

1.	Entwurf	3
1.1.	Probleme in der Projektierung	3
1.2.	Baudurchführung und Dimensionierung	4
1.3.	Berechnungs- und Analyseverfahren	5
2.	Tragwerksvorstellung für das Olympiastadion in München	6
2.1.	Allgemeine Grundlagen der Seiltragwerke	6
2.2.	Analyse der vorhandenen Konstruktion des Olympiastadions in München	8
3.	Dachhaut	14
3.1.	Materialfindung, -auswahl und -beschreibung	14
3.2.	Aktuelle Maßnahmen	15
4.	Literaturverzeichnis	16

Datum:

20.01.2004

Unser Zeichen:

StBr

Datei:

olympiastadion_muenchen-
web.doc

Projekt:

Olympiastadion München

Betreff:

Dachtragwerk

Glasfassaden und ihre Tragkonstruktionen

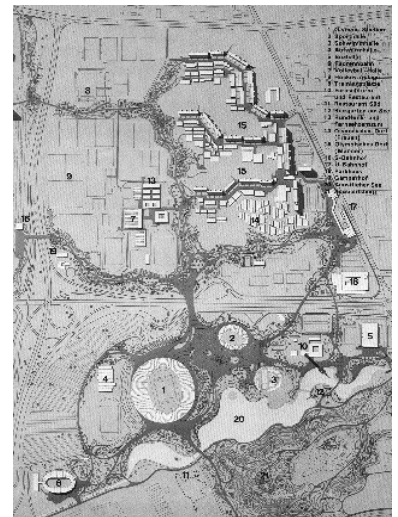
Das Olympiastadion München

1. Entwurf

Für die XX. Olympischen Sommerspiele 1972 sollte im Münchener Norden, auf dem Oberwiesenfeld, der Olympiapark entstehen.

Im Oktober 1967 ging der Entwurf von Behnisch und Partner als Wettbewerbssieger hervor. Es sollte eine Olympiade im Grünen, Olympiade der kurzen Wege, Olympiade der Musen und des Sports, ungezwungen, jugendlich, heiter sein.

Im Norden von München (Oberwiesenfeld) wurde zur Verwirklichung dieser Vorstellung ein ca. 140 Hektar großes Areal zur Verfügung gestellt. Dieser ehemalige Exerzier- und Sportflugplatz bestand aus Schuttberg, Fernsehturm, Eissporthalle und Nymphenburger Kanal. Eine geplante 6-spurige Hauptverkehrsstraße, die das Gebiet durchschneidet, sollte für die nötige Anbindung sorgen. Von den vorhandenen Gegebenheiten wurde vor allem die ausdrucksstarke Erhebung des Schuttberges aufgenommen und weitergeführt. Der Nymphenburger Kanal wurde zu einem See aufgestaut. Fußwege wurden von Kraftfahrzeugstraßen getrennt. Die hügelig geformte Landschaft ermöglicht interessante und abwechslungsreiche Ein- und Ausblicke. Durch das Einbetten der Stadien in die Geländeform verloren die Bauten ihre großen Dimensionen. Nach den Olympischen Spielen sollte das Areal weiterhin als Sport- und Veranstaltungsgelände, aber auch als Erholungspark dienen.



1.1. Probleme in der Projektierung

Das Dach wurde in allen Phasen, Entscheidung, Planung, Bau, Betrieb und Finanzierung, zum problematischsten und umstrittensten Bauwerk des gesamten Olympiabaus.

Unmittelbar nach der Entscheidung der Jury im Oktober 1967 begann in der Öffentlichkeit eine teilweise leidenschaftlich geführte Diskussion um die Art der Überdachung, ihre Ausführbarkeit und vor allem über die Kosten.

Die Preisträger des Wettbewerbes wurden gebeten, Alternativvorschläge für das Zeltdach zu entwerfen, was den Protest von Behnisch und Partner als auch von namhaften Ingenieuren und der Presse hervorrief. Vier Alternativen wurden trotzdem von der Wettbewerbslösung weiterentwickelt:

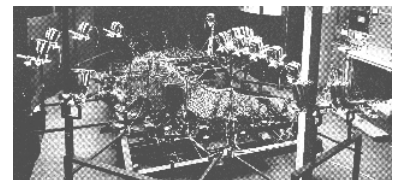
- an Pylonen abgehängte Dachfläche als Hängedach
- Radialstruktur als kontinuierliches Dach
- Raumfachwerk als kontinuierliches Dach
- Einzeldächer (schwere Hängedächer)

Man entschied sich für das an Pylonen abgehängte Dach, mit kleineren Dachflächen und kleineren Stützweiten, da es als einziger Vorschlag sowohl dem architektonischem Konzept als auch der konstruktiven Durchführbarkeit entsprach.

Die Vollversammlung der Landeshauptstadt München und die Olympiakommission kamen im August 1969 zu der einstimmigen Meinung, dass man die Mehrkosten für das Zeltdach, wenn auch schweren Herzens, in Kauf nehmen sollte, da mit dieser Dachform eine Qualitätssteigerung des Ganzen erreicht werde.

