Stuttgart 21, Formentwicklung und Modellierung der neuen Bahnhofshalle

Dipl.-Ing. Gerhard Seifried, Dipl.-Ing. Dieter Sandner, Dr.-Ing. Daniel Mok
Leonhardt, Andrä und Partner, Beratende Ingenieure VBI, GmbH, Stuttgart

Zusammenfassung:

Herzstück von Stuttgart 21 ist der neue tiefer gelegte Durchgangsbahnhof mit seinen charakteristischen Lichtaugen. Die Gleise werden um 90 Grad zum bestehenden Kopfbahnhof gedreht und liegen somit quer im Stuttgarter Talkessel. Diese tiefer gelegte Station wird als druckbeanspruchte Gewölbeschale aus Stahlbeton geplant, deren „grüner Deckel“ die Verbindung zu einem neuen Stadtteil auf den heutigen Gleisflächen herstellt. Die Formentwicklung dieser Schale, vom Seifenhautmodell über Kettenhängemodelle, digitale CAD-Modelle, bis hin zum diskreten FEM-Rechenmodell, wird in diesem Beitrag beschrieben. Systemgenerierung und Modellierung, spezielle Berechnungen und Ergebnisauswertungen werden erläutert.

1. Einleitung

Wer Stuttgart mit dem Zug erreicht, bekommt eine Vorstellung von der Größe der Visionen zu Anfang dieses Jahrhunderts. Weiträumig schneiden sich die Gleisanlagen in das enge Tal hinein. Der Kopfbahnhof empfängt den Besucher mit ausladender Geste. Die großen Empfangshallen zeugen vom Respekt gegenüber den Reisenden, wie auch vom Selbstbewusstsein zu Beginn des Jahrhunderts.

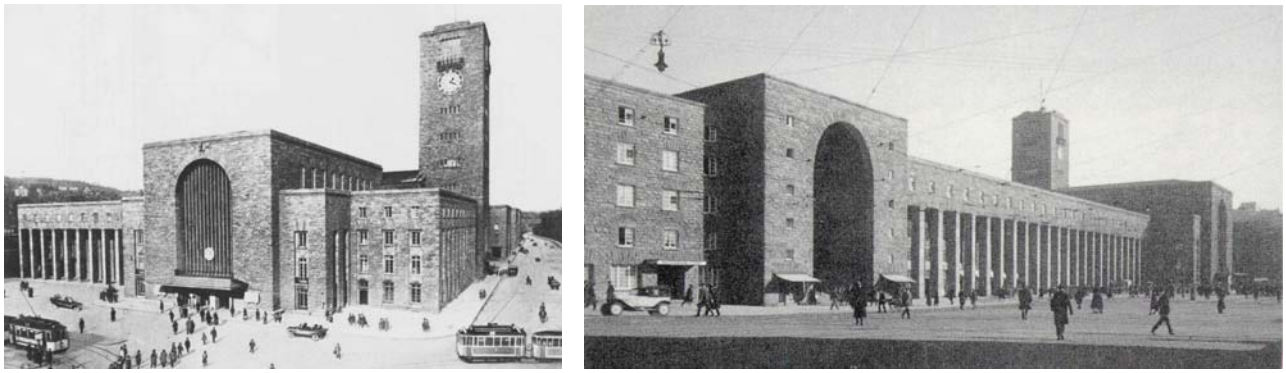


Bild 1: P. Bonatz, Hauptbahnhof Stuttgart um 1920 und um 1928

Im Bundesverkehrswegeplan von 1992 wurde der vordringliche Bedarf für den Aus- und Neubau der Strecke Stuttgart-Ulm innerhalb des Fern- und Regionalverkehrs im Kontext der europäischen Zentren Rotterdam-Rhein/Ruhr-Rhein/Main-Paris-München-Wien-Budapest beschrieben. Diese Strecke zählt zu den am höchsten belasteten Strecken bundesweit, die auf Grund der Prognosen über die Steigerung des Verkehrs ohne entsprechende Dimensionierung zu einem Engpass im europäischen Hochgeschwindigkeitsnetz werden wird. Der heutige Kopfbahnhof stellt für die künftige Entwicklung des Bahnknotens Stuttgart einen Engpass dar, zumal er das Fahrgastaufkommen kommender Jahre von bis zu 300.000 Reisenden pro Tag im Großraum Stuttgart mit seinen 3,4 Millionen Einwohnern nicht mehr bewältigt.

Achtzig Jahre nach Fertigstellung des zu seiner Zeit innovativen Verkehrsknotenpunktes bietet sich die Chance, eine neue Vision Wirklichkeit werden zu lassen: Die Rückgewinnung des Landschaftsraumes durch eine unterirdische Anbindung Stuttgarts an das europäische Hochgeschwindigkeitsnetz in Form eines quer zum Talkessel liegenden Durchgangsbahnhofs.

Das neue **Projekt „Stuttgart 21“** umfasst somit zum einen die Umstellung des Hauptbahnhofes von dem jetzigen 16-gleisigen Kopfbahnhof auf einen neuen 8-gleisigen Durchgangsbahnhof der um 90 Grad gedreht quer im Stuttgarter Talkessel liegt, zum anderen die weiterführende Streckenführung mittels eingleisiger Tunnelröhren, sowie die Entwicklung eines neuen Stadtviertels. Alle oberirdischen bisherigen Bahnanlagen im Stuttgarter Zentrum können abgebaut werden, die frei werdenden Flächen von ca. 100 Hektar stehen der Stadtentwicklung zur Verfügung.

Bild 2: Stuttgart 21, Neuer tief liegender Durchgangsbahnhof, Lage, Innenansicht einer Kelchstütze

Nach Festlegung des Verlaufes der Gleise in Grund- und Aufriss unter Berücksichtigung aller Kriterien, wie Mineralwasservorkommen im Untergrund, vorhandene S-Bahn, Straßen- und Stadtbahnführungen, Düker, Nesenbach und anderes mehr, erfolgte ein Architektenwettbewerb für das Herzstück des Projektes „Stuttgart 21“, den neuen Bahnhof.

