



MERO 

# SPACE *feeling*

Garten Eden

Sonderdruck aus: Stahlbau (2001), Heft 08, © Verlag Ernst & Sohn, Bühringstraße 10, 13086 Berlin  
Verfasser: Knebel/Sanchez/Zimmermann

# Das Eden-Projekt

## Konstruktion, Fertigung und Montage des größten Gewächshauses der Welt

An der südwestlichen Spitze von England in Cornwall wurde im Frühjahr 2001 das Eden-Projekt fertiggestellt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Dieses Projekt ist neben dem Dome und dem Riesenrad in London eines der englischen Millennium-Großprojekte zur Jahrtausendwende.

Im modernen Garten Eden werden den Besuchern auf einem 15 ha großen Freigelände und in zwei riesigen Gewächshäusern die verschiedenen Klimazonen der Erde mit ihren typischen Pflanzen gezeigt. Die Stahlkonstruktion der überdimensionalen Kuppelbauwerke basiert auf einer Weiterentwicklung der klassischen MERO-Bauart: Rohre werden mit Knoten zusammenschraubt. Die hohe Präzision sowie die schnelle Montage ermöglichen auch bei kompliziertesten Geometrien ein wirtschaftliches Bauwerk.

Als Eindeckungselemente wurden extrem leichte und transparente aber dennoch haltbare luftgefüllte Folienkissen gewählt, die in ihrer Größe weltweit noch nie ausgeführt wurden.

Das ca. 125 Millionen Euro teure Projekt wurde von der Öffentlichkeit mit großer Begeisterung aufgenommen. Seit der Eröffnung im März 2001 strömen die Besucher täglich zu Tausenden zum Garten Eden, welcher in der englischen Presse schon als achtetes Weltwunder bezeichnet wird.

**The Eden Project – Design, fabrication and assembly of the largest greenhouse of the world.** *In the spring of 2001, on the south-western tip of England in Cornwall, the Eden Project was opened to the public. This project is, along with the Dome and the ferris wheel in London, one of the big British Millennium Projects.*

*On an outdoor area of 15 ha, and in two giant greenhouses, the modern Garden of Eden shows different climate zones of the world with their typical vegetation.*

*The steel structure of the two huge domes was developed from the MERO space frame system: pipes are bolted together by means of nodes. Due to the very low tolerances and quick assembly of this system, even complex geometrical structures are economical.*

*Very light and transparent, but also durable air filled foil cushions were chosen for the cladding system. A cushion system of this size had never been built before.*

*The 125 Million Euro project is a great success. Since the official opening in March 2001, thousands of visitors take pleasure in the gardens every day. The Garden of Eden has been called the eighth wonder of the world by the British press.*

### 1 Allgemeines

Der geistige Vater des Projektes ist *Tim Smit*, ein Archäologe und Anthropologe. Bei der Fahrt durch das mit stillgelegten Tongruben übersäte Cornwall hatte er eine Vision: Hier sollte der moderne Garten Eden entstehen, ein Platz, an dem den Menschen die Vielfalt und die Bedeutung der Pflanzenwelt näher gebracht werden sollte.

Nach einiger Suche wurde eine Tongrube bei Bodelva nahe der Kleinstadt St. Austell im englischen Cornwall (Bild 1) als idealer Bauort gewählt. Das dortige milde Seeklima kommt dem Vorhaben sehr entgegen. Im Winter sind die Temperaturen fast immer über null Grad,

Frost und Schnee gibt es kaum. Das Projekt schafft außerdem in dieser wirtschaftlich schwachen Region direkt und indirekt viele neue Arbeitsplätze.

In der erst kürzlich stillgelegten Tongrube wurde 180 Jahre lang Kaolin abgebaut. Kaolin, oder auch Porzellanerde genannt, entstand in Millionen von Jahren durch eine chemische Umsetzung aus Granitgestein und dient neben der klassischen Verwendung zur Herstellung von Porzellan auch als Zusatz für die Papier- und Gummiherstellung.

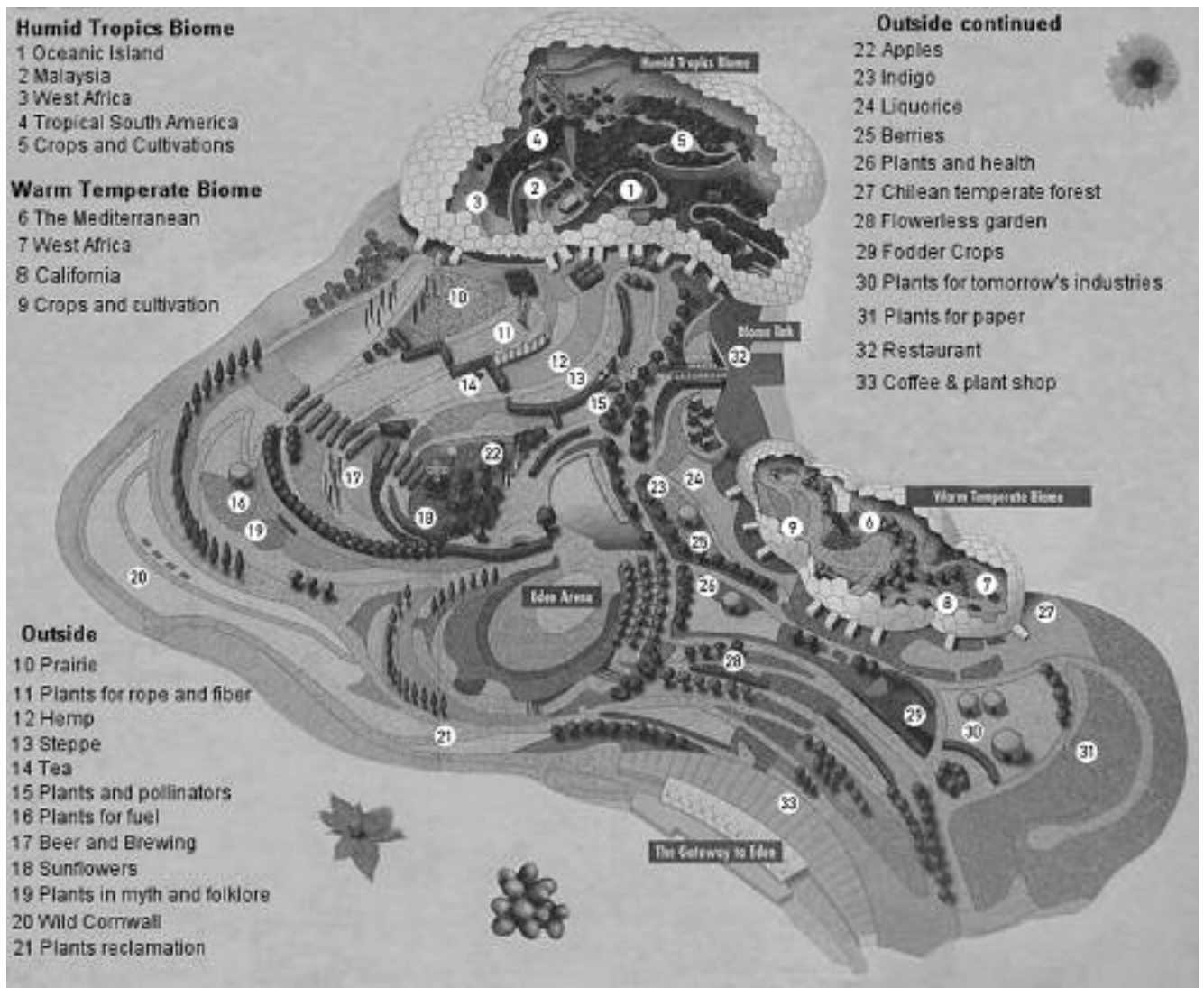
Das gesamte Gelände ist etwa 50 ha groß. Das eigentliche Kernstück der Anlage (Bild 2) hat eine Fläche von etwa 15 ha und ist bis zu 70 m tief. Vor Beginn der umfangreichen Erdarbeiten wurde das Gelände vermessen und mit Hilfe moderner Software im Rechner abgebildet. So konnten die notwendigen Erdbewegungen genau ermittelt werden, und die Architekten und Landschaftsplaner hatten die Möglichkeit, das Projekt virtuell am Computer zu planen.

Um den Anforderungen eines umweltschonenden Bauens gerecht zu werden, wurden die Erdmassen nur verschoben, d. h., es wurde kein Boden aus der Grube entfernt oder entsorgt. Ebenso wurde außer dem für die Pflanzen notwendigen Mutterboden kein Füllmaterial auf die Baustelle gebracht. Insgesamt wurden etwa 800 000 m<sup>3</sup> Erde bewegt, um dem Gelände das jetzige Profil zu geben.

Das natürliche Grundwasser, welches aus den vielen Quellen sprudelt, wird in Becken und Seen gesammelt und für die Bewässerung der Pflanzen benutzt. Während der Bauzeit war dieses Wasser jedoch äußerst hinderlich. Im ersten Winter mußten die Baumaßnahmen zeitweise komplett eingestellt werden, weil die Baugrube überflutet war. Zu jener Zeit wurde auch schon diskutiert, ob das Projekt angesichts der Wassermassen jemals zu Ende geführt werden könnte. Daraufhin wurde von den verantwortlichen Ingenieuren ein erweitertes und leistungsfähigeres Dränagesystem entwickelt, mit dem man die Wasserhaltung des Geländes in den Griff bekam.