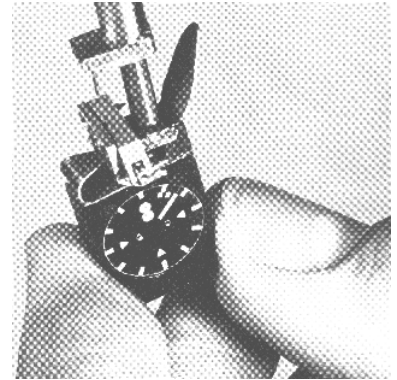
1.2. Baudurchführung und Dimensionierung

Durch die langwierige Entscheidungsfindung zugunsten des vorgeschlagenen Daches waren die Sportstätten bereits im Bau. Der ursprünglich aufgestellte Netzplan musste deshalb mehrfach umgestellt werden. Die Schwierigkeiten beim Bau der Modelle, bei ihrer photogrammetrischen und zeichnerischen Auswertung und bei der Entwicklung der elektronischen Berechnungsmethode führten zu wesentlichen Überschreitungen von Einzelterminen, die sich bis in die Werkplanung der Firmen auswirkte. Viele vorgesehene Leistungen mussten jetzt parallel laufen, dies war natürlich mit erschwerten Arbeitsbedingungen, längeren Montagefristen und letztlich auch höheren Kosten verbunden. Um Genehmigungen zu erhalten, waren umfangreiche und langwierige Verhandlungen mit den Zulassungsbehörden und damit verbundene Untersuchungen an den verschiedenen Instituten und Materialprüfstellen erforderlich.

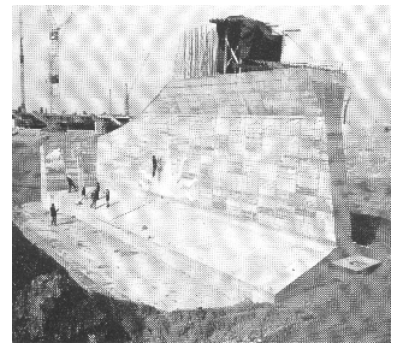


1.3. Berechnungs- und Analyseverfahren

Für den Vorentwurf sind einfache Formmodelle aus Tüll zweckmäßig. Auf deren Grundlage wurden dann im Institut für leichte Flächentragwerke in Stuttgart die Mess- und Zuschnittmodelle im Maßstab 1:125 gebaut. Sie mussten dem endgültigen Bauwerk in jedem Detail geometrisch und elastisch exakt ähnlich sein, da die Abmessungen jedes einzelnen Bauteils für die Hauptausführung aus dem Modell übernommen werden sollten. Wegen des Zusammenhangs zwischen den Vorspannkräften in jedem einzelnen Bauteil, der Geometrie und dem Tragverhalten einer vorgespannten Seilnetzkonstruktion ist es entscheidend, dass der geforderte Vorspannzustand mit großer Genauigkeit im Bau realisiert wird. Die exakte Vorgabe der Abmessungen jedes einzelnen Bauteils und ihre ebenso genaue Realisierung bei der Fertigung sind bestimmend für die Standsicherheit und, wegen der sonst notwendigen unabsehbaren Korrekturen am Bau, für die Bauzeiten.



Beispielsweise dehnt sich ein 50 m langes Seil unter einer gebräuchlichen Vorspannung um 10 cm. Ist es um 1 Promille, das sind hier 5 cm zu lang oder zu kurz, sind seine Spannungen und damit die Umlenkkräfte auf die stützenden Seile der Querrichtung um 50% falsch. Diese Abweichung würde beim Olympiastadion schon erreicht werden, wenn der Abstand zwischen allen Seilnetzknöten um 0,75mm differieren würde. Es müssen deshalb hier Genauigkeitsansprüche an den Zuschnitt und an die Fertigung gestellt werden, wie sie von keiner anderen Bauweise her bekannt sind. Daraus wird verständlich, dass manuell hergestellte Zuschnittmodelle im Maßstab 1:125, wie sie zunächst für das Olympiastadion gebaut wurden, zu ungenau sind. Für die Längenermittlung wurde deshalb eine neue Methode gesucht.



Ein rein mathematischer Weg wurde nach über einjähriger Entwicklungsarbeit am Institut für Raumfahrtkonstruktionen an der Universität Stuttgart gefunden und auf das Dach über der Sporthalle und Stadion angewandt. Für die Schwimmhalle, bei der die Netze großflächiger sind, und die deshalb auf Fehler weniger empfindlich reagiert, wurde der Zuschnitt vom Modell abgenommen und geometrisch optimiert. Diese Arbeit wurde erschwert, da die Fundamente aus Termingründen größtenteils schon gebaut werden mussten, bevor die Zuschnittsberechnungen fertig waren.

2. Tragwerksvorstellung für das Olympiastadion in München

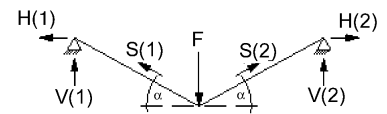
2.1. Allgemeine Grundlagen der Seiltragwerke

Dachtragwerke aus Seilen vermitteln den Eindruck von Leichtigkeit, sie wirken wie eine schwebende Fläche. Diese Leichtigkeit ist auf die überwiegende Anwendung von Zugstäben zurückzuführen, da diese nicht knicken und daher bedeutend dünner ausgebildet werden können. Die ideale Form eines Zugstabes ist ein Seil. Es kann durch seine biegsame Form keine Momente aufnehmen und passt sich elastisch den angreifenden Kräften an. Allgemein führen Spannungen aus Längskräften im Gegensatz zu Spannungen aus Biegemomenten zu einer wirtschaftlicheren Materialausnutzung, da nicht nur die Spannungen im Randbereich der Querschnitte sondern über die gesamte Querschnittsfläche voll ausgenutzt werden.

Die Krümmung ist eine der markantesten Eigenschaften von Seiltragwerken in unserer Umgebung. Sie ist auf die Art und Weise des Lastabtrages zurückzuführen. Eine Last, die senkrecht auf ein Seil aufgebracht wird, wird an dem Knotenpunkt in zwei Normalenkräfte aufgeteilt. Dafür ist es notwendig, dass sich das Seil an dem Knotenpunkt „knickt“. Die Größe der resultierenden Zugkräfte ist direkt von dem „Knickwinkel“ abhängig. Je größer die Durchbiegung des Seiles ist, um so größer wird der Winkel zwischen den wirkenden Kräften und um so kleiner werden die resultierenden Kräfte im Seil. Es ist also unbedingt notwendig, dass das Seil gekrümmt ist, da sonst die Kräfte im Seil unendlich groß werden würden und das Seil reißt. Dieses Schema ist grundlegend für alle weiteren Betrachtungen der Einzelseile wie auch der Seilnetze.