Wettbewerbsgewinner war eine Arbeitsgemeinschaft unter Leitung des Architekturbüros Ingenhoven Overdiek aus Düsseldorf, deren Entwurf ein Betonschalendach mit kreisförmigen Lichtaugen zur natürlichen Belichtung der Bahnsteige vorsah [1]. Berater für den Formfindungsprozess war Professor Frei Otto, Warmbronn, ingenieurmäßig unterstützt von Happold Ingenieurbüro, Bath und im zweiten Teil der Wettbewerbsphase zusätzlich durch das Ingenieurbüro Leonhardt, Andrä und Partner, Stuttgart. Die neuen Gleise werden tiefer gelegt und verlaufen unter dem jetzigen Kopfbahnhof in einer 420 Meter langen, ca. 12 Meter hohen Bahnsteighalle. Das Schalendach bildet die Decke für einen Platz hinter dem bestehen bleibenden Bonatzgebäude sowie für eine begrünte Parklandschaft im Schlossgarten. Der so entstehende neue Platz bildet die Verbindung zum neuen Stadtteil. Erstrebt wird ein Minimum an Materialaufwand und Ressourcenverbrauch. Der Einbindung in das städtische Gefüge wird somit ebenso Rechnung getragen wie ökologischen Aspekten.

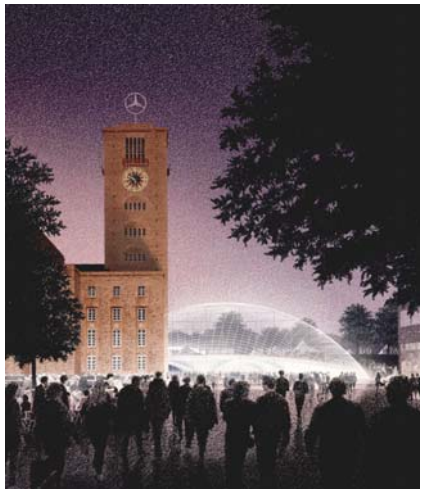


Bild 3: Stuttgart 21, Schnitt durch die neue Bahnhofshalle, Glasgitterschale Eingang Königstrasse

2. Entwurf – Formentwicklung

Die Idee einer unterirdischen Bahnhofshalle, welche die Grünanlagen des Schlossgartens nicht zerschneidet, führte zu der Entwurfsaufgabe, bei maximaler innerer lichter Höhe die erforderliche Konstruktion zu minimieren.

Bereits 1963 wurden am Stuttgarter Institut für leichte Flächentragwerke Versuche mit **Seifenhäuten** durchgeführt. In Seifenhaut-Membranen herrscht überall ein vollkommen isotroper, gleichmäßiger Zugspannungsverlauf – solche Flächen werden als „Minimalflächen“ bezeichnet. Bei diesen Versuchen wurde entdeckt, dass selbst eine singuläre Kraft in eine Membrane eingeleitet werden kann, ohne dass eine Spannungsspitze entsteht. Dies ist in Kombination mit einem Loch, dem „Auge“ möglich. Dieses Auge bildet sich aufgrund des gleichmäßigen Zugkraftverlaufes innerhalb der Membran als Schlaufenform aus.

Bild 4: Seilnetzmodell und Seifenhautmodell, Frei Otto Atelier Warmbronn

Schnell zeigte sich, dass es aufgrund der äußeren vorliegenden Randbedingungen sinnvoll ist, statt einer vorgespannten Seilnetzkonstruktion in Form eines zugbeanspruchten Hängedaches, eine **druckbeanspruchte Gewölbeschale** aus Stahlbeton einzusetzen. Hierzu musste die Seilnetzkonstruktion nur umgedreht werden. Diese Form wurde an zusätzlichen Modellen studiert, die im hängenden Zustand „eingefroren“ wurden. Nun war die Vision der neuen Bahnhofshalle sichtbar geworden.

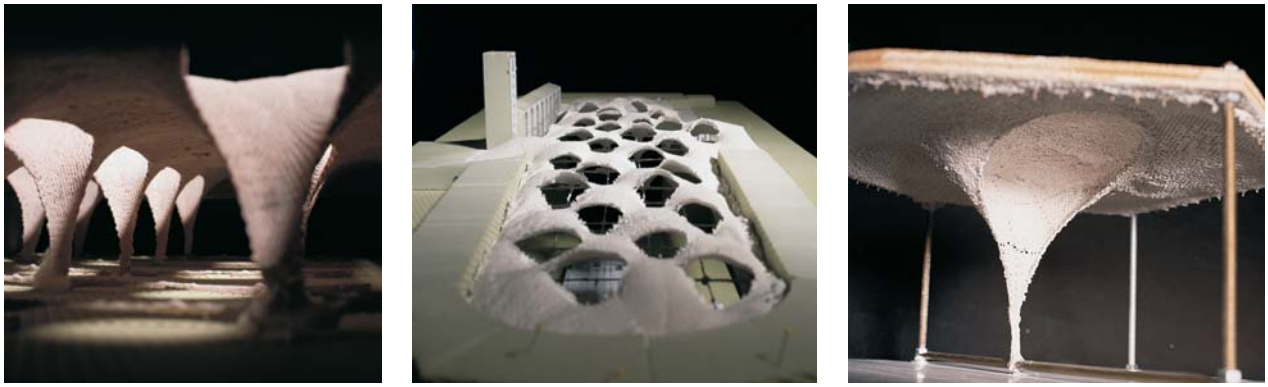


Bild 5: Arbeitsmodelle, Frei Otto Atelier Warmbronn

Aus dem schlaufenartigen Auge eines Seifenhautmodells entsteht bei einem Schalentragwerk ein trichterartiger Kelch mit „Lichtauge“, das typische Einzelelement, die **Kelchstütze**.

Ausgehend von dieser Kelchform war nunmehr ein zusammenhängendes Schalendach zu entwickeln, das, bei Einzelspannweiten von 36 Metern zwischen den Bahnsteigen, Höhen von 10 bis 12 Metern und einer Schalendicke von 35 cm, einen Raum von 420 mal 80 Metern überdeckt, welcher von umlaufenden Trogwänden begrenzt wird.

Die experimentelle Formentwicklung sowohl des Einzelelements – der Kelchstütze – als auch vieler, im **Kontinuum** zusammenwirkender Kelchstützen und Trogwände, erfolgte an physikalischen Kettenhängemodellen.