**Bild 1.** Eden-Projekt in Cornwall, England  
**Fig. 1.** Eden Project located in Cornwall, England



**Bild 2.** Übersicht über die Anlage  
**Fig. 2.** Map of Eden



**Bild 3.** Übersicht über das Bauwerk  
**4 Fig. 3.** General overview

Die Gesamtkosten des Projektes liegen bei etwa 86 Mill. britischen Pfund (125 Mill. Euro). Finanziert wurde das Projekt etwa zur Hälfte von der Millenniums-Kommission und von einer eigens eingerichteten Eden-Trust-Gesellschaft. Das Eden-Projekt läuft auf einer nicht profitablen Basis, d. h., der Gewinn aus den Einnahmen fließt zurück in das Projekt für weitere Investitionen.

## 2 Lage der Bauwerke

Die Anlage besteht neben den Freiflächen aus mehreren Bauwerken (Bilder 2 und 3). Am oberen Rand der Grube befindet sich das Besucherzentrum. Neben dem Haupteingang sind hier Souvenirgeschäfte, Restaurant und Ausstellungen untergebracht. Dieses Gebäude wurde

schon im Mai 2000, also knapp ein Jahr vor der Eröffnung des Projektes, fertiggestellt und der Öffentlichkeit zugänglich gemacht. Für etwa 10 DM Eintritt haben etwa eine halbe Million Besucher im Zeitraum von Mai 2000 bis Januar 2001 das Besucherzentrum besichtigt. Von einer Terrasse aus konnte man beim Tee die Bauarbeiten beobachten.

Das eigentliche Hauptbauwerk besteht aus drei Teilen.

In den **Humid Tropic Biomes (HTB)** ist der feucht-warme Regenwald mit Pflanzen aus Westafrika, Malaysia oder Ozeanien untergebracht. Dieser Teil ist bis zu 110 m breit und 240 m lang. Aus vielen Düsen wird ständig ein warmer Nebel versprüht, um das feucht-warme Waschküchenklima aufrechtzuerhalten.

Die HTBiomes wurden aus den vier Kuppeln (ABCD) zusammengesetzt (Bild 4), wobei die Kuppel B mit einem Durchmesser von knapp 125 m die größte ist. Bei einer Höhe von bis zu 55 m haben selbst große Urwaldriesen Platz zum Wachsen. Da diese Pflanzen das meiste Sonnenlicht beanspruchen, wurde von den Architekten und Landschaftsplanern die Ausrichtung dieser Kuppeln mittels Computersimulation anhand des Verlaufs der Sonne optimal bestimmt.

Die vier Kuppeln (EFGH) bilden den **Warm Temperature Biome (WTB)** mit einer inneren Ausdehnung von etwa 150 m Länge, 65 m Breite und etwa 35 m Höhe. In diesem Teil sind die typischen Pflanzen aus den warmen Klimazonen Südafrikas, Kaliforniens und aus dem europäischen Mittelmeerraum untergebracht.

Zwischen den HTB- und WTB-Domes befindet sich das **Link-Gebäude**, welches aufgrund seines Grasdaches kaum sichtbar ist (Bild 3). Es dient als Eingang und Verbindungsgebäude der beiden Gewächshäuser. Neben den sanitären Einrichtungen können sich die Besucher in einem 500-Plätze-Restaurant von den Strapazen der Regenwaldtour erholen. Ursprünglich waren für diesen Verbindungsbau mehrere kleine Kuppeln im Stile der großen vorgesehen. Diese wurden jedoch in der Planungsphase aus Kostengründen durch das jetzige Bauwerk ersetzt.

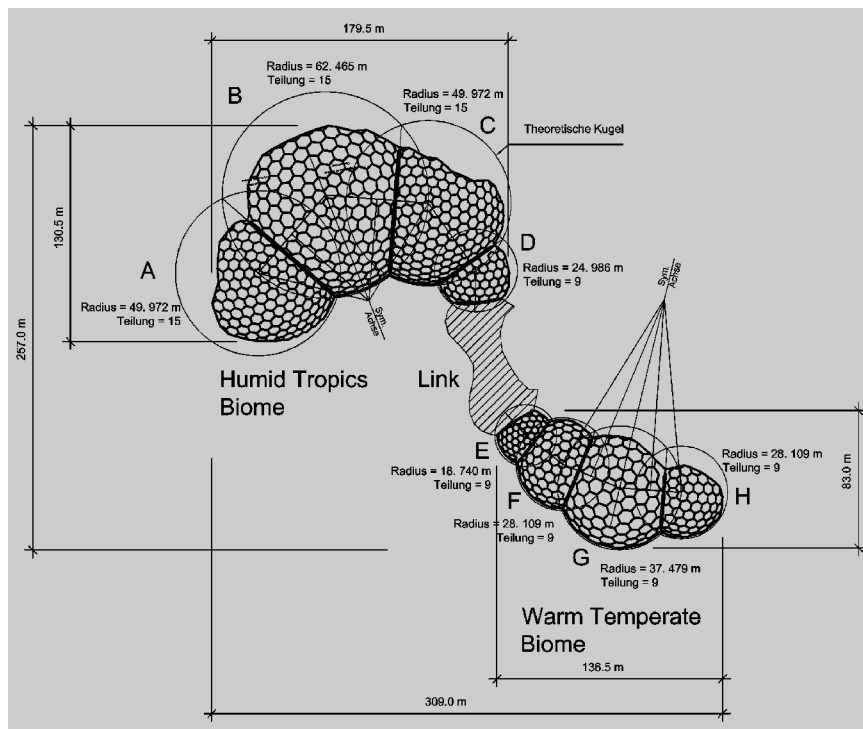
Auf einer Freifläche von ca. 15 ha werden neben der einheimischen Flora Pflanzen aus Chile, Zentralasien oder dem Himalaja kultiviert. Diese wachsen dank des milden Seeklimas und der geschützten Lage im Freien. Daneben werden den Besuchern in Ausstellungen und Veranstaltungen zahlreiche weitere Sehenswürdigkeiten gezeigt. In der Eden-Arena, einem Freiluft-

amphitheater mit den Biomes als Hintergrundkulisse, werden regelmäßig Veranstaltungen abgehalten.

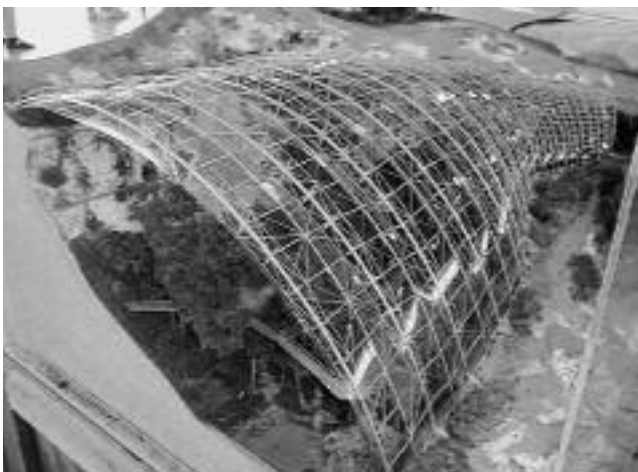
### 3 Tragwerksentwurf

Der erste Entwurf (Bild 5), den die Architekten Nicholas Grimshaw and Partners, London (NGP), zusammen mit Anthony Hunt Associates Ltd., London (AHA), [1] 1995 erarbeiteten, sah zunächst eine Konstruktion mit Bogenträgern, Pfetten und Verglasung in Anlehnung an den auch von NGP geplanten Londoner Bahnhof Waterloo Station vor.

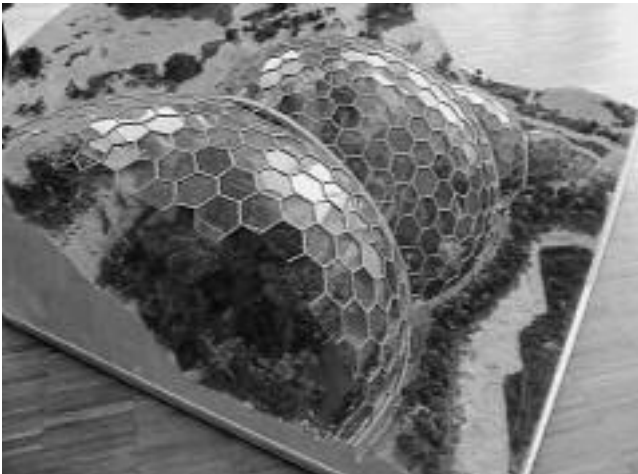
Der Nachteil dieses Entwurfes lag im hohen Stahlgewicht und den kleinen Glasflächen, welche den Pflanzen im Inneren zu viel Tageslicht weggenommen hätten. Zum weiteren konnte dieser Entwurf nur schwer dem sehr unregelmäßigen Geländeprofil angepaßt werden.



**Bild 4.** Lage der Kuppeln  
**Fig. 4.** Layout of the domes



**Bild 5.** Modell des ersten Architektenentwurfs  
**Fig. 5.** Model of the first architectural layout



**Bild 6.** Modell des ursprünglichen einlagigen Entwurfs  
**Fig. 6.** Model of the former single layer structure

Nach erfolgter Ausschreibung des ersten Tragwerksentwurfes durch den Generalunternehmer McAlpine Joint Venture zeigte sich, daß diese Konstruktion auch aus wirtschaftlichen Gründen nicht sinnvoll war und daher eine andere Lösung gefunden werden mußte. Die Architekten von NGP und die Ingenieure von AHA entwickelten daraufhin ein einlagiges Tragwerk (Bild 6), basierend auf miteinander verschnittenen Kuppeln. Die Oberfläche bestand aus charakteristischen Sechseckflächen.