Man unterscheidet Seiltragwerke in drei verschiedene Gruppen. Die Gruppe der ebenen Seiltragwerke, wie z.B. eine Tennisschlägerbespannung oder ein Spinnennetz, ist für Dachkonstruktionen nur bedingt einsetzbar, da für die Stabilität sehr große Kräfte notwendig sind und das Tragwerk auch dann noch sehr weich bleibt. Ein Beispiel für eine solche Konstruktion ist die Glasfassade der Eingangshalle des Flughafenhotels „Kempinski“ in München.

Die zweite Gruppe ist die Gruppe der nicht vorgespannten Seilnetze. Diese frei hängenden Netze sind mit dem Model einer Hängematte gut zu beschreiben. Dreht man eine solche Konstruktion um, so findet sie die ursprüngliche Form wieder.



$$\sin \alpha = \frac{F}{2 \cdot S(1)} = \frac{F}{2 \cdot S(2)}$$

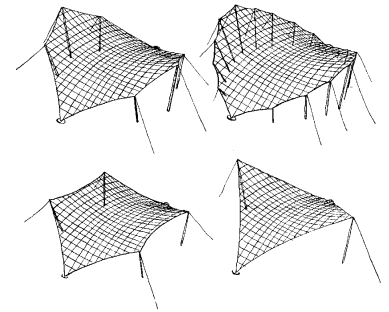
$$S(1) = S(2) = \frac{F}{2 \cdot \sin \alpha}$$

$$V(1) = V(2) = \frac{F}{2}$$

$$H(1) = H(2) = \frac{F}{2 \cdot \tan \alpha} = \frac{S(1)}{\cos \alpha}$$

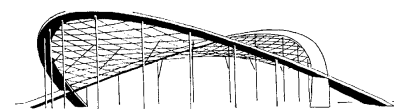
Die Seilkräfte S(1) und S(2) sind im Winkelbereich $0^\circ < \alpha < 90^\circ$ umgekehrt proportional zu $\sin \alpha$. Auch die horizontalen Auflagerkräfte sind vom Winkel α abhängig.

Nicht vorgespannte Seilnetze sind in ihrer statischen Funktion von der Schwerkraft abhängig. Sie werden als gleichsinnig gekrümmte Konstruktionen bezeichnet, können sich unter Wind auswölben und müssen daher ausreichend ausgesteift werden. Dies ist zum einen durch ein Aufbringen einer zusätzlichen Auflast möglich, wodurch alle von außen angreifenden Kräfte verhältnismäßig klein werden und keine maßgebliche Formveränderung mehr zu Folge haben. Eine zweite Variante ist die Aussteifung mit einer festen Schale, z.B. aus Leichtbeton. In beiden Fällen geht die optische Leichtigkeit eines Seilnetzes fast immer verloren.



Die dritte und wohl am häufigsten verwendete Form des Seilnetzes ist das vorgespannte Seilnetz. Es ist in seiner Form als gegensinnig gespannte Konstruktion relativ unabhängig vom Eigengewicht und ist daher sehr gut für die Konstruktion von Dächern geeignet. Bei einem vorgespannten Seilnetz kann man, anders als in den vorgenannten Konstruktionen, die Seile in Tragseile und Spannseile unterscheiden. Dabei sind die Tragseile der Dachkonstruktion nach unten durchhängend angeordnet und tragen im herkömmlichen Sinne die Lasten ab. Die Spannseile dagegen wölben sich nach oben und wirken mit ihrer Spannung als zusätzliche Auflast auf die Tragseile. Dieses gegeneinander gespannte System ist auch in der Umkehrung formstabil und kann daher auch durch Windkräfte oder ungleichmäßig angreifende Lasten kaum aus der Form gebracht werden.

Die Gruppe der vorgespannten Seilnetze kann in geschlossene und offene Konstruktionen unterschieden werden. Maßgebend sind hier die Randbedingungen. Bei einer geschlossenen Konstruktion werden alle Seile an einem festen, in einer geschlossenen Linie gebauten „Rahmen“ befestigt. Dabei dürfen sich nie alle Befestigungspunkte in einer Ebene befinden. Eine einfache Konstruktion ist hier nochmals abgebildet. (vgl. Otto, Frei; Berlin; 1954, 42) Ein häufig genanntes Beispiel für eine geschlossene vorgespannte Seilnetzkonstruktion ist die Raleigh-Arena in New York (vgl. Otto, Frei; Berlin; 1954, 44+88ff). Dabei mussten hier aber noch aussteifende Seile angebracht werden, da die Krümmung der Seile in den Randbereichen nicht ausreichend war. Es ist also keine rein vorgespannte Seilnetzkonstruktion. Für die offenen vorgespannten Seilnetze gibt es unzählige Beispiele. Das einfachste Tragwerk dieser Art ist ein zwischen 4 Punkten gespanntes Netz. (3 Punkte reichen nicht aus, da diese immer eine Ebene definieren und so keine Krümmung realisiert werden kann.) In der oberen Abbildung (vgl. OTTO, FREI; Berlin; 1954, 49 oben) erkennt man die markante Form, die trotz ihrer unendlich vielen Variationsformen immer wieder zu finden ist und als Sattelform bezeichnet wird. Die Anzahl der fixierten Eckpunkte ist dabei nach den äußeren Gegebenheiten nahezu frei wählbar. Bei einem solchen Netz werden die einzelnen Seile nicht durch eine massive Konstruktion sondern durch Randseile getragen, welche in Knotenpunkten zusammenlaufen und dort die



Lasten abtragen. Diese Knotenpunkte können fest sein (Fundamente, Stützen, ...) oder durch Fangseile gehalten werden.