Bild 6: Kettenhängemodelle, Einzelkelch, Kontinuum, Frei Otto Atelier Warmbronn

Ein Kettennetz mit vieleckigen Maschen wird hierbei an Hoch- und Tiefpunkten verankert und verformt sich unter einem Lastfall, z.B. unter Eigengewicht, zu der hierzu gehörigen Geometrie. In diesem Zustand ist das Netz nur auf Zug beansprucht und ist auch nur durch Zugkräfte beanspruchbar. Die zugehörigen Querschnittsabmessungen solcher Membrankonstruktionen sind minimiert und somit sehr gering.

Wird dieses Hängemodell umgekehrt, entsteht eine druckbeanspruchte Schale, man spricht von der Umkehrmethode. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass die Einzelstäbe nunmehr im Sinne von Druckbögen senkrecht zur Schalenfläche biegesteif ausgebildet sind, die Knoten also nicht mehr gelenkig miteinander verbunden sind und die vieleckigen Maschen zusätzliche Diagonalelemente erhalten, also in der Schalenebene schubsteif werden müssen.

Der **nächste Schritt der Formentwicklung** bestand im Aufmass der Kettenhängemodelle an zweidimensionalen Vertikalschnitten. Aus den hier gewonnenen Koordinaten wurden digitale dreidimensionale Microstation CAD-Modelle erzeugt. Die Flächen wurden darin mit B-Spline-Flächen

modelliert. B- oder Basis-Splines m-ten Grades sind stückweise Polynome m-ten Grades. Die aus B-Splines gebildeten Flächen erlaubten ein direktes freies Formen und Weiterbearbeiten der Schalenflächen, ohne vorher einzelne Schnitte aufwendig konstruieren zu müssen. Umgekehrt konnten nun aus diesem digitalen 3-D-Flächenmodell beliebige Horizontal- und Vertikalschnitte generiert werden. Auch erste Computer-Visualisierungen des Schalendachs, sowie die Aufbereitung der Geometriedaten, die zur Fertigung von Kunststoffmodellen mit Hilfe von Techniken der Stereolithografie erforderlich waren, konnten dadurch erzeugt werden.

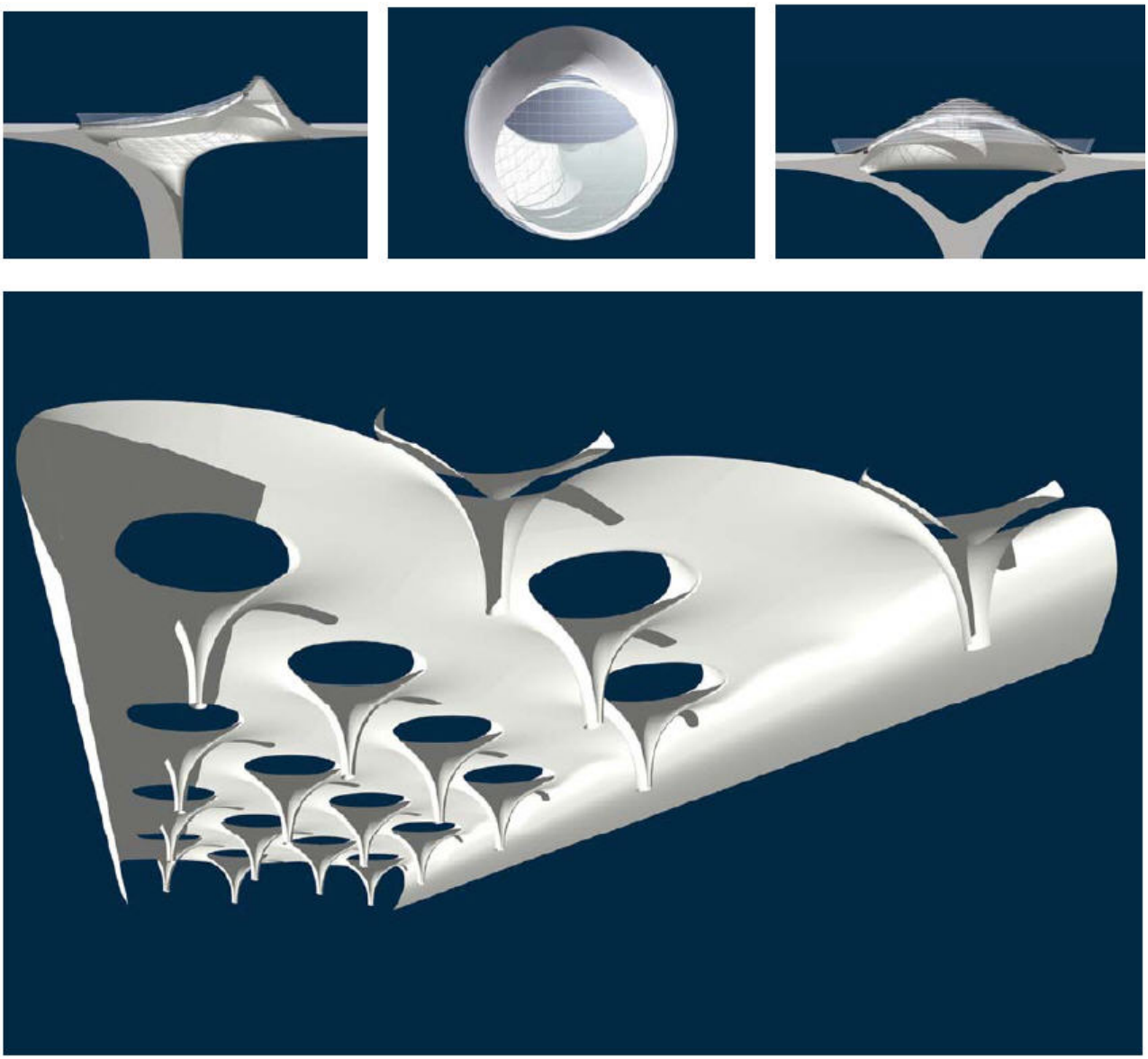
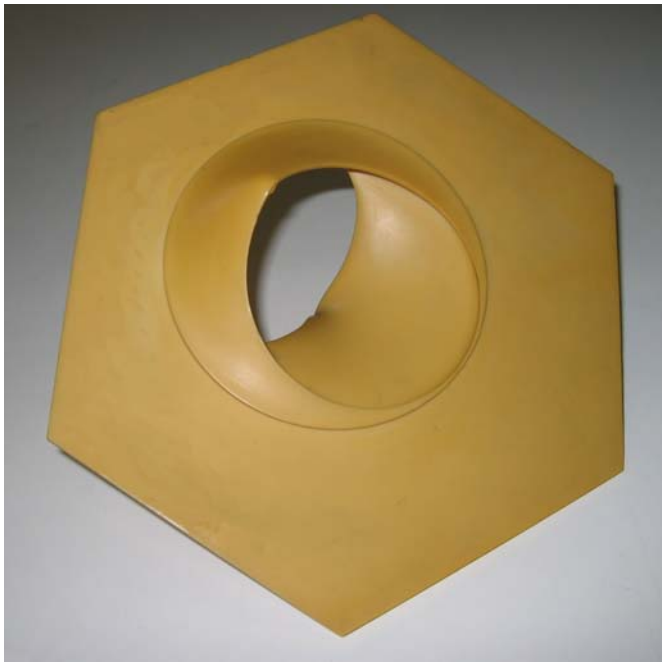