Dieser Entwurf hatte zum einen den Vorteil, daß durch Hinzufügen und Weglassen von halben Sechseckflächen in den Randbereichen eine flexible Anpassung an das Geländeprofil möglich wurde, zum anderen war durch die Größe der Sechseckelemente eine optimale Lichtausbeute gewährleistet. Die Wabenstruktur kommt außerdem dem Vorbild einer natürlichen Struktur am nächsten. Als nächstes stellte sich nun die Frage der praktischen und wirtschaftlichen Umsetzbarkeit eines solchen Tragwerkes mit den hier gegebenen außerge-

wöhnlichen Dimensionen und den schwierigen Randbedingungen.

Zu diesem Zeitpunkt (1997) begann die Zusammenarbeit der Architekten und Ingenieure mit MERO. Nach einigen Berechnungen und Überlegungen war klar, daß die einlagige Struktur für diese Dimensionen der Sechseckfelder zu weich und damit sowohl statisch als auch wirtschaftlich ungeeignet war.

In enger Zusammenarbeit mit NGP und AHA wurden die Geometrie und das Tragwerk von MERO komplett überarbeitet. Als Ergebnis dieses Optimierungsprozesses ergab sich ein zweilagiges Raumfachwerk, bei dem die Sechseckfelder des Obergurtes als Primär-Struktur erkennbar blieben (Bild 7).

Als Eindeckungssystem wurden luftgefüllte ETFE-Folienkissen gewählt. Das geringe Gewicht des Eindeckungssystems ermöglichte eine weitere Reduzierung des Konstruktionsgewichtes gegenüber der ursprünglich vorgesehenen Glaseindeckung. Die Folienkissen lassen im Gegensatz zum Werkstoff Glas viel mehr UV-Licht in das Innere eindringen und sind außerdem infolge des Luftpuffers hoch wärmedämmend.

Mit dieser Bauweise konnten nun alle maßgebenden Vorgaben erfüllt werden: Die Stahlkonstruktion ist minimiert, und der gesamte Innenraum ist frei von Stützen. Das für die Pflanzen notwendige Sonnenlicht kann durch die großen Sechseckfelder nahezu ungehindert einfallen.

Im Frühjahr 1999 begannen bei MERO die Berechnungen und Ausführungsplanungen für dieses Projekt.

#### 4 Die Geometrie der Kuppeln

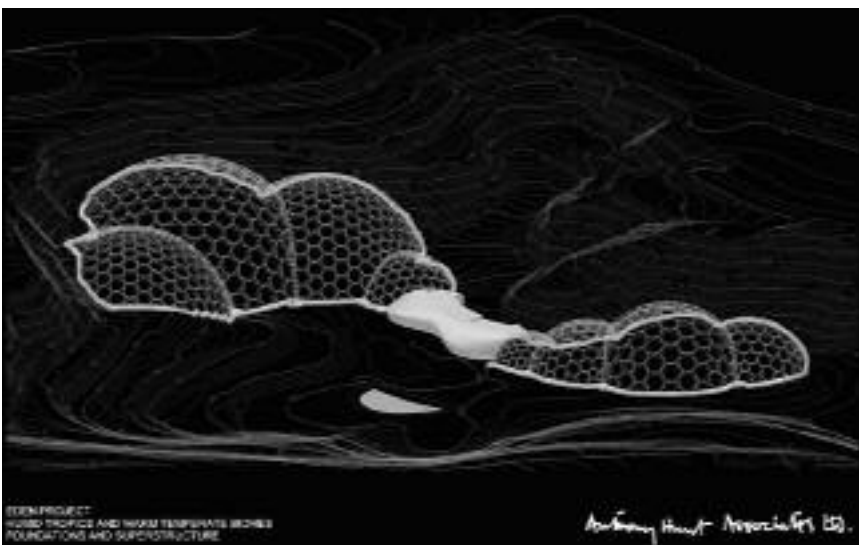
##### 4.1 Grundlagen

Die geometrische Struktur der Kuppeln sind geodätisch-sphärische Netze. Sie sind „sphärisch“, weil die Elemente des Netzes, in der Regel die Knotenpunkte, auf der Oberfläche einer Sphäre oder Kugel liegen. Sie werden als „geodätisch“ bezeichnet, weil sie die Gestalt, Struktur und Symmetrieeigenschaften der durch *Buckminster Fuller* bekannten geodätischen Kuppeln haben.

Streng betrachtet liegen geodätische Linien auf einer gekrümmten Oberfläche; sie stellen den kürzesten Weg zwischen Punkten auf der Oberfläche dar und sind im allgemeinen gekrümmte Kurven. Die Liniensegmente eines geodätischen Kugelnetzes sind jedoch im allgemeinen nicht gekrümmt, sondern gerade Linien (Stäbe), die lediglich die Endpunkte von Kurvensegmenten (Knoten) der Oberfläche verbinden.

Zur Frage, wie das gewählte Netz möglichst optimal auf einer Kugeloberfläche verlegt werden kann, gibt es verschiedene Methoden, unter anderem die von *Emde* [2] in Deutschland, *Fuller* [3] in Amerika und *Pavlov* [4] in Rußland entwickelten.

Für die Baupraxis kann die Mehrheit der geodätischen Kugel-



**Bild 7.** Gesamtmodell des Bauwerks

**6 Fig. 7.** Model of the entire structure

netze aus den regelmäßigen platonischen Körpern Ikosaeder und Dodekaeder abgeleitet werden: Ein Ikosaeder ist ein mehrflächiger Körper (Polyeder) mit zwanzig identischen gleichseitigen Dreiecksflächen, ein Dodekaeder ist ein Polyeder mit zwölf identischen fünf-eckigen Flächen.

Dodekaeder und Ikosaeder gehen ineinander über, wenn man die Mittelpunkte von benachbarten Flächen mit Linien verbindet. Diese Eigenschaft wird als Dualität bezeichnet.

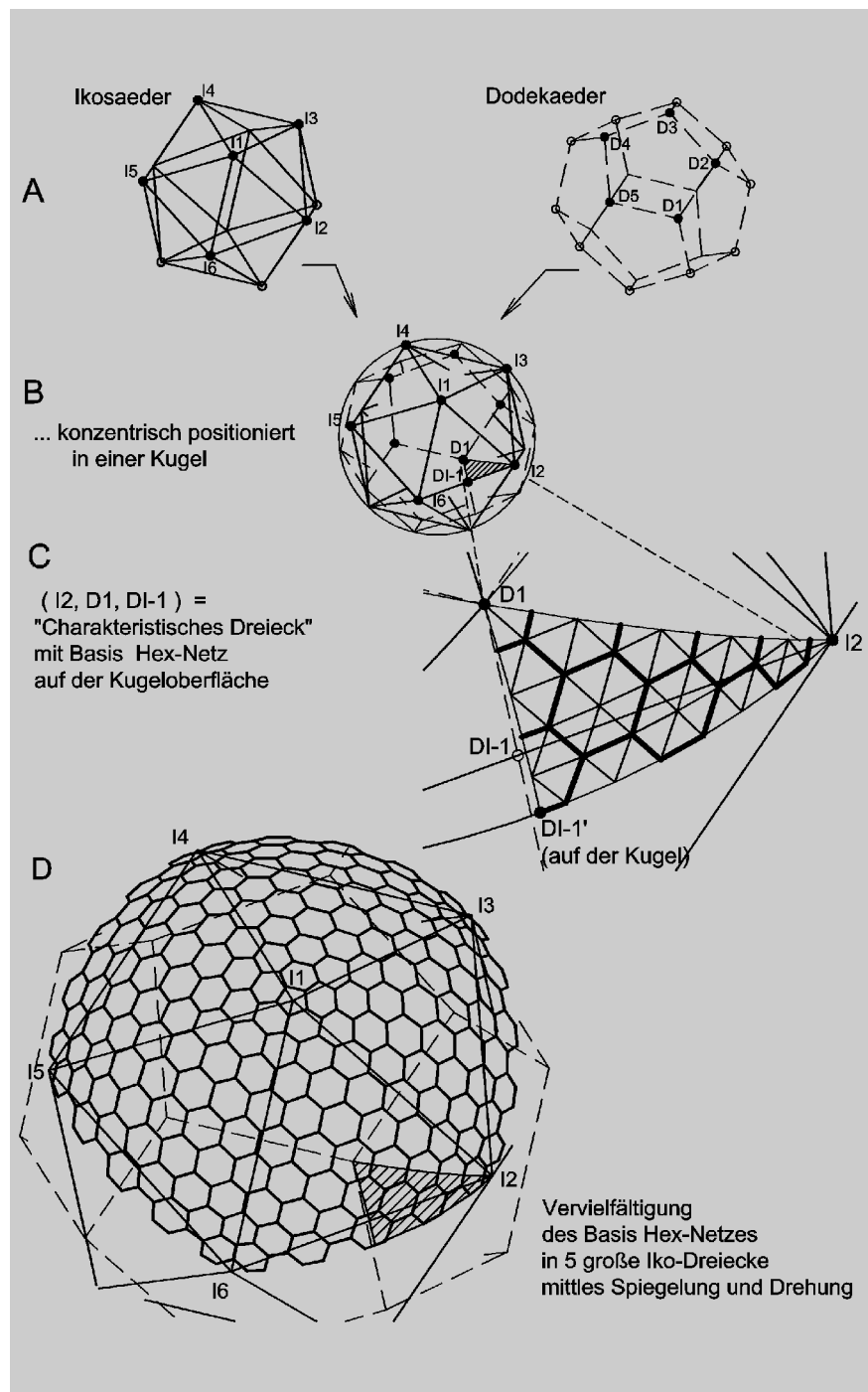
#### 4.2 Geometriegenerierung

Die Stabwerke des Eden-Projektes bestehen aus jeweils zwei konzentrischen Kugeln, welche eine vorgegebene Radiusdifferenz (= Bauhöhe der Struktur) aufweisen. Ober- und Untergurtnetze werden mit einem Satz von Linien (= Diagonalen) zu einem zweilagigen Kugelnetz verbunden, wodurch das räumliche Tragwerk entsteht.