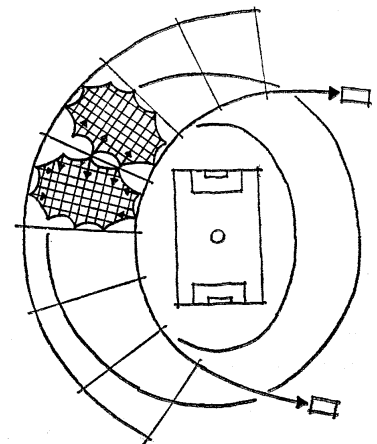
Bei der Entwicklung eines vorgespannten Seilnetztragwerkes gibt es bisher noch kein Schema, nach dem die optimale Form erreicht werden kann. Da Seile keine Biegespannungen aufnehmen können und sich daher in ihrer Form elastisch dem wirkenden Kraftverlauf anpassen, ist die Ermittlung der wirkenden Kräfte in den einzelnen Seilen direkt von der Form abhängig. Auch die von außen angreifenden Lasten wie Wind sind häufig nicht mathematisch zu erfassen. Eines der wichtigsten Entwurfsmittel ist daher das maßstäbliche Modell. Es wird verwendet, um die erste Form zu entwickeln. Dabei finden häufig Modelle aus Tüll oder Nylon Anwendung. Bei Betrachtungen im Windkanal und zu Ermittlung von Seilkräften werden meist Drahtmodelle herangezogen, wie es auch bei der Entwicklung des Olympiastadions in München der Fall war. Ein sehr wichtiges Mittel sind Modelle auch bei der Zuschnittsermittlung der zu fertigenden Einzelteile.

2.2. Analyse der vorhandenen Konstruktion des Olympiastadions in München

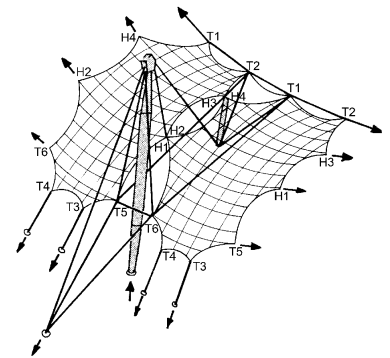
Auch das Dach des Olympiastadions in München ist eine vorgespannte Seilnetzkonstruktion. Es besteht aus 9 einzelnen Netzen, die teilkreisförmig zu einer Gesamtfläche von 34550 m² aneinandergereiht sind. Sie werden von 8 Stützen gehalten, welche außerhalb des Stadions aufgestellt und verankert sind. Über dem Stadion übernimmt ein großer Zugring den Lastabtrag und die Abspannung.

2.2.1. Das Seilnetz

Das gesamte Stadionsdach besteht aus 9 aneinandergereihten Einzelnetzen. Diese können als offene Seilnetze bezeichnet werden, da die Ränder durch Randseile und nicht durch feste Konstruktionen realisiert wurden. Die Netze bestehen aus zwei zueinander senkrecht verlaufenden Seilscharen. Die Abstände der Kreuzungspunkte (Seilknoten) zueinander betragen jeweils 75 cm. Dabei gehören zu jeder Seillinie zwei 19-drätige Litzen, welche in unterschiedlichen Richtungen verdrillt wurden, um Torsionen im Tragwerk zu verhindern. Um die Maßgenauigkeit einzuhalten und die Fertigung auf der Baustelle so gering wie möglich zu halten, wurden die zwei Litzen schon im Werk in regelmäßigen Abständen durch ein Passstück aus Aluminium zusammen gepresst. So konnten die Knotenpunkte auf der Baustelle durch die Verbindung mit nur einer Schraube drehbar realisiert werden. Auf diese Weise erreichte man, dass in keinem Knoten unerwünschte Querverschiebungen von Kräften auftreten konnten und sich das Seilnetz jeder gewünschten Form anpasste. In der realen Ausführung sind also keine

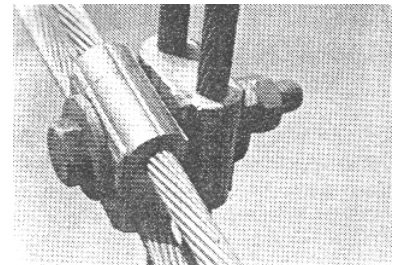


reinen Quadrate, sondern meist Parallelogramme mit konstanter Seitenlänge zu finden. Dieses konstante Raster wird an den Rändern durch gekrümmte Randseile gehalten. Für die Anbindung des Netzes an diese Randseile wurden ebenfalls Passstücke entwickelt. Man achtete dabei darauf, dass jedes Seil seinen eigenen Anschlusspunkt bekam, um so den Kräfteverlauf klarer fassen zu können. In den sich daraus ergebenden unvollständigen Randfeldern des Netzes wurden Spannschlösser eingebaut, um Längendifferenzen aus Maßungenaugigkeiten ausgleichen zu können.



Diese gesamte Beschreibung erklärt aber nicht die Tragfunktion eines solchen Seilnetzes. Die zwei sich kreuzenden Seilscharen bilden ein vorgespanntes Netztragwerk. Dabei hängt die eine Schar der Seile, die der Tragseile, nach unten durch, die andere wölbt sich nach oben. Dieser Zustand ermöglicht ein Gegeneinanderspannen der beiden Seilscharen. Die resultierende Form ist die schon beschriebene Sattelform, deren genaue Ausbildung sehr stark von der Lage der Eckpunkte und von der gewählten Vorspannung abhängig ist. Die Vorspannungen betragen oft bis zur Hälfte der zulässigen Spannungen des entsprechenden Seilquerschnittes. In einem solchen Netz ist es dem einzelnen Knotenpunkt nahezu nicht möglich, sich räumlich zu verschieben. Dadurch wird auch die Stabilität gegen ungleichmäßig verteilte Lasten und gegen Wind erreicht.