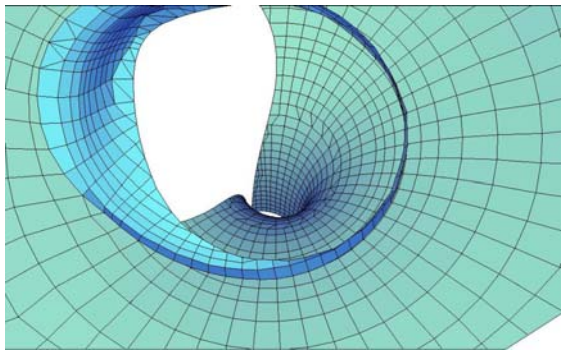
Bild 7: Microstation CAD-Computermodelle, Ingenhoven Overdiek Architekten

Mit Hilfe der CAD-Modelle wurden nun alle architektonischen und funktionalen Aspekte wie Belichtung, Ästhetik, Lichtraumprofile, zugehörige Höhenabstufungen, Technik, sowie Axialsymmetrie und Wiederholungen einzelner Formen zur Systematisierung der Schalhaut durchgearbeitet.

Dabei wurde erkennbar, dass die aus den physikalischen Kettenhängemodellen gefundene, im statischen Sinne weitgehend ideale Schalenform, diesen funktionalen Erfordernissen ausreichend gerecht wurde. Die schnittbezogenen idealen Stützlinien, welche Lasten nur über Druckkräfte ohne Biegung abtragen, kollidierten kaum mit den Lichtraumprofilen, sodass nur geringe Modifikationen der Kelchstützenform notwendig wurden.

Nach Festlegung der entwurflichen Rahmenbedingungen seitens der Architekten folgte die Entwicklung eines **ersten Finite-Elemente-Modells einer einzelnen Kelchstütze** mit dem Programm SOFiSTiK. Hierzu wurden aus dem CAD-Modell einzelne Schnitte generiert, aus denen die Geometriedaten als Koordinaten extrahiert und schließlich in dem SOFiSTiK-Preprozessor MONET zur Festlegung der Geometrie geladen wurden. Anschließend wurden die Schalenflächen mit finiten SOFiSTiK QUAD-Schalenelementen modelliert, wobei die Eingabe weitgehend von Hand erfolgte.





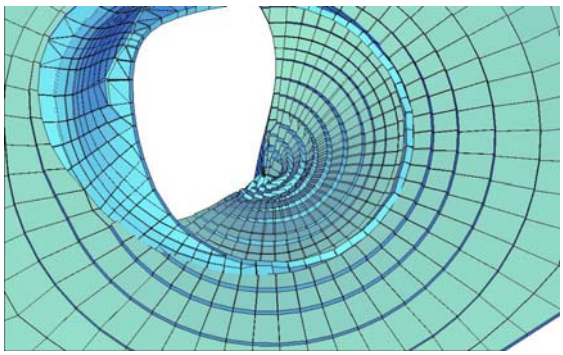


Bild 8: Kunststoffmodell, Ingenhoven Overdiek Architekten,
Erstes SOFiSTiK-FE-Modell einer Kelchstütze (ohne und mit „Betonfüllung“), Leonhardt Andrä u. Partner

Dieses erste SOFiSTiK-FE-Modell diente der Absicherung der statischen Machbarkeit. Die Bezugsfläche der finiten Schalenelemente war die untere Schalenoberfläche (untere Schalung), auf der die Dicken der QUADs nach innen aufsetzten, wodurch die obere innere Schalenoberfläche nur grob erfasst wurde. Die Vorderkanten der trichterförmigen Lichtaugenöffnungen wurden hier noch nicht vollständig modelliert. Für die endgültige statische Berechnung im Rahmen der kommenden Ausführungsplanung war dieses Modell daher nicht genau genug, gleichzeitig war die Handeingabeprozedur zur Systemgenerierung zu aufwendig und zu fehleranfällig, um damit die Modellierung der gesamten Bahnhofshalle in Angriff zu nehmen.

Es waren somit im FE-Programm SOFISTIK neue Programmeigenschaften zu definieren und zu entwickeln. Die Eingabe des Systems sollte mit dem Programm MONET erfolgen.

- Für die Modellierung der gesamten Bahnhofshalle musste eine weitgehend automatische Generierung mit systematisiertem Eingabeablauf entwickelt werden.

- Die Geometrie des Rechenmodells musste direkt aus dem CAD-Flächenmodell der Architekten übernommen werden können.

- Alle vorkommenden Schalengeometrien, auch diejenigen im Bereich der umlaufenden Trogwände, mussten modelliert werden können.

- Das Modell musste leicht änderbar sein, um dem Planungsfortschritt und Änderungen hierzu in der Zusammenarbeit mit den Architekten gerecht zu werden.

- Die **Aufbereitung** der Geometrie, die Systemgenerierung und Modellierung – „Preprocessing" – war für die **Berechnung** – „Processing" – so zu entwickeln, dass die Ergebnisse für die **Nachbearbeitung** – „Postprocessing" – geeignet sind.