Das Außennetz (Obergurt) ist ein Sechsecknetz, hier auch „Hex-Netz“ genannt. Das Innennetz (Untergurt) besteht aus Dreiecken und Sechsecken und wird deshalb auch „Tri-Hex-Netz“ genannt. Die wesentlichen Schritte zur Generierung der Eden-Geometrie sind in den Bildern 8 und 9 sowie in [5] gezeigt.

Um ein Dodekaeder/Ikosaeder (DI)-Netz zu generieren, werden die zwei Polyeder in dualer Lage auf den Kugelmittelpunkt positioniert. Die Eckpunkte des Ikosaeders sind am fertigen Bauwerk an den Fünfecken zu erkennen. Aus dem Ikosaeder-eckpunkt I2, dem Dodekaederpunkt D1 und dem auf die Kugeloberfläche projizierten Punkt DI-1' wird das sogenannte charakteristische Dreieck gebildet. Diese Teilfläche ist bei einer DI-Struktur die kleinste gemeinsame Symmetrieregion. Im Englischen wird das charakteristische Dreieck deshalb auch LCD-Triangle (Lowest Common Denominator) genannt. Nach dieser Methode kann man die Kugeloberfläche in 120 nicht weiter teilbare symmetrische Regionen zerlegen.

Im charakteristischen Dreieck wird nun das eigentliche Oberflächennetz festgelegt, wobei ein Dreiecksnetz als Basis für das Sechsecknetz dient. Mittels Spiegelungen und Drehungen wird aus dem charakteristischen Basisnetz die fertige Oberfläche generiert. Das gleiche Vorgehen wird für das innere Netz durchgeführt, wobei die Eckpunkte der Inneren Struktur konzentrisch unter

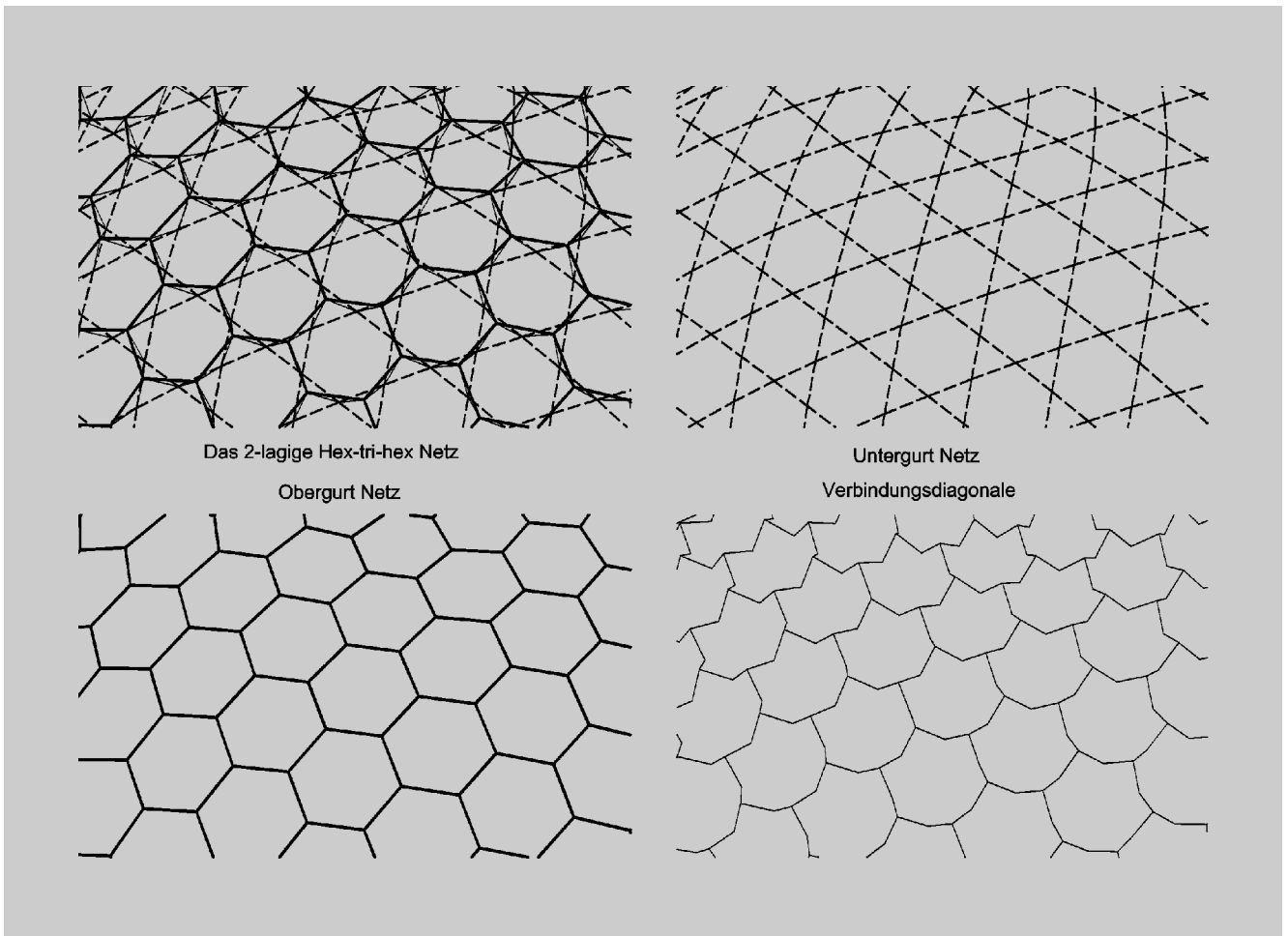


**Bild 8.** Grundlagen zur Generierung der Tragstruktur  
**Fig. 8.** Basics for the generation of the structure

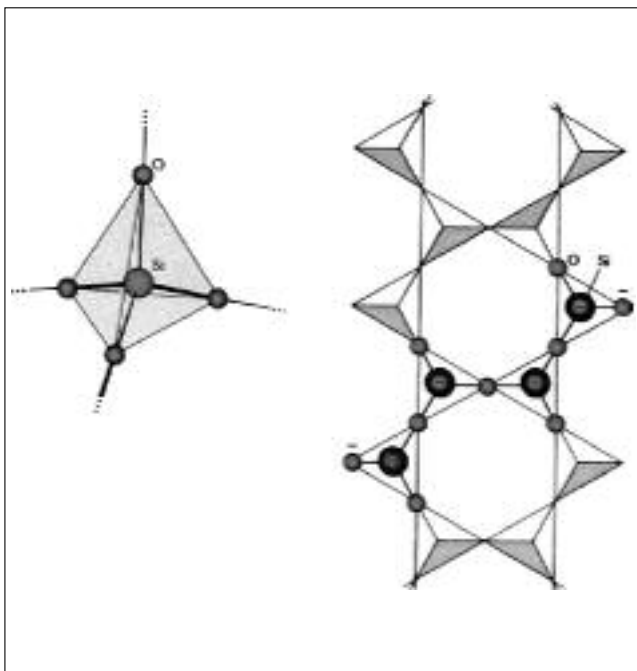
dem Mittelpunkt eines Außenstabes liegen. Die beiden Lagen werden schließlich noch mit Diagonalen zu einem räumlichen Stabwerk verbunden.

Das daraus resultierende räumliche Gitternetz ähnelt stark dem natürlichen molekularen Aufbau bestimmter Mineralien (Bild 10), wie z. B. dem der Silikate ( $\text{SiO}_4$ ). Diese Gitternetzstrukturen besitzen unter anderem die Eigenschaften minimaler Energiewege bei einem effizienten Materialverbrauch.

Mit diesem geometrischen Aufbau konnte ein wirtschaftliches und optisch ansprechendes Tragwerk generiert werden (Bild 11).



**Bild 9.** Komponenten der Hex-Tri-Hex-Tragstruktur  
**Fig. 9.** Components of the Hex-Tri-Hex structure



**Bild 10.** Silikatkristall als natürliches Vorbild für die Eden-Tragstruktur  
**Fig. 10.** Silicate crystal as a natural example for the Eden structure



**Bild 11.** Ansicht der Hex-Tri-Hex-Struktur ; Obergurt – Diagonale – Untergurt  
**Fig. 11.** View of the Hex-Tri-Hex structure; top chord – diagonals – bottom chord

#### 4.3 Ebenheit der Flächen

Ohne weitere Maßnahmen liegen die sechs Eckpunkte eines Hexagons nicht in einer Ebene. Das geplante Folieneindeckungssystem verlangte jedoch möglichst ebene Flächen, um die Faltenbildung zu vermeiden. Aus den Arbeiten von *Emde* [2], *Fuller* [3] und *Pavlov* [4]

wurde ein spezieller Algorithmus entwickelt, welcher eine maximale Ebenheit der sechseckigen Flächen bei gegebenen tolerablen Abweichungen lieferte.

Tolerabel bedeutet hier, daß die Abweichungen von der Ebenheit innerhalb einer Fläche bei maximal 60 mm liegen durften. Eine weitere Reduzierung der Unebenheit hätte zur Folge, daß die Homogenität, d. h. die Gleichheit der Stablängen, verschlechtert würde, was wiederum die Optik der Struktur negativ verändert hätte. Das Verhältnis der längsten zur kürzesten Stablänge innerhalb eines Oberflächennetzes bezeichnet man als Homogenitätsquotient.