Für das Dach wurden über 400 km Seile benötigt. Sie sollten für die Montage möglichst flexibel sein, mussten aber vor Korrosionen geschützt werden. Man entschied sich deshalb, jeweils 19 stark verzinkte Drähte mit Durchmessern von 2,3 bis 3,4 mm zu einer Litze zusammenzufügen. Ein solches Seil hat eine zulässige Tragkraft von etwa 150 kN/m. In besonders verstärkten Bereichen erreicht man zulässige Tragfähigkeiten von bis zu 300 kN/m. Dabei wurde eine doppelte Bruchsicherheit mit berücksichtigt. Außerdem wurde beschlossen, die Dachhaut über das Seilnetz zu platzieren, um so einen zusätzlichen Korrosionsschutz zu erreichen.



2.2.2. Die Randseile

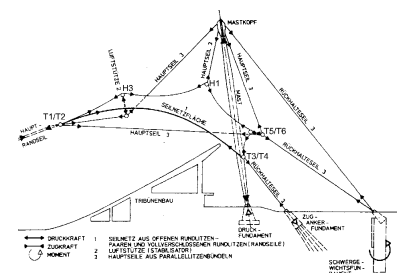
Die einzelnen Seilnetzflächen werden von Randseilen begrenzt, welche die Zugkräfte aus dem Netz in die Knotenpunkte der radialen Lastabtragsebenen weiterleiten. Anders als in der ursprünglichen Planung wurden mehrere kleine Seilnetze aneinandergereiht, anstatt ein großes Netz zu installieren. So konnten die Netze mit ausreichender Krümmung umgesetzt werden und mussten nicht bis in die 80 m hohen Mastspitzen gebaut werden. Die Randseile bilden für jedes einzelne Seilnetz einen geschlossenen Linienzug, der 10 Knotenpunkte miteinander verbindet. An diesen Punkten werden die Kräfte aus der Seilnetzkonstruktion in die weiteren Elemente abgeleitet. Zwischen zwei Knotenpunkten müssen auch die Randseile aus schon beschriebenen Gründen gekrümmt sein. Mit der deutlichen Trennung zwischen Randseilen und Hauptseilen erreichte man eine sehr klare Form und konnte die auftretenden Kräfte gut in den Knotenpunkten zusammenfassen. Außerdem beschränkte sich so die Bauhöhe der Netze, da die Hauptseile, welche bis zu den Mastspitzen gehen, sich frei, geradlinig und ihrer Belastung aus Längskräften entsprechend, verhalten konnten. Sie mussten nicht gekrümmt sein.

Die Randseile bündeln die Einzelkräfte der Netzseile und leiten sie in die Knotenpunkte weiter. Sie wurden aus standardisierten Litzenbündeln mit einem Durchmesser von 81 mm gebaut. Diese Seile haben eine zulässige Tragkraft von 3MN/m. In den Bereichen, in denen größere Belastungen auftreten können, wurden dann entsprechend mehrere Seile miteinander verbunden.

2.2.3. radiale Lastabtragsebenen

Wie bereits erläutert, werden die bisher beschriebenen Netze immer zwischen zwei Tragkonstruktionen gespannt, welche sich radial auf das große Stadionrandkabel und damit auch auf das Stadion beziehen. Nur an den Enden des Stadionsdaches befinden sich zusätzliche Abspannungen zum Boden. Die radial angeordneten Konstruktionen wiederholen sich dementsprechend acht mal. Dabei ändern sich die Dimensionen etwas, das Lastabtragsprinzip, das ich im folgenden erklären will, ist aber gleich.

Ein großes Problem in der Konzeption des gesamten Daches war die Forderung nach Stützenfreiheit, die den ungestörten Blick auf das Stadion gewährleisten sollte. Daher wurde es notwendig, die großen Pylone hinter das Stadion zu stellen. An diesen Pylonen ist das gesamte Dach aufgehängt. In der Schnittdarstellung wird dies sehr deutlich. Der Pylon ist das einzige Bauelement, welches in der Lage ist, Druckkräfte in den Erdboden zu leiten. Zu dieser Konstruktion gehören neben dem Pylon auch eine fliegende Stütze,



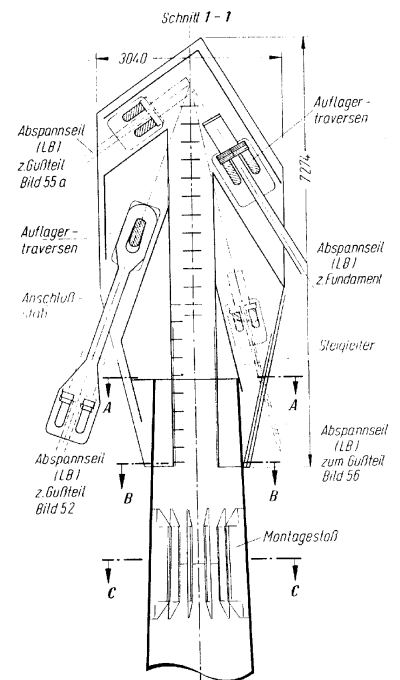
verschiedene Haupt- und Rückhalteseile und das Stadionrandkabel, welches nochmals gesondert betrachtet werden soll.