- Die Nachbearbeitung umfasst neben der Darstellung von Schnittkräften und Spannungen insbesondere die Ausgabe der **Bewehrung**. Schon bei der Geometrieaufbereitung ist die Bewehrungsführung somit zu realisieren. Die spätere Verlegung der Bewehrung richtet sich nach den folgenden **3 Bereichen:**

    1. Bereich 1: Im Schalenhochpunkt ergibt sich ein **plattenartiger** Bereich, der eine schwach gekrümmte Innenschalung und eine nahezu ebene Oberfläche hat. Die Bewehrung verläuft hier **orthogonal**, es können Matten verwendet werden.

    2. Bereich 2: Der stärker gekrümmte, zweiseitig geschalte obere Kelchbereich und der anschließende Kelchfuß, sind **schalenartig**. Die Bewehrung verläuft hier entlang der **Falllinie** und umlaufend **tangential**.

    3. Bereich 3: Die zweischaligen Randbereiche entlang der Trichterkante der Lichtaugenöffnungen sind ebenfalls **schalenartig.** Die Bewehrungsrichtung verläuft hier entlang der **Trajektorien der Hauptmembrankräfte,** welche erst nach einer vorausgegangenen Berechnung im Rechenmodell definiert werden können.

- Alle diese Bewehrungsbereiche müssen erkennbar und veränderbar sein. Bewehrungsmenge und Bewehrungsführung resultieren aus einer Interaktion zwischen Aufbereitung, Berechnung und Nachbearbeitung.

- Die Systemdaten mussten sinnvoll organisiert werden können, da sonst bei der resultierenden Größe des Gesamtrechenmodells weder die Eingabe, noch die Berechnung und die Auswertung der Ergebnisse handhabbar sind: Die nichtlinear zu berechnende Einzel-Kelchstütze enthält 1224 Knoten, 1425 QUAD-Elemente in 10 Gruppen und 5232 Freiheitsgrade; das Modell des gesamten Bahnhofsdaches enthält schließlich 43448 Knoten, 39570 QUAD-Elemente in 578 Gruppen und 211848 Freiheitsgrade. Damit stehen in der Datenstruktur noch ausreichende Reserven für Bodenplatte und Gründungselemente zur Verfügung.

- Die QUAD-Elemente im Schalenbereich sollten sich nicht mehr auf eine äußere Schalfläche (oben oder unten) beziehen, da diese lokal noch modellierbar sein sollte. Die Definition der QUAD-Elemente war somit auf die Schalenmittelfläche zu beziehen. Dies war auch deshalb notwendig, da die aus dem CAD-Flächenmodell des Architekten direkt übernommenen räumlichen Koordinaten in ihrer Gesamtheit für die spätere Herstellung der Stahlschalhaut mittels NC-Fräsung (Numeric-Control) dienen werden. Diese Koordinaten bilden, reduziert auf wenige **Schnitte**, die Grundlage des diskreten statischen Rechenmodells. Die Kontrolle der Form findet nur in Schnitten und entlang ausgewählter Kurvenlinien statt. Hier werden die Koordinaten punktbezogen ausgegeben und dargestellt. Diese Darstellung sind die verbleibenden **„Schalpläne"**.

- Die Darstellung der Bewehrung, d.h. die eigentlichen **„Bewehrungspläne"**, orientiert sich an Vertikal- und Horizontalschnitten, die aus den räumlichen Koordinaten des CAD-Flächenmodells und Schnitten des Rechenmodells erzeugt werden.

Mit dem im nächsten Abschnitt ausführlicher beschriebenen, entsprechend weiterentwickelten SOFiSTiK-Preprozessor MONET wurde in der Folge zunächst eine wesentlich genauer abgebildete einzelne Kelchstütze modelliert, anschließend zwei typische, aus mehreren Kelchstützen sowie Trogwandelementen zusammengesetzte Teilausschnitte des Schalendaches, und schließlich das Dach der gesamten Bahnhofshalle einschließlich der Trogwände und des Übergangs zu dem verbleibenden Bonatzgebäude.