Beim Eden-Projekt beträgt dieser Faktor 1,26. Wollte man die Sechsecke perfekt eben haben, so hätte dies einen Homogenitätsquotienten von zwei zur Folge, d. h., die Stablängen unterscheiden sich um das Doppelte, was architektonisch und statisch nicht akzeptabel ist.

#### 4.4 Ausführungsgeometrie

Mit der beschriebenen Methode wurden zunächst die einzelnen Kuppeln generiert. Die beiden Kuppeln B und G haben bei einer mittleren Stablänge von etwa 5,20 m die flächenmäßig größten Sechsecke. Die Einteilung der Kuppeln A, C, F und H ist ebenfalls gleich bei einer mittleren Stablänge von 4,10 m. Die beiden kleinsten Kuppeln D und E sind mit Stablängen von 3,50 m bzw. 2,60 m unterschiedlich eingeteilt. Die Stablänge resultiert aus der Teilung der Kuppel. Die drei großen Kuppeln A, B und C wurden mit einer 15er Teilung ausgeführt, die restlichen kleineren Kuppeln mit einer 9er Teilung (Tabelle 1).

Die Kuppeln wurden auf die vom Architekten vorgegebenen Mittelpunkte gelegt. Da diese Kugelmittelpunkte geometrisch alle auf einer Höhe liegen, stehen die sich ergebenden Verschnidungskreise vertikal. Aus den Verschnidungskreisen der äußeren und inneren Lage wurde anschließend ein Bogenträger generiert. Neben der geometrischen Verbindung zweier Kuppeln dienen diese Träger als Randversteifung der Kuppelschalen. Die Bogenträger sind geometrisch vollkommen in das Tragwerk integriert und ersetzen die ursprünglich vorgesehenen Spannbetonträger.

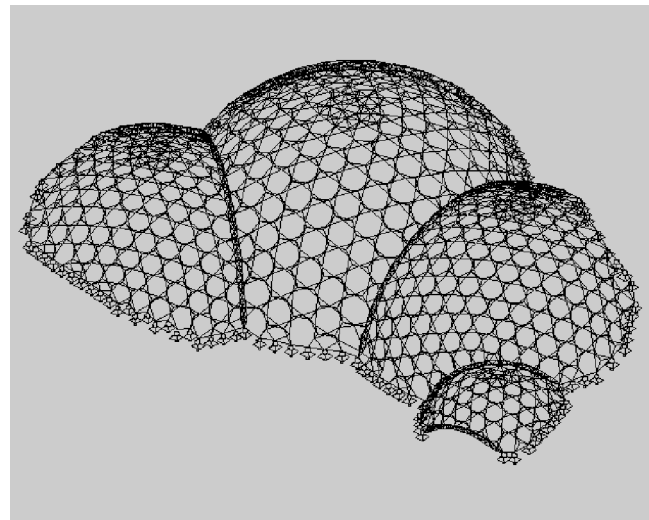
## 5 Berechnung und Konstruktion des Stahltragwerks

### 5.1 Berechnung

Nach Erarbeitung und Optimierung der Geometrie und Abstimmung mit den Architekten und den Ingenieuren erfolgte die komplette statische Berechnung der Stahlkonstruktion. Dazu wurde die zuvor generierte Struktur in das räumliche Rechenprogramm RSTAB5 [6] übernommen und damit das gesamte Stahltragwerk nach Theorie II. Ordnung berechnet (Bild 12).

Die Obergurtstäbe und die Stäbe der Bogenträger im Verschnittbereich der Kuppeln wurden als Biegestäbe, die Untergurtlage und die Diagonalen als Fachwerkstäbe modelliert (Bild 13).

Die Lastangaben und die Zusammenstellung der Lastfallkombinationen erfolgte nach den britischen Vorschriften BS 5950. Aufgrund des milden Klimas in Cornwall beträgt die anzunehmende Schneelast nur 0,3 kN/m<sup>2</sup>. Die bei BMF Fluid Mechanics Ltd. in London durchgeführten Windkanaluntersuchungen ha-



**Bild 12.** Das räumliche Gesamtmodell für die Berechnung der HTBiomes (7545 Elemente und 2525 Knoten)

**Fig. 12.** The calculation Model for the HTBiomes (7545 Elements and 2525 nodes)

**Tabelle 1.** Die wesentlichen geometrischen Parameter

**Table 1.** Main geometric parameters

Kuppel	Teilung	Durchmesser [m]	mittlere Obergurtlänge [m]	Bauhöhe [m]	Oberfläche [m <sup>2</sup> ]	Anzahl der Kissen		
						6	5	3 Ecke
A	15	100	4,10	1,6	4478	103	1	30
B	15	125	5,20	2,0	9091	137	1	30
C	15	100	4,10	1,6	5518	128	2	30
D	9	50	3,50	1,3	1273	42	1	18
<b>Summe</b>					<b>20360</b>			
E	9	38	2,60	1,0	691	40	2	30
F	9	56	4,10	1,5	2195	60	3	30
G	9	75	5,20	2,0	4525	68	3	30
H	9	56	4,10	1,5	1750	47	3	30
<b>Summe</b>					<b>9161</b>			



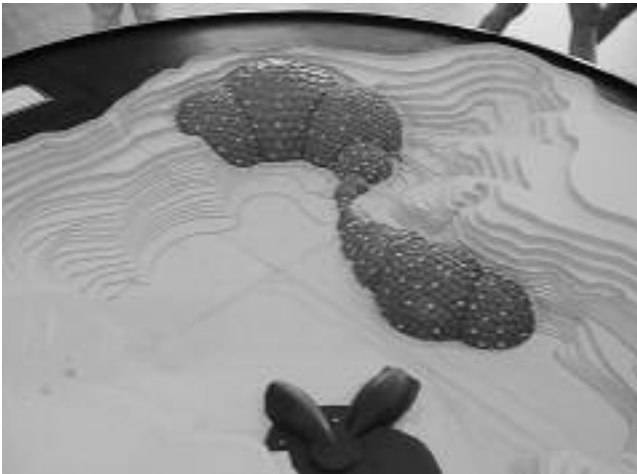


Bild 13. Windkanalmodell

Fig. 13. Model for the wind tunnel test

ben ergeben, daß aufgrund der besonderen Lage des Bauwerks innerhalb einer offenen Mulde auch die Windlast relativ gering ist und daß der Wind hauptsächlich als Sog angreift.

Neben den üblichen Lastfällen mußten auch einige Sonderlastfälle untersucht werden. Im Bereich der Rinnen zwischen jeweils zwei Kuppeln können sich Schneeanhäufungen bilden. Aus diesem Ansatz resultiert eine anzunehmende maximale Schneesacklast von bis zu  $1,2 \text{ kN/m}^2$  im Bereich der Verbindungsbögen. Einige Kissen im Bereich der Rinne mußten infolge dieser hohen Schneelast mit einem zusätzlichen Seilnetz an der Unterseite unterstützt werden.

Ebenso wurde der Fall eines Luftkissenversagens als Lastfall näher betrachtet. Hierzu wurde angenommen, daß in einem Luftkissen der Innendruck abfällt und das Kissen damit schlaff wird. Bei einem gleichzeitigen Regen füllt sich diese schlaffe Folie zu einem Wassersack. Aufgrund der Größe der Kissen kann es im Extremfall zu einer Wasserlast innerhalb eines Feldes von über 25 t kommen, wodurch die Stahlstruktur lokal hoch belastet wird. Mittels Computerberechnung wurde auch nachgewiesen, daß im Falle eines lokalen Versagens einzelner Stäbe oder Knoten das Tragwerk noch ausreichend standsicher ist.

Temperaturschwankungen sind für Kuppelbauwerke in der Regel nicht maßgebend für die Spannungsbemessung, da sich die Struktur in radialer Richtung nahezu ungehindert ausdehnen kann. Ebenso erzeugen Lager-setzungen keine signifikanten Kräfte. Die Kuppeln des Eden-Projektes wurden daher ohne Dehnfugen gebaut.

## 5.2 Bemessung

Die Bemessung ergab für die **Obergurte** Stahlrohre mit einem Durchmesser von  $d = 193,7 \text{ mm}$ . Aus konstruktiven Gründen wurden alle Obergurtröhre mit demselben Durchmesser ausgeführt, dadurch konnte der Anschluß an die Napfknoten gleich ausgeführt werden. Entsprechend den Stablängen wurden die Wanddicken der Rohre im Bereich zwischen 5 und 8 mm variiert. Einzelne höher beanspruchte Stäbe am Rand wurden mit bis zu 20 mm Wanddicken ausgeführt.

Tabelle 2. Die wesentlichen Stahlquerschnitte

Table 2. The main steel cross-sections

Bezeichnung	Querschnitt [mm]	Material
Obergurt	$193,7 \times 5/8/20$	St 44 und St 52
Diagonalen und Untergurtlage (Merostäbe)	$76,1 \times 2,9$ bis $159,0 \times 4$ $168,3 \times 8$	St 37 und St 52
Lagerkonstruktion	$193,7 \times 10/20$	St 52
Bogenträger		
Obergurt	$219,1 \times 10/20$	St 52
Untergurt	$159,0 \times 5/8$	St 52
Diagonalen	$101,6 \times 5$	St 52
Lüftungsklappen Unterkonstruktion	$140,0 \times 70$	St 52

Die **Untergurte** und **Diagonalen** sind klassische MERO-Fachwerkstäbe mit für die Kraft und Knicklänge optimierten Durchmesser im Bereich von 76,1 bis 168,3 mm. In Anlehnung an die Britische Stahlbaunorm wurde die Schlankheit der Stäbe auf 180 begrenzt.