Auch in den radialen Lastabtragsebenen sind die einzelnen Seile gegeneinander gespannt. Im Schnitt ist gut zu erkennen, dass das Seilnetz mit Hilfe von Hauptseilen vom Pylonkopf abgehängt ist. Die Vorspannungen der Netze wirken also direkt auf den Pylon. Damit dieser nicht in das Stadion hineinfällt, wurde er auf der Stadionaußenseite durch verschiedene Rückhalteseile verankert. Die seitliche Aussteifung erfolgt ebenfalls über Abspannungen und über das direkte Zusammenwirken mit den Seilnetzen.

Das Element der fliegenden Stütze ist eine einfache Möglichkeit, um die Krümmung der Seilnetze zu erhöhen. Würde dieser Punkt direkt von der Pylonspitze abgehängt werden, dann entstünde fast eine Gerade zwischen Pylonkopf und Stadionrandkabel. Wie bereits erläutert, würden hier die Lasten sehr groß werden. Durch die fliegende Stütze ist es möglich, die Abspannung mit ausreichendem Stich vorzunehmen und das Seilnetz von dort aus aufzuständern, so dass der Seilnetzrand eine ausreichende Höhe hat.

Alle Haupt- und Rückhalteseile sind geradlinig ausgeführt. Sie nehmen ausschließlich Normalkräfte auf und sind daher auch gut dimensionierbar. Allerdings ist es notwendig, hohe Dehnsteifigkeiten zu gewährleisten, da die Verformungen des Daches unter Wind und Schnee sehr stark davon abhängig sind. Es wurden daher Paralleldrahtbündel für diese Seile verwendet, da diese nicht verdreht sind und damit einen geringeren Seilverlust unter Belastung haben. Verdrehte Seile haben die Möglichkeit, unter Belastung sich auch dehnungslos zu verformen und ‚näher zusammenzurücken‘. Durch die Verdrehung der einzelnen Drähte würde das Seil dadurch länger werden. Diese ungewollte Längenänderung kann bei parallelem Verlegen der einzelnen Drähte reduziert werden. Die Seile sind hier alle für eine Belastung von 11,5 MN bemessen. Wenn in einem Seil größere Kräfte zu erwarten sind, dann wurden mehrere Seile zusammengefasst. Dies war beispielsweise beim großen Stadionrandseil notwendig. Hier nahm man Lasten von bis zu 50 MN an. Dementsprechend wurden hier 10 einzelne Seile zusammengefasst. (vgl. Detailausbildungen).

Das große Stadionrandkabel ist eine Entwicklung von Frei Otto. Es wirkt wie ein frei hängendes Seil, welches radial belastet wird. Dabei wird die gesamte Dachkonstruktion gegen dieses Seil gespannt. Die Stabilität gegen dehnungslose Verformungen wird durch diese Vorspannung in regelmäßigen und unverschieblichen Abständen gewährleistet. Die Ausbildung dieses großen Seiles ermöglicht eine Dachausführung, die im Zuschauerraum vollständig auf Stützen und Abspannungen verzichten kann. Die enormen Kräfte, welche durch die gesamte Dachkonstruktion auf dieses Seil wirken, werden in zwei Schwerkraftfundamenten aufgenommen, welche so groß wie



ein Mehrfamilienhaus sind. Die Fundamente werden später noch näher erläutert.

Die 8 Pylone sind die einzigen Elemente dieser Tragkonstruktion, die Druckkräfte von punktuell bis zu 50MN in das Erdreich einleiten können. Sie sind bis zu 80m hohe Rohre, die aus gestalterischen Gründen zu den Enden hin konisch geformt worden sind. Der Durchmesser dieser Rohre beträgt bis zu 3,5m, wobei diese enormen Dimensionen auch auf Wunsch des Architekten umgesetzt wurden. Außerdem hat dieser große geschlossene Querschnitt mit einer Wandstärke von 8cm eine positive Auswirkung auf das Knickverhalten der Maste. Die Mastköpfe sind geschweißt. Hier laufen die Wirkungslinien der Hauptseile in genau einem Punkt zusammen. Die Seile sind hier nicht umgelenkt, sondern mit Hilfe einer neuen, stabileren Technik vergossen worden. Bemerkenswert sind auch hier die Dimensionen, die mit einer Breite von über 3m doch gewaltiger sind, als es für den Betrachter scheint.



Die Pylone wurden für die Montage auf einem Kugelfundament errichtet, so daß eine einfache Aufrichtung möglich wurde. Diese Stahlkugeln standen auf einem Betonfundament und wurden nach der Errichtung des Daches auch einbetoniert. Für die Beweglichkeit der Lager nach der Errichtung des Daches sorgen allseits bewegliche Gummitopflager, um die Übertragung von Momenten über die Pylone zu verhindern.

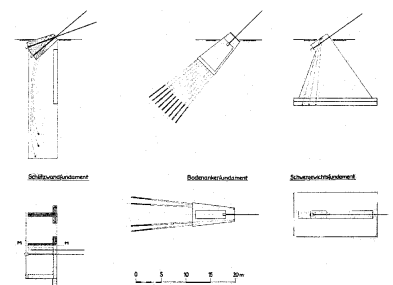
2.2.4. Fundamente

Beim Bau des Olympiadaches wurden drei verschiedene Fundamentarten eingesetzt.

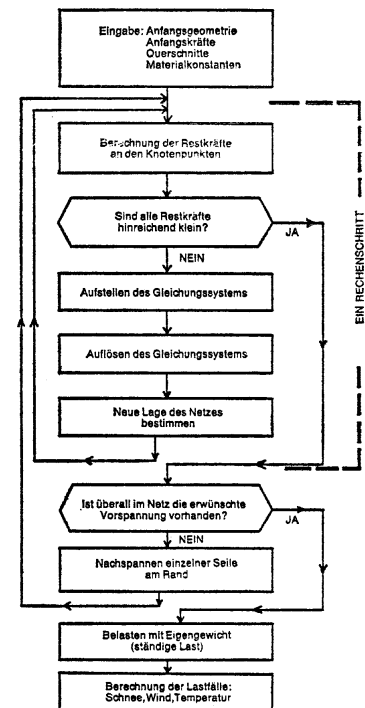
Die Schlitzwandfundamente funktionieren wie ein überdimensionaler Zelthering. Sie sind so ausgebildet (Tiefe der Ausführung, Druckplatte, ...) dass sie zusätzlich Erdreich mit zum Lastabtrag aktivieren können. Sie wurden beispielsweise bei den Abspannungen der Pylone eingesetzt.