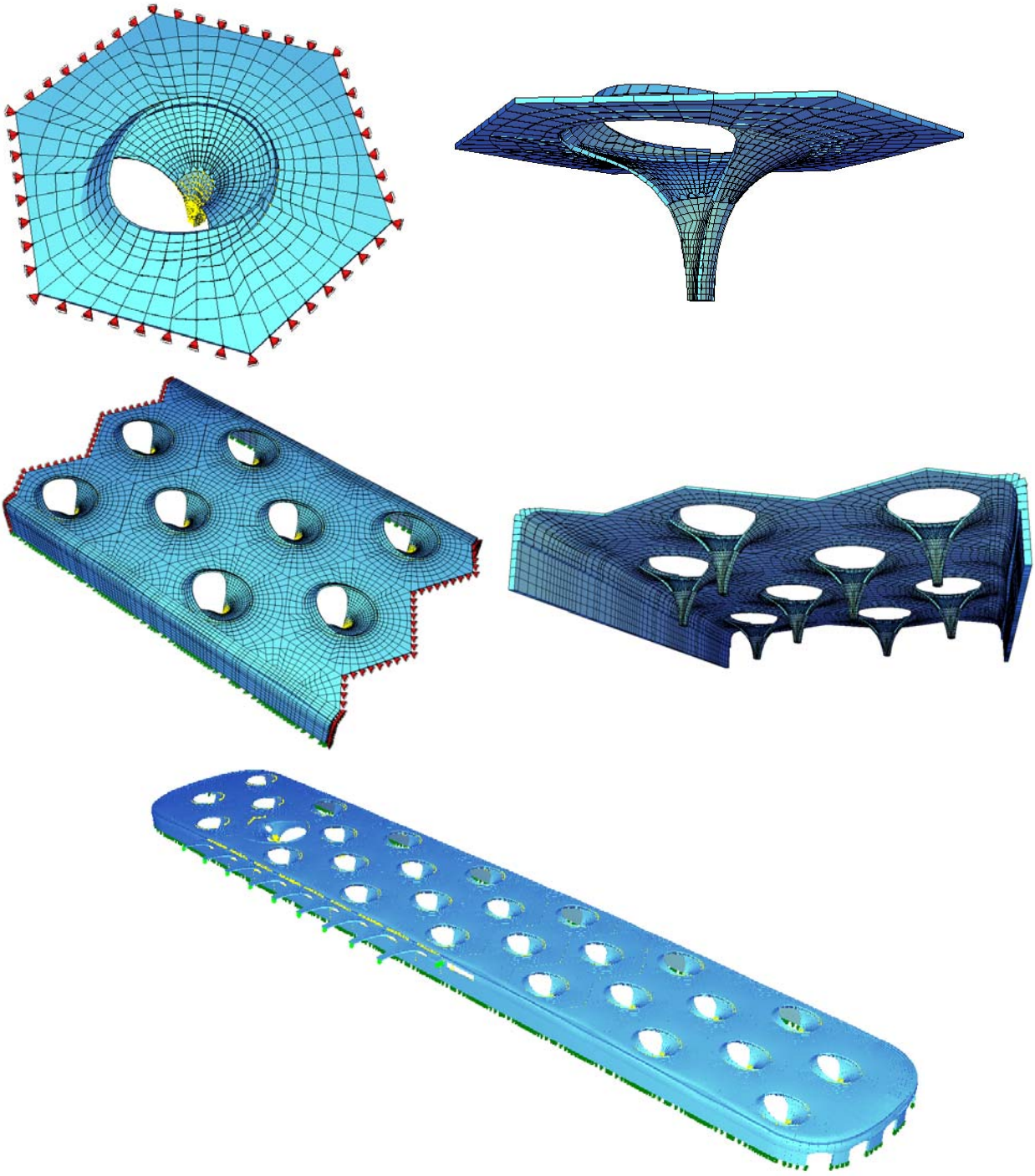


Bild 9: SOFiSTiK-FE-Modelle einer Einzel-Kelchstütze, eines Teilausschnittes und des gesamten Bahnhofdaches, Leonhardt Andrä und Partner

An der Einzelstütze mit künstlichen Randbedingungen sowie den Teilausschnitten wurden ausführliche lineare sowie geometrisch und materiell nichtlineare statische Untersuchungen durchgeführt. Diese führten in einem iterativen Prozeß des wiederholten Abgleichens der Schalenform zwischen den Tragwerksplanern und den Architekten zu einer Gesamtform, die im Hinblick auf die folgenden Punkte optimiert wurde:

- Lastabtragung, Schalendicken und Materialeinsatz
  - nahezu keine Lastausmitten am Kelchstützen-Fußpunkt unter Eigengewicht
  - ausgewogene und aufnehmbare Kräfte- und Momentenverläufe in der Schale, insbesondere auch in den hochbeanspruchten Vorderkanten der trichterförmigen Lichtaugenöffnungen

- Schalungstechnik
  - Rotationssymmetrie im oberen Kelchschalenbereich als Voraussetzung für die Herstellung der gefrästen Edelstahlblechschalung
  - optimierter Wiederholungsgrad der einzelnen Schalflächenformen

- Architektonisch-funktionale Belange
  - Belichtung, Ästhetik, Lichtraumprofile, zugehörige Höhenabstufungen, Technik

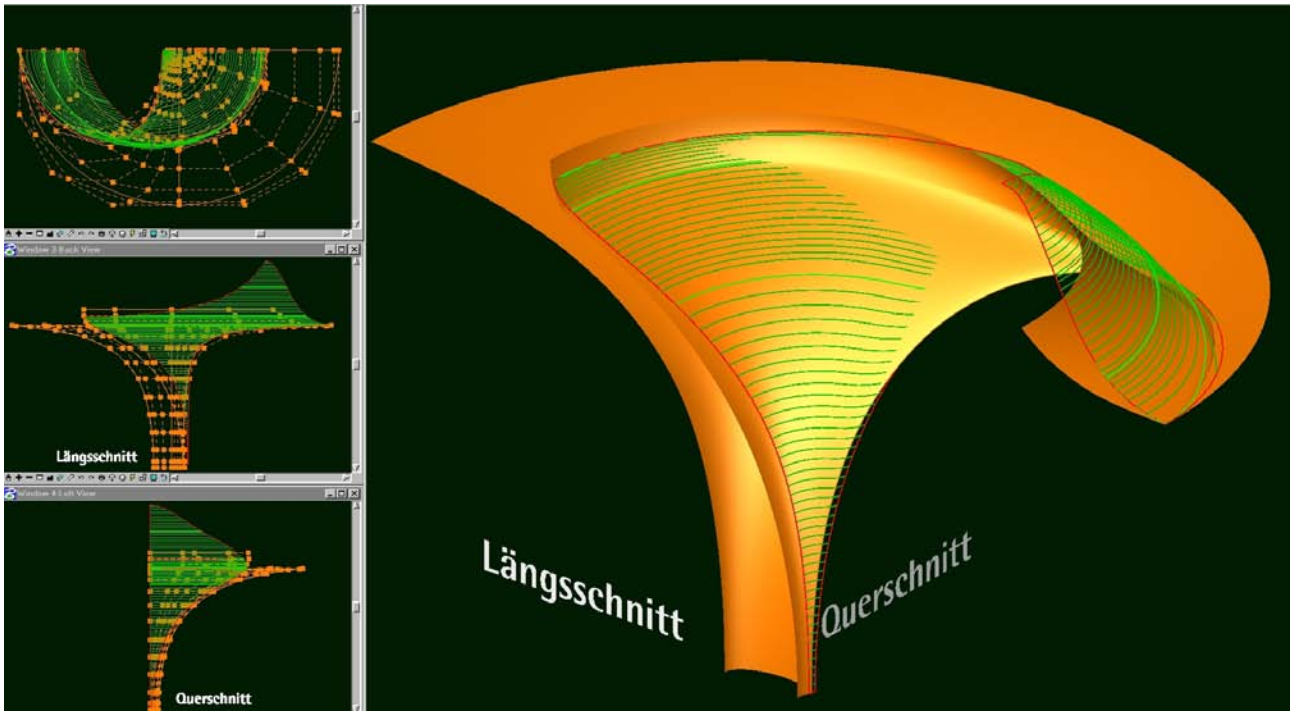


Bild 10: Optimierung der Schalenform im Laufe des Planungsprozesses (1), Ingenhoven Overdiek Architekten (orange: optimierte Form, grün: alte Form)

