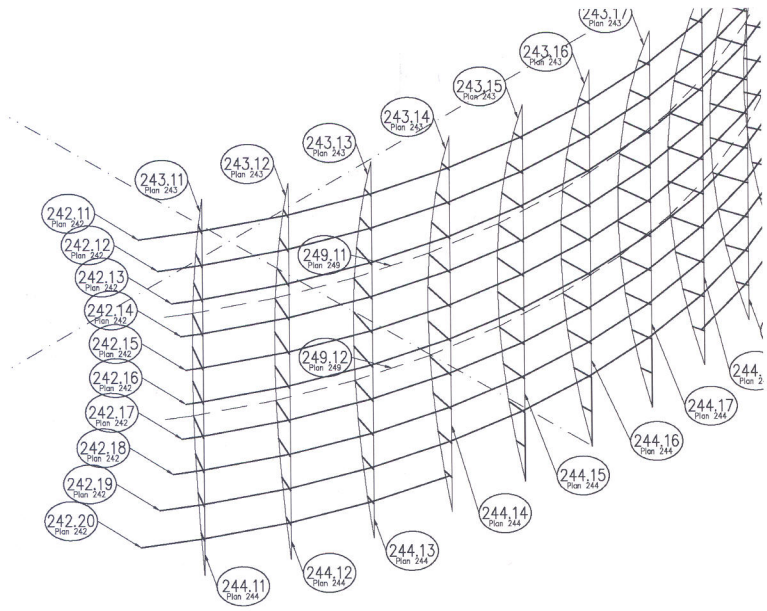

Bild 10. Ausschnitt Übersichtsplan der Seile des Footballs
Fig. 10. Position drawing for the cable net structure.

der Fertigung und die Toleranzen im Fundamentbau betrachtet, erscheint dies als gerade ausreichend.

Bild 9 zeigt die Machart eines Parabelseiles der vertikalen Seilbinder.

Für das Knüpfen des Seilnetzes muß die exakte Lage der Klemmen auf dem Seil bereits bei der Konfektion des Seiles markiert werden. Die Markierungslängen Mi werden ebenfalls unter Berücksichtigung der Überhöhungsgeometrie berechnet und in einem Markierungsblatt der Konfektion zur Verfügung gestellt. Dabei beziehen sich die Maße auf die Kraft, unter welcher das Seil abgelängt wird. Diese Kraft liegt nahe der Gebrauchslast des Seiles, also der Vorspannkraft unter Berücksichtigung aller ständigen Lasten. Bei Verwendung der HYEND-Gabelköpfe dient zur Einstellung der Sollänge des Seiles der sog. Meterriß (engl. Draft), welcher ebenfalls während des maschinellen Markiervorganges auf das Seil aufgetragen wird. Die Strecke zwischen den beiden Meterrissen kann sehr präzise (±2 mm) eingestellt werden, die Strecke zwischen Meterriß und Seilende ist wegen des Verpreßvorganges nur auf ca. 2 bis 3 mm genau. Deshalb wird der verstellbare Fitting auf das Ergänzungsmaß zwischen Bolzenachse und Meterriß eingestellt.

Da bei dieser und im übrigen bei fast allen Seilkonstruktionen jedes Seil selbst bei gleicher Länge im Gebrauchszustand eine andere Vorspannkraft und somit unterschiedliche Herstellgeometrie besitzt, bekommt grundsätzlich jedes Seil eine eigene Positionsnummer. Bild 10 zeigt einen Ausschnitt aus dem Einbauplan der Seile beim Projekt Football.

2.4 Die Fassadenkonstruktion

Die Konstruktion der gläsernen Gebäudehülle (Bild 11) des GM Football läßt sich grob in zwei Bauteile untergliedern:

a) die als invertierter Sattel, unter ca. 3° geneigte Verglasung im Dachbereich, bestehend aus betretbaren, 24 mm dicken, trapezförmigen Verbundsicherheitsglasscheiben (VSG) mit einer Einzelfläche von max. 3,5 m^2, die punktförmig gehalten auf dem Dachtragwerk aufliegen.

b) die polygonal angeordneten Verglasungen der vertikalen Fassade im