Bei den Bodenankerfundamenten werden Seile mit dem Erdreich so verpresst, dass das Erdreich mit zur Tragwirkung herangezogen wird. Diese Fundamente haben einen geringeren Materialaufwand, können aber nur bis zu einem bestimmten Winkel eingesetzt werden, da sonst das Erdreich nach oben ausbrechen kann.

Die größten Fundamente sind die Schwergewichtsfundamente. Sie wurden an den Fußpunkten des Stadionrandseiles eingesetzt. Durch ihre Ausführung mit einer großen Fußplatte wird auch hier das aufliegende Erdreich mit zum Lastabtrag herangezogen. Allerdings müssen diese Fundamente trotzdem gigantisch groß sein. Am Stadionrandkabel werden Dimensionen von 11m*30m*12m angegeben, was durchaus mit einem Mehrfamilienhaus vergleichbar ist.



Die komplexen Zusammenhänge in dieser sehr schönen Dachkonstruktion sind schwer in Formeln zu fassen. Auch die Ingenieure, die sich damals mit diesen Problemen beschäftigt haben, mussten viel auf Modelle zurückgreifen, um Erfolg zu haben. Charakteristisch hierfür ist ein Ausspruch von Jörg Schlaich, der an der Entwicklung des Olympiadaches mitgearbeitet hat. Er äußert sich in einem Artikel zur Auswahl der Entwürfe und zu deren Umsetzung über das Problem der Windkräfte wie folgt: „Wir spürten zwar schon damals, dass sich solch komplexe Strukturen nicht zu harmonischen Schwingungen anregen lassen, was wir später auch an einem einfachen Probedach nachweisen konnten und bis heute vom gebauten Dach bestätigt bekamen, konnten das damals aber überhaupt noch nicht beweisen.“ (Schlaich, Jörg in Behnisch & Partner Bauten 1952-1992; 1992; 48) Auch in allen anderen Bereichen wurde viel mit Messmodellen für die Dimensionierung und den Zuschnitt gearbeitet. In der weiteren Entwicklung wurde das Dach der Schwimmhalle erstmals mit Hilfe von Computern vollständig berechnet. Dabei musste man vielfach auf eine schrittweise Näherung zurückgreifen, da eine Berechnung mit einer Formel zu viele Unbekannte beinhaltet hätte. Das Schema zeigt einen Rechenschritt, der mit immer wieder angepassten Parametern so oft gerechnet wurde, bis die Ergebnisse in einem kleinen vorgegebenen Toleranzbereich lagen. Dabei musste immer zwischen unbelastetem und belastetem Zustand unterschieden werden. Die Rechnungen waren so aufwendig, dass eine Gruppe von Bundeswehrosoldaten abgestellt wurde, um die Lochkarten auszuwerten und die Rechnungen durchzuführen. An der Projektierung und der Berechnung arbeiteten über 100 Ingenieure gleichzeitig zusammen. Dieser enorme Aufwand stellt eine Pionierleistung im Bereich leichter Tragwerke dar.



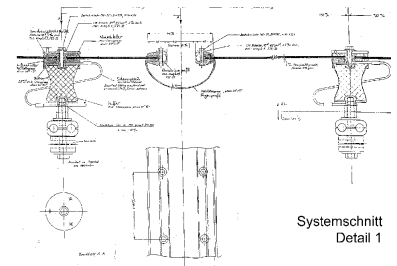
3. Dachhaut

3.1. Materialfindung, -auswahl und -beschreibung

Für das Zeltdach wurde ursprünglich von den Architekten Behnisch & Partner eine schalenartig wirkende Holzkonstruktion mit bereits erprobtem Eindeckungsmaterial (Metallschindel) als Gesamtüberdachung vorgeschlagen, also keine transluzente Dacheindeckung. Letztere wurde erst später vom Fernsehen gefordert, da bei der vorherigen Fußballweltmeisterschaft die Stadionbedachung sehr große Schlagschatten auf das Spielfeld warf und die Fernsehkameras die starken Lichtkontraste nicht ausgleichen konnten. So wurden verschiedene, lichtdurchlässige Materialien in Erwägung gezogen, wie beschichtete Planen, vorgespanntes Plexiglas und glasfaserverstärktes Polyesterharz. Im Freien wurden die Materialien bei Lagerungsversuchen unter verschiedenen Stellungen auf ihre Schneehaft- und Rutschfähigkeit, d.h. auf Lawinengefahr hin untersucht, aber auch auf Lichtdurchlässigkeit und Brandverhalten.

Die beschichtete Plane schied wegen bleibender Überdehnung bei hohen Schneelasten (Schneesackbildung) aus und glasfaserverstärktes Polyesterharz hatte ein negatives brandtechnisches Verhalten, somit blieb nur noch das gereckte Plexiglas von der Firma Röhm übrig. Bei dessen Herstellung wird Plexiglas zwischen zwei Glasscheiben zu einer ca. 2mx2m großen Platte gegossen und durch eine Spezialmaschine, die an allen vier Seiten befestigt ist, bei ca. 150°C auf 3mx3m Kantenlänge gereckt. Dieser Reckvorgang wirkt sich positiv auf brandtechnisches Verhalten der Scheibe aus. Bei ca. 200°C wird die Platte thermoelastisch und versucht, in seine Ursprungsform zurück zu gelangen, wird aber durch den Alurahmen daran gehindert und reißt auf. Der Rauch kann dadurch frei entweichen und ein gefährlicher Hitzestau für die Tragkonstruktion bleibt aus. Das Material brennt nicht und tropft nicht brennend ab. Weiter Vorteile sind: Begehbarkeit; Zähigkeit; hohe Bruchdehnung; glatte, leicht zu reinigende Oberflächen; geringes Gewicht und die Möglichkeit einer sonnenbrillenähnlichen Tönung der Scheiben.