Für die **Bogenträger** ergab die Bemessung Stabquerschnitte von 219,1 mm für den Obergurt, 159 mm für die zwei Untergurte und 101,6 mm für die Diagonalen und Streben. Maßgebend für die Spannungsbemessung war in der Regel der Lastfall Schnee bzw. Schneesackbildung im Rinnenbereich (Tabelle 2).

## 5.3 Der Napfknoten im Obergurt

Die wesentlichen Anforderungen an den Obergurtnoten waren:

- biegesteife Verbindung von drei Rohren mit  $d = 193 \text{ mm}$
- gelenkiger Anschluß von drei Diagonalstäben
- Anschluß für ein Montageseil an der Außenseite
- leichte und schnelle Montierbarkeit
- hohe Paßgenauigkeit
- Realisierung der Flächenwinkel
- keine Baustellenschweißung
- architektonisch akzeptables Aussehen.

Aus der Summe der Forderungen wurde als optimale und wirtschaftliche Lösung ein Napfknoten als Verbindungselement gewählt (Bild 14).

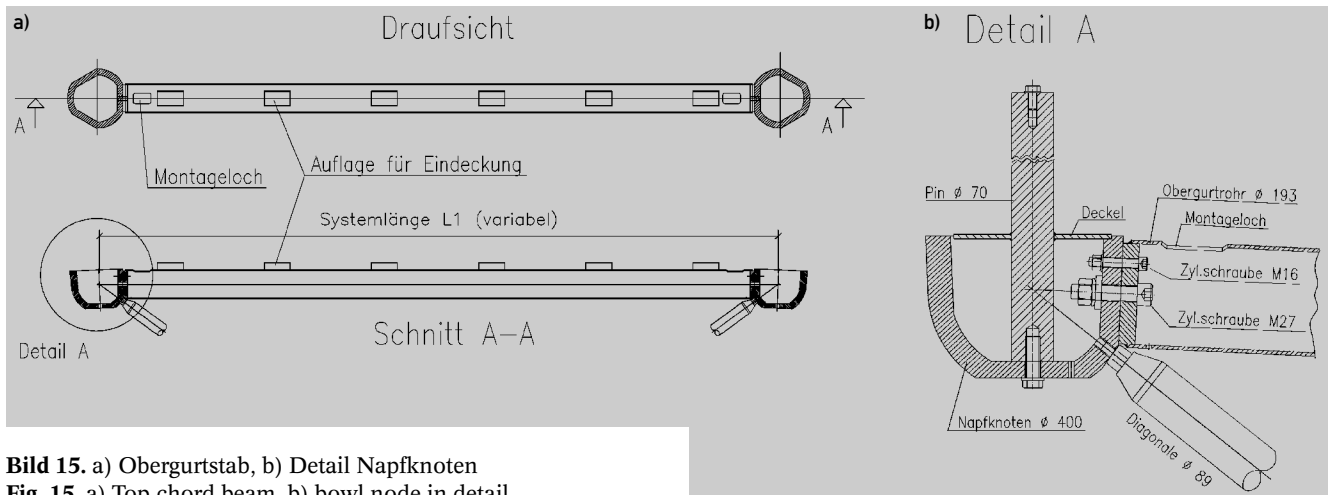
Bei diesem Knotentyp handelt es sich um eine Verbindungsart, welche von MERO eingesetzt wird, wenn ein formschlüssiger Schraubanschluß von Rechteck- oder Rundrohrprofilen erforderlich ist. Er hat außerdem den Vorteil, daß die Aluminiumrahmen der Folienkissen direkt auf den Obergurtröhren verlegt werden konnten, da im Knotenbereich keine störenden Konstruktionsteile vorhanden sind.

Der etwa 80 kg schwere Rohling für die 1100 Napfknoten wurde aus Gußeisen GGG 40 hergestellt. Der Durchmesser beträgt etwa 400 mm bei einer Wanddicke von 40 mm. Die Rohlinge wurden anhand der 3D-CAD-Vorgaben im Werk CNC-gesteuert gefräst und gebohrt. Die erforderliche hohe Genauigkeit für die Realisierung der Kugeloberflächen wurden somit in den Knoten gelegt.



**Bild 14.** Napfknoten im Obergurt, a) mit den Obergurtrohren, b) den Diagonalen, c) mit dem Pin für die Befestigung eines Zugangssystemes

**Fig. 14.** Top chord bowl node, a) connecting the top chord beams, b) diagonals, c) the fastening pin



**Bild 15.** a) Obergurtstab, b) Detail Napfknoten  
**Fig. 15.** a) Top chord beam, b) bowl node in detail

Als Ergänzung zur FE-Berechnung der Napfknoten wurden an der Versuchsanstalt der TH Karlsruhe Versuche an Originalknoten durchgeführt, wodurch die Tragfähigkeit dieser Knotenverbindung bestätigt wurde.

#### 5.4 Obergurtstäbe

Durch die Realisierung der Flächenwinkel in den Obergurtknoten konnten die Obergurtstäbe (Bild 15a) an beiden Enden rechtwinklig abgetrennt werden. An den Enden wurde eine Kopfplatte eingeschweißt und jeweils ein Montageloch angebracht. Durch dieses Handloch wurde bei der Montage der Bolzen eingeführt. Es liegt auf der Staboberseite und ist somit nach dem Einbau nicht mehr sichtbar (Bild 14b). Als Verbindungsbolzen dienen voll vorgespannte HV-Schrauben M27 bzw. M36. Eine zusätzliche Schraube M16 (Bilder 14c und 15b) fixiert den Obergurtstab in der richtigen Lage und dient auch als Verdrehsicherung für den Fall einer einseitigen Kissenbelastung, welche den Obergurtstab auf Torsion belastet. Auf dem Obergurtstab wurden im Abstand von etwa 1 m kurze U-Profile als Auflagerpunkte für die Aluminiumrahmen der Eindeckung aufgeschweißt.

#### 5.5 Untergurt und Diagonalen

Die Bemessung der Diagonalen und der Untergurtstäbe erfolgte mit dem von MERO entwickelten Programm zur Berechnung, Bemessung und Fertigung der MERO-Fachwerkstäbe auf Grundlage der Zulassung der MERO-Bauart [7]. Hierzu wurden die Geometrie sowie die Berech-

nungsergebnisse aus dem Rechenprogramm RSTAB mit Hilfe einer Schnittstelle ins MERO-Programm übertragen. Die geänderten Querschnitte wurden anschließend wieder zurück nach RSTAB übertragen und damit ein erneuter Berechnungslauf durchgeführt.

Die Verbindung der Untergurte und Diagonalen erfolgte über geschmiedete Kugelnknoten (Bild 16) aus C45. Ihre Größe ergibt sich vorrangig aus der Größe und den Winkeln der anschließenden Stäbe. Das Nachweiskonzept wurde in [8] beschrieben.



**Bild 16.** Klassischer MERO-Knoten als Untergurtknoten  
**Fig. 16.** Classic MERO node for the bottom nodes

### 5.6 Bogenträger

Entlang den Verschneidungslinien der Kuppeln wurden Bogenträger angeordnet. Diese Bogenträger sind als dreigurtige Fachwerke (Bild 17) ausgeführt und haben eine

Spannweite von zum Teil über 100 m. Die gebogenen Obergurtrohre ( $d = 219 \text{ mm}$ ) liegen in den Verschneidungslinien der Kuppeloberflächen. Die gebogenen Untergurtrohre ( $d = 159 \text{ mm}$ ) liegen in den Untergurtflächen der anschließenden Kuppeln. Mit Streben und Diagonalen ( $d = 101 \text{ mm}$ ) wurden diese zu Fachwerkträgern tragfähig verbunden (Bild 18). Die Träger wurden als Schweißkonstruktion stückweise im Werk gefertigt und mit Montageschweißstößen auf der Baustelle zusammengesetzt. Die Träger sind gelenkig auf verstärkten Fundamentblöcken aufgelagert.

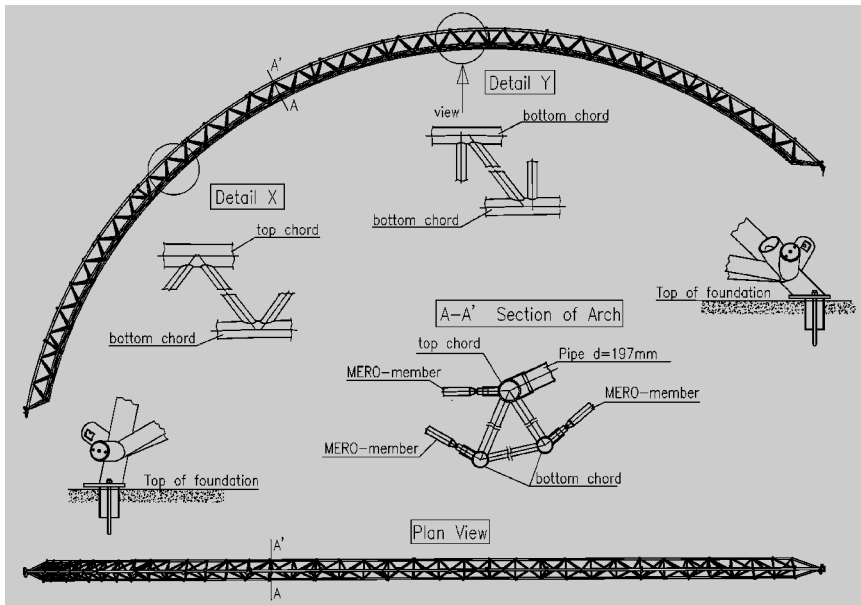
Direkt auf den Obergurtrohren der Bögen wurden auch die Haltearme aus Stahlblech ( $t = 10 \text{ mm}$ ) für die Rinnenkonstruktion angebracht. Die Stahlrohre der Kuppeln wurden über kurze Schiebehülsen abgeschlossen und verschweißt.