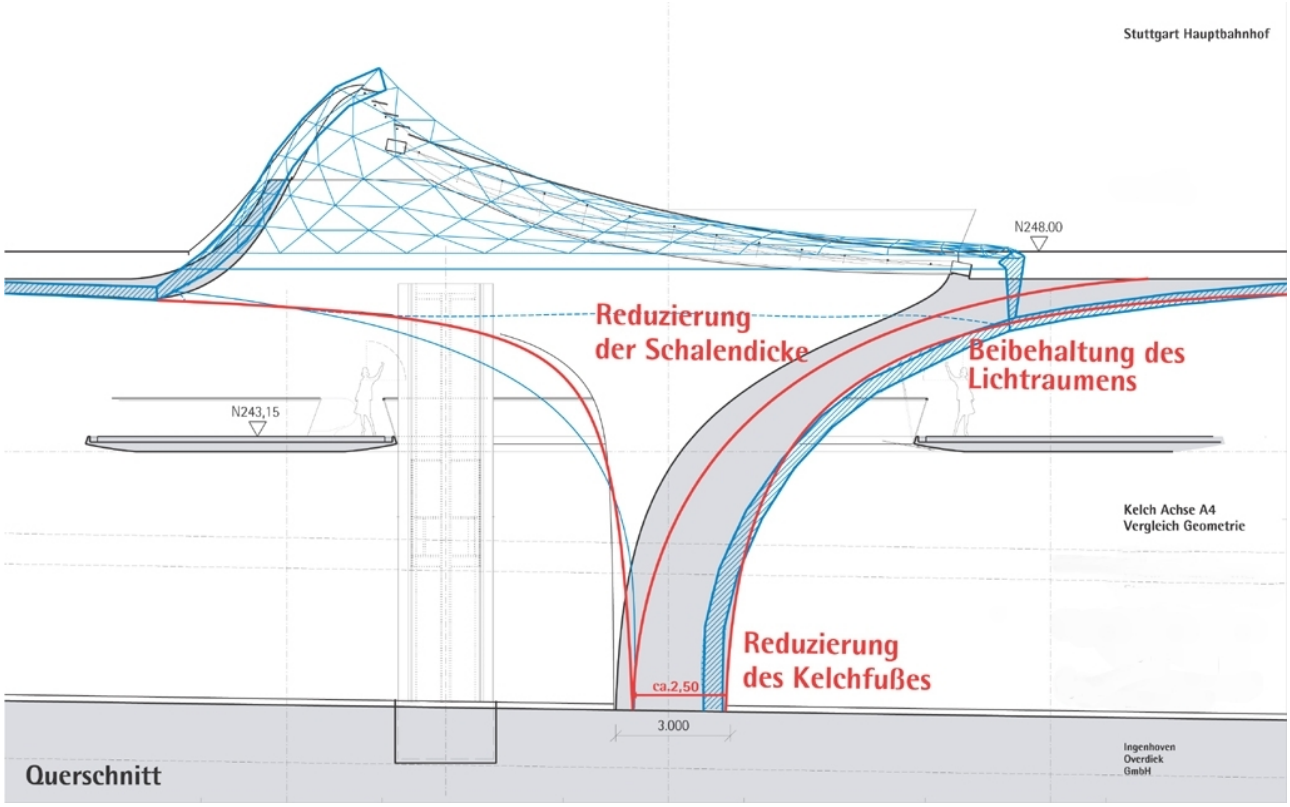


Bild 11: Optimierung der Schalenform im Laufe des Planungsprozesses (2), Ingenhoven Overdiek Architekten

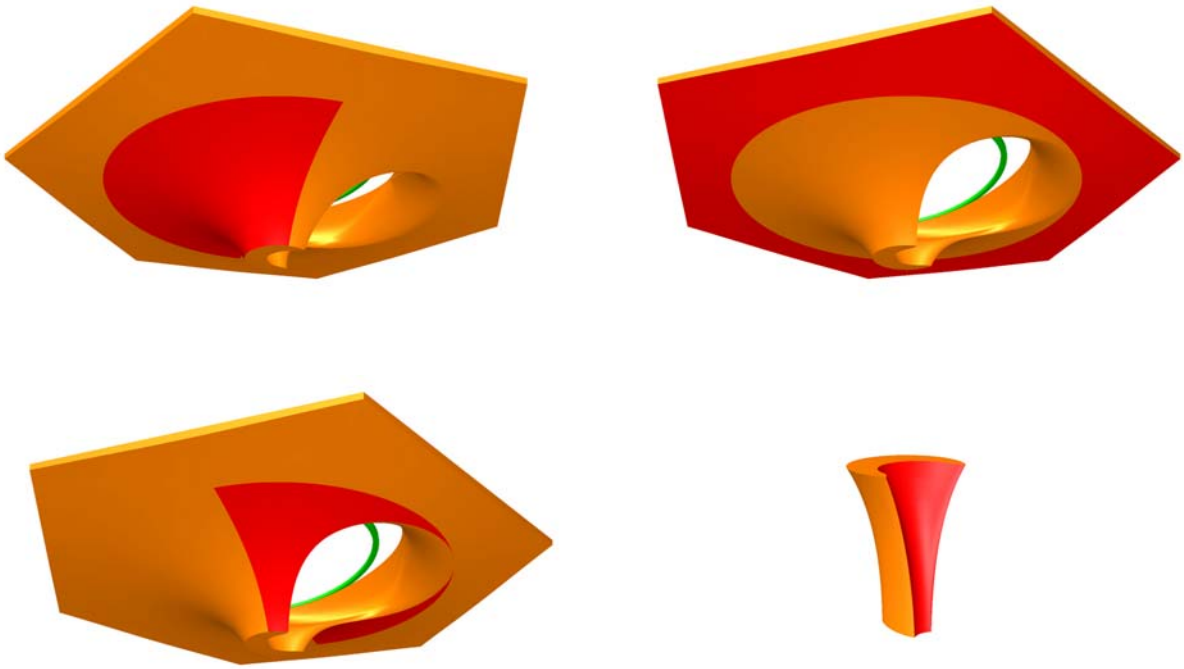


Bild 12: Typisierung der Schalflächenformen, Ingenhoven Overdiek Architekten

Die endgültige Schnittkraftermittlung und Bemessung im Rahmen der kommenden Ausführungsplanung wird schließlich an dem Gesamt-Schalendachmodell – unter Berücksichtigung des Herstellablaufes – erfolgen, da nur mit dem kompletten Modell alle Randbedingungen und gegenseitigen Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Kelchstützen, der Trogwand und der Gründung, sowie den weiteren Tragwerkselementen wie den Glasgitter-Zugangsschalen, den Verteilerstegen und den Übergangsbauwerken zu dem verbleibenden Bonatzgebäude, dem Technikgebäude und der Stadtbahnhaltestelle Staatsgalerie hinreichend genau erfasst werden können.