Die 3m x 3m großen Plexiglasplatten mussten auf dem Seilnetz mit 75cmx75cm großen Maschen befestigt werden. Obwohl es sich bei dem vorgespannten Seilnetz um eine relativ starre Konstruktion handelt, musste mit Winkelverschiebungen und Auslenkungen an den Knotenpunkten gerechnet werden, die bis zu ±4cm ausmachen konnten. Ferner musste die Befestigung große Druck- und Zugbelastungen durch Schnee, Winddruck und -sog aufnehmen können und auch die temperaturbedingte Ausdehnung der Plexiglasplatten mitmachen.



Dazu wurde von der Firma Metzeler in langen Versuchsreihen ein Gummi-Metall-Puffer entwickelt. Ein zusätzliches Sicherheitsseil verhindert ein Lösen der Scheibe von der Konstruktion im Falle des Versagens eines solchen Gummi-Puffers. Jede Plexiglasscheibe wird durch 16 Puffer an der Seilnetzkonstruktion gehalten. Die Verbindungen gestatten Eigenbewegungen der Dachhaut, ohne dass ein unerwünschter Vibrations- oder Flattereffekt eintritt.

Zur Verbindung der Plexiglasplatten untereinander wurde ein Chloroprene-Fugenband verwendet, das durch Aluminiumprofile fest mit der Platte verklebt wurde und eine Verschiebung der Platten untereinander in Quer- und Längsrichtung ermöglicht. Diese schwarze Sicke dient auch zur Dränierung des Wasserlaufes, so dass das Regenwasser gebremst die Dachfläche herunterläuft und nicht über die Randrinne spritzen kann, außerdem verhindert dieses schwarze Band eine Schneebrettbildung, da bei Sonneneinstrahlung ein mögliches Schneebrett durch vorzeitiges Abtauen an diesen Stellen bereits geteilt wird. Die Aluminiumrahmen an den Plexiglasscheiben werden durch Aluminiumbügel miteinander verbunden. Dies ist notwendig, um bei Belastung den Druck von einer Platte auf die Nächste und um bei Blitzeinschlag den Stromfluss über die Rahmen in die Erde abzuleiten zu können.

Zur Montage der Plexiglasplatten und der Fugen mussten spezielle Geräte entwickelt werden, welche alle technischen Anforderungen erfüllten und auch in besonders steilen Bereichen des Daches noch handhabbar waren.

3.2. Aktuelle Maßnahmen

Mit der Zeit kam es zu Eintrübungen (Schieferung) der Plexiglasscheiben durch Umwelteinflüsse wie Regen, Schnee, Umweltverschmutzung. 1996 wurden Musterflächen eingerichtet um verschiedene Dacheindeckungen zu testen, aber wieder konnte sich gerecktes Plexiglas durchsetzen, da bei Folie durch zu erwartenden hohen Schneelasten eine bleibende Überdehnung die Folge wäre (Schneesackbildung) und andere Eindeckungen den erforderlichen Brandschutz nicht erfüllen konnten, oder unter dem Umwelteinfluss zu schnell vergilbt wären. Außerdem steht das Olympiadach unter Denkmalschutz, insofern sollte eine so originalgetreue Instandsetzung wie möglich erfolgen.

Seit 1997 werden die Plexiglasscheiben samt ihrer Aluminiumrahmen, Dehnfugenbändern und Gummi-Metall-Puffern, durch das selbe Material wie es 1972 zum Einsatz kam, ersetzt. Nur wenige Detailpunkte, wie die Regenwasserabführung und die Öffnungen der Lüftungskappen von Olympiaschwimmbad und -halle, welche nun elektronisch gesteuert werden, wurden geändert.

4. Literaturverzeichnis

KREHL, HEINZ:

„Olympische Bauten München 1972“
(2.Sonderband,Bestandsaufnahme Herbst 1970)
Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1970

ANGERER, WOLF :

„Olympische Bauten München 1972“
(3.Sonderband, Bauabschluß Sommer 1992)
Karl Krämer Verlag, Stuttgart, 1972

GAUZIN-MÜLLER, DOMINIQUE

„Behnisch & Partner“ 50 Jahre Architektur
Ernst&Sohn Verlag für Architektur und
technische Wissenschaften GmbH, 1997

GRZIMEK, GÜNTER:

„Gedanken zur Gestaltung der Olympialandschaft“
in „Behnisch und Partner“ Bauten 1952-1992
Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1992

SCHLAICH, JÖRG:

„Das Olympiadach in München, Wie war das damals?
Was hat es gebracht?“
in „Behnisch und Partner“ Bauten 1952-1992
Verlag Gerd Hatje, Stuttgart, 1992

„Sportbauten für die XX.Olympiade“
in „der Mensch und die Technik“;
Technisch-Wissenschaftliche Blätter der Süddeutschen
Zeitung
13.Jahrgang; 192.Ausgabe; 29.Dezember 1971

OTTO, FREI

„Das hängende Dach“
Bauwelt Verlag der Uhlstein A.G., Berlin, 1954

„Olympiapark München“
in Sonderdruck aus db . Deutsche Bauzeitung
Die Bauzeitung Heft 8/1972