### 5.7 Auflager

Eine Herausforderung war die Konstruktion der Lagerung. Aufgrund der unregelmäßigen Geländegeometrie (Bild 19) ist jeder der 187 Auflagerpunkte entlang der über 800 m langen Fundamente geometrisch unterschiedlich.

Die Lagerkonstruktion besteht aus einem Rohrkreuz und einer Fußplatte mit Schubknagge (Bild 20). Je nach Lage schließen ein oder zwei Obergurtstäbe sowie die umlaufenden Randstäbe an. Alle Anschlüsse sind vorgespannte Schraubanschlüsse mit eingeschweißter Kopfplatte. Ebenso werden die Untergurtstäbe an diese Lagerkonstruktion angeschraubt.

Für die teilweise vorhandenen abhebenden Lasten im Lastfall Windsog sind jeweils zwei Ankerbolzen M27 bzw. M36 angeordnet. Die Schubkräfte werden mit Schubknaggen in den Beton eingeleitet.



**Bild 17.** Der Dreigurtbogenbinder zwischen den Kuppeln  
**Fig. 17.** The triangular arch between the domes



**Bild 18.** Blick in den Bogenbinder  
**Fig. 18.** View of the arch



**Bild 19.** Verlauf der Fundamente entlang des Geländes  
**Fig. 19.** Foundation line along the ground profile



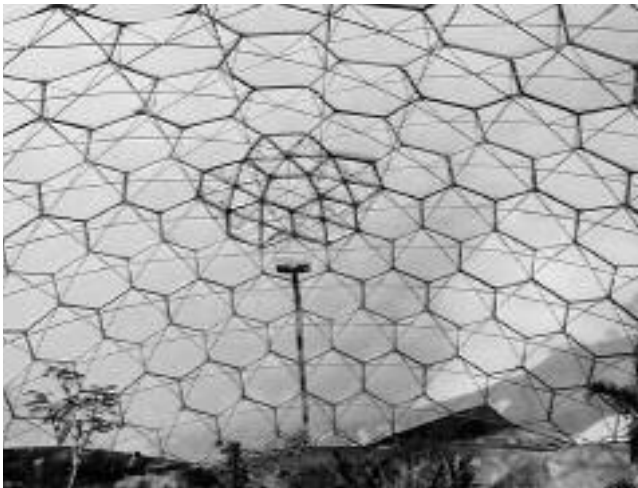
**Bild 20.** Ansicht eines typischen Lagerpunktes  
**Fig. 20.** View of a typical support point

## 5.8 Belüftung und Türen

Das für die Pflanzen notwendige subtropische und warme Klima erfordert einen besonderen Be- und Entlüftungsmechanismus. Die erforderlichen aerodynamischen Querschnitte für Zu- und Abluft wurden durch Ove Arup and Partners London mittels thermodynamischer Versuchsmodelle ermittelt.

Im obersten Punkt einer jeden Kuppel wurden Entlüftungsklappen angeordnet. In die fünf um das im Zenith befindliche Fünfeck liegenden Sechsecke wurden jeweils sechs dreiecksförmige Klappen eingebaut (Bild 21). Damit besitzt jede Kuppel 30 ferngesteuerte Lüftungsklappen, welche auch mit ETFE-Folienkissen eingedeckt sind. Als Unterbau für die Klappen wurde das jeweilige Sechseck mit einer sekundären Stahlkonstruktion bestehend aus Rechteckhohlprofilen  $140 \times 70$  versehen.

Die Zuluft erfolgt über in den Randbereichen der Kuppeln angeordnete Glaslamellen (Bild 22). Jede Kuppel kann mit Warmluftgebläsen beheizt werden. In den Kuppeln sind außerdem mehrere Türen angeordnet, welche jedoch nur als Wartungs- bzw. Notausgang dienen.



**Bild 21.** Ansicht der Struktur, der Lüftungsklappen und der Wartungsstege

**Fig. 21.** View of the structure, vents and catwalks



**Bild 22.** Glaslamellenfelder und Warmluftzufuhr

**Fig. 22.** Glass windows and warm air inlet

Der planmäßige Zugang der Besucher führt über das in der Mitte befindliche Zugangsgebäude. Zur Wartung der oberen Lüftungsklappen sind jeweils Zugangsstege und eine obere Plattform (Bild 21) eingebaut, welche an den Obergurtstäben angehängt wurden.

## 6 Fertigung und Korrosionsschutz

Die Fertigung der Stahlstruktur erfolgte größtenteils im MERO-Werk in der Nähe von Würzburg. Lediglich die Dreigurtbinder und die Auflagerknoten wurden fremd gefertigt. Die Fertigung der MERO-Stäbe und -Knoten sowie der Napfknoten erfolgte vollautomatisch auf computergesteuerten Bearbeitungsautomaten. Die Kopfplatten der Obergurtstäbe sowie die U-Profile für die Lagerung der Kissen wurden per Hand geschweißt.

Jeder Stab und jeder Knoten trägt eine eindeutige Teile-Nummer, die vom Programm vergeben wird und auch in den Montagezeichnungen erscheint.

Als Korrosionsschutz war ursprünglich Feuerverzinkung mit anschließender Beschichtung vorgesehen. Aus Kostengründen hat der Auftraggeber schließlich auf die Beschichtung verzichtet, so daß die Konstruktion, wie im Gewächshausbau üblich, nur feuerverzinkt wurde. Die Segmente der Bogenträger mußten aufgrund ihrer Abmessungen eigens in eine Verzinkerei in Frankreich gebracht werden, die über eines der breitesten Zinkbäder Europas verfügt; die übrigen Teile wurden in einer deutschen Verzinkerei verzinkt.

Die Obergurtknoten aus Gußeisen GGG 40 wurden flammstanzverzinkt und beschichtet, die geschmiedeten Untergurtknoten galvanisch verzinkt und beschichtet. Unter Einhaltung eines zweijährigen Inspektionsintervalls ist die Tragstruktur für eine wartungsfreie Zeit von 30 Jahren ausgelegt.

## 7 Eindeckung

Die Eindeckung der über 800 Einzelflächen erfolgte mit luftgefüllten Folienkissen aus dem transparenten Fluor Kunststoff ETFE (Ethyl-Tetrafluorethylen). Zur Herstellung der Kissen werden die Folien mit einer Dicke zwischen  $50 \mu\text{m}$  und  $200 \mu\text{m}$ , die in Einzelbahnen von etwa 1,50 m Breite geliefert werden, zunächst zu Flächen und dann zu Eindeckungselementen verschweißt. Das Regelkissen besteht aus Ober-, Unter- und Mittelfolie. Dabei übernehmen die Ober- und Unterfolie die statische Funktion, die Mittelfolie dient der Verbesserung der Wärmedämmung durch Trennung des Kisseninnenraumes in zwei Luftkammern. Neben diesen dreilagigen Kissen kamen aufgrund der hohen Soglasten teilweise vierlagige Kissen mit zwei Oberfolien zum Einsatz.

Bei der Montage werden die Folienkissen in Aluminiumrahmen montiert, die auf die Sechsecke des Stahltragwerkes aufgeschraubt sind (Bild 23a). Jedes einzelne Eindeckungselement erhält über ein Luftversorgungssystem (Bild 23b) einen ständigen relativ geringen Überdruck von etwa 300 Pa, der dazu führt, daß das Kissen zu ca. 10 bis 15 % seiner Spannweite „aufgeblasen“ wird (Bild 23c). Zu diesem Zweck sind an der dem Publikum nicht zugänglichen Rückseite der Kuppeln redundant ausgeführte Luftversorgungseinheiten angeordnet.



**Bild 23.** Luftkissen, a) Montage durch Abseilpersonal, b) Anschluß der Luftzufuhr, c) Montage  
**Fig. 23.** Cushion; a) Installation by Abseilers, b) air input connection, c) installation

Die Erfahrungen mit diesem Eindeckungssystem reichen ca. 20 Jahre zurück. Es handelt sich um eine extrem leichte, in hohem Maße transparente und UVlichtdurchlässige Eindeckung. Die Folien haben eine hohe Oberflächenspannung und sind extrem glatt, was zu einem Selbstreinigungseffekt führt, d. h., Schmutz auf der Außenseite wird durch den Regen abgewaschen.

Die vorhandenen baupraktischen Erfahrungen beziehen sich auf kleinere Einzelelemente, als sie für das Eden-Projekt erforderlich wurden. Deshalb wurde zunächst zusammen mit den Beratern des Bauherrn, Ove Arup and Partners London und dem Folienverarbeiter Foiltec GmbH Bremen [9] ein umfangreiches Testprogramm entwickelt und durchgeführt. Die Ergebnisse dieser teilweise an 1:1-Modellen durchgeführten Tests und die damit einhergehenden Optimierungen haben zur Festlegung wichtiger Konstruktionsparameter für das Eden-Projekt geführt. So konnten die bislang üblichen freien Spannweiten der Elemente von ca. 3,5 m auf knapp 11 m ausgedehnt werden und Sonderlastfälle wie beispielsweise Schneesackbildung im Verschneidungsbereich der Kuppeln Eingang in die Konstruktion finden. Schließlich wurde jedes einzelne der über 800 Eindeckungselemente separat berechnet, konfektioniert und gefertigt.

In den Verschneidungsbereichen der Kuppeln, also im Bereich der Bogenträger, sind Rinnen aus Aluminiumblechen mit Dämmung und oberseitiger Folieneindich-

tung angeordnet, die das Oberflächenwasser der Dachfläche kontrolliert ableiten. Dieses Wasser wird gespeichert und zur Bewässerung der Pflanzen verwendet.

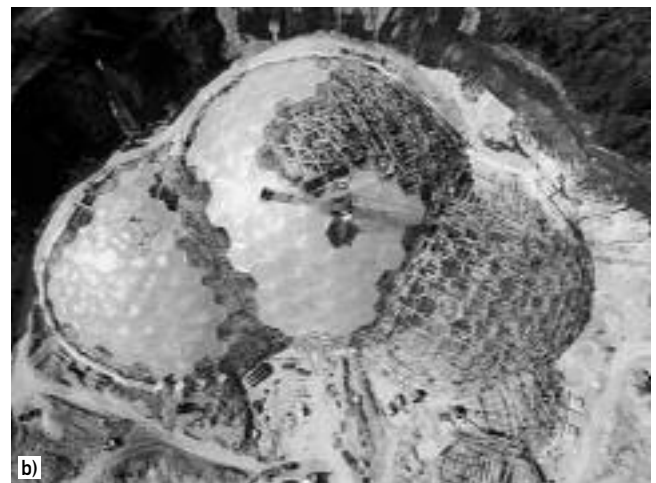
Die gesamte Dachfläche kann zu Wartungs- und Reparaturzwecken über ein fallweise anzubringendes Seilsicherungssystem begangen werden. Hierzu verfügt jeder Napfknoten des Obergurtes über einen die Dachhaut durchdringenden Anseilpunkt.

### 8 Montage

Die Montage des Stahltragwerkes der Kuppeln begann im November 1999. Vorausgegangen waren umfangreiche Erdarbeiten und der Bau der 858 m langen Fundamente, die aus 2 m breiten, 1,5 m hohen Pfahlkopfbalken bestehen, deren Betonpfähle bis zu 12 m tief in das Erdreich einbinden.

Zur Montage der Stahlkonstruktion wurde ein Raumgerüst errichtet, das als größtes freistehendes Gerüst der Welt Eingang in das Guinness-Buch der Rekorde fand.

Dieses Gerüst diente einerseits als Zugang und Arbeitsplattform für das Montagepersonal, andererseits als vorübergehende Stützkonstruktion für das Tragwerk während der Montage. Die Sechsecke wurden in Einzelementen aus halben Sechsecken mit Ober- und Untergurt einschließlich der Aluminiumprofile für die Aufnahme der Eindeckung am Boden vormontiert, mit Kränen eingehoben (Bild 24) und verschraubt. Die Bogenbinder



**Bild 24.** Montage der a) Kuppel A, b) HTB-Kuppeln

**14 Fig. 24.** Erection of a) dome A, b) HTB Biomes

kamen in vorgefertigten Teilen mit Transportlängen von ca. 13 m zur Baustelle, wurden auf dem Gerüst komplett vormontiert und verschweißt.

Nach erfolgter Montage des Tragwerks wurde das Gerüst wieder abgebaut. Die darauffolgende Montage der Folienkissen erfolgte ohne Gerüst mit der sogenannten „Abseiltechnik“ durch entsprechend ausgebildetes Montagepersonal wie man sie auch von anderen Baustellen, z. B. Millennium Dome in London oder Sony Center in Berlin, kennt.

Die Montage der Eindeckung ohne störendes Gerüst war ein wesentlicher Punkt für den Generalunternehmer, um den Zeitplan des Projektes einzuhalten. So konnten die Erdarbeiten und die notwendigen Vorarbeiten für die Pflanzung parallel zur Eindeckungsmontage erfolgen.

Die gesamte Montage des Stahltragwerks und der ca. 30 000 m<sup>2</sup> Dachfläche konnte rechtzeitig im September 2000 soweit abgeschlossen werden, daß der notwendige Schutz und die Wärme für die anschließende Bepflanzung im Inneren vorhanden waren.

Das Eden-Projekt öffnete pünktlich im März 2001 seine Tore für die Öffentlichkeit (Bild 25).

## 9 Bauwerksdaten

Gesamte Oberfläche	ca. 30 000 m <sup>2</sup>
Gesamtgewicht der Stahlkonstruktion	700 t
Stahlgewicht pro Dachfläche	25 kg/m <sup>2</sup>
Größte Sechsecksfläche	80 m <sup>2</sup> bei etwa 11 m Spannweite
Größter Kuppeldurchmesser	125 m
Stützenfrei überdachte Fläche	15 590 m <sup>2</sup> WTB und 6 540 m <sup>2</sup> für HTB

### Am Bau Beteiligte:

Architekt:

Nicholas Grimshaw & Partners Ltd, London  
www.ngrimshaw.co.uk

Ingenieurplanung:

Anthony Hunt Associates, Cirencester  
www.anthonyhuntassociates.co.uk

Bauphysik:

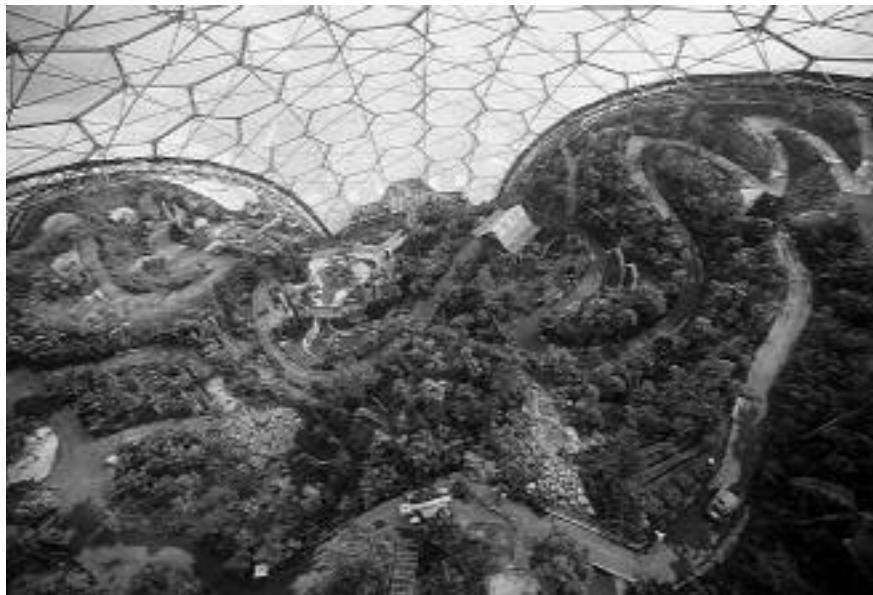
Ove Arup & Partners, London  
www.arup.com

Windkanal:

BMT Fluid Mechanics Limited London  
www.bmtfm.com

Generalunternehmer:

McAlpine JV  
www.sir-robert-mcalpine.com



**Bild 25.** Innenansicht der fertigen Struktur

**Fig. 25.** Internal view of the finished structure

Stahlbau:

MERO GmbH & Co. KG, Würzburg  
www.mero.de

Korrosionsschutz in Deutschland:

Wiegel Nürnberg Feuerverzinkerei GmbH & Co. KG  
www.wiegel.de

Eindeckung:

Foiltec GmbH, Bremen  
www.foiltec.de

### Literatur

- [1] Jones, A. C.: Civil and Structure Design of the Eden Project. International Symposium on Widespan Enclosures at the University of Bath, 26–28 April 2000.
- [2] Emde, H.: Geometrie der Knoten-Stab-Tragwerke. Veröffentlichung des Strukturforchungszentrums Würzburg 1978.
- [3] Fuller, R. B.: In: The Dome Builder's Handbook: Edited by John Prentis. Running Press Philadelphia Pennsylvania 1973.
- [4] Pavlov, G. N.: Determination of Parameters of Crystal Latticed Surfaces Composed of Hexagonal Plane Facets. Int. Journal of Space Structures, Vol. 5 Nos 3 & 4, 1990 Multi-Science Publishing.
- [5] Klimke, H.: Entwurfsoptimierung räumlicher Stabstrukturen durch CAD-Einsatz. Bauingenieur 61 (1986), S. 481–489.
- [6] RSTAB 5: Ingenieursoftware Dlubal GmbH, www.rstab.de
- [7] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung der MERO-Bauart Z-14.4-10, erteilt vom DIBT Berlin.
- [8] Klimke, H.: Entwicklung einer Anschlußtechnik. In: Festschrift Joachim Lindner, hrsgn. v. D. Bamm, S. 251–258, Technische Universität Berlin.
- [9] Lehnert, S.: Das Eden Projekt. Intelligente Architektur, Ausgabe Nov./Dez. 2000.

### Autoren dieses Beitrages:

Dr.-Ing. Klaus Knebel, Leitung Statik, Dr.-Ing. Jaime Sanchez, Geometrieoptimierung, Dipl.-Ing. Stefan Zimmermann, Projektleitung, MERO GmbH & Co. KG, Max-Mengeringhausen-Straße 5, 97084 Würzburg

Produktbereiche:

#### **Bausysteme**

- Raumfachwerke
- Glasbaukonstruktionen
- Membrankonstruktionen
- Airport-Technik

#### **Bodensysteme**

- Doppelboden
- Hohlraumboden
- Bodenbeläge
- Dienstleistungen

#### **Ausstellungs-Systeme**

- Meroform
  - Modulare Bausysteme
- Merolite
  - Präsentationssysteme

Titel: Eden Projekt, Cornwall/UK  
Arch.: Nicholas Grimshaw & Partners,  
London

MERO GmbH & Co. KG  
Max-Mengeringhausen-Str. 5  
D-97084 Würzburg  
Tel.: (09 31) 66 70-0  
Fax: (09 31) 66 70-554  
Internet: <http://www.mero.de>  
e-mail: [mero.germany@mero.de](mailto:mero.germany@mero.de)