3. Systemgenerierung und Modellierung – „Preprocessing“

Für die Modellierung innerhalb des Finite Elemente Programms SOFiSTiK wurden vierknotige QUAD-Schalenelemente verwendet, die sowohl die Biege- als auch die Membrantragwirkung abbilden können.

Die **Systemgenerierung** erfolgte mit dem Preprozessor MONET, der durch den Programmautor G. Apell in enger Zusammenarbeit mit den Autoren dieses Beitrags speziell für das Projekt Stuttgart 21 im Hinblick auf die oben genannten Programmeigenschaften weiterentwickelt wurde.

Hierzu wurden mit dem räumlichen CAD-Geometriemodell der Architekten in einem Raster von ca. 7,5° vertikale Schnitte durch die Kelchstützen generiert, sowie ergänzende horizontale Schnitte, insbesondere durch den unteren stützenartigen Kelchstiel. Mit den Trogwänden und allen weiteren Schalendachbereichen wurde analog verfahren. Die Schnittlinien wurden anschließend über eine DXF-Schnittstelle in MONET eingelesen.

Für den **oberen schalenartigen Teil** wurde dann in jedem vertikalen Schnitt diesen geometrischen Schnittkanten (Schalenoberflächen) eine dazwischen liegende Mittelachse bzw. Schwerlinie zugeordnet, wobei der Oberflächenbezug und somit die Information über die Dicke der Schale in den einzelnen Schnitten abgespeichert wurde.

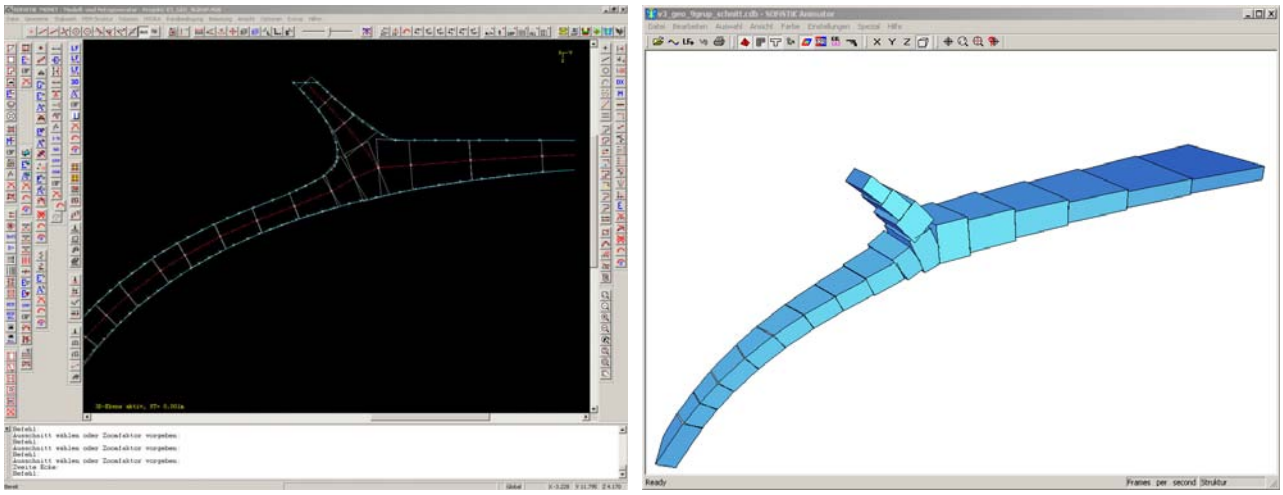


Bild 13: Elementierung im Vertikalschnitt, Leonhardt Andrä und Partner

Anschließend wurden zwischen diesen Mittellinien von Schnitt zu Schnitt die finiten QUAD-Elemente generiert, die somit exakt in der Schalenmittelebene liegen und deren Dicke in jedem Schnitt genau dem dreidimensionalen Architekten-CAD-Modell entspricht.

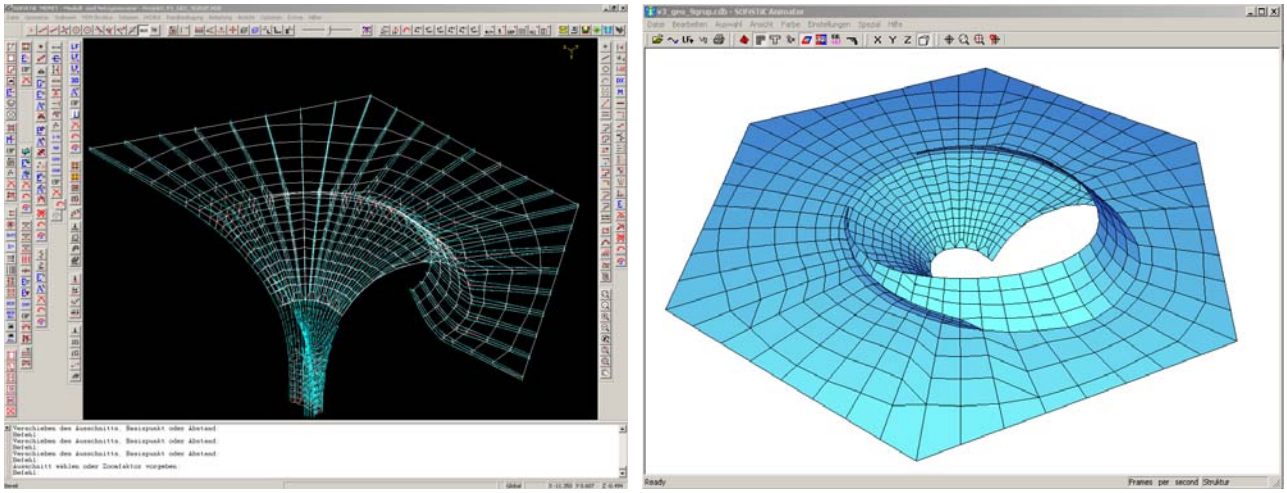


Bild 14: Generierung der finiten Elemente in Schalenmittelfläche, Leonhardt Andrä und Partner

Für den **mittleren stützenartigen Bereich** der Kelche, ab einer Höhe von ca. 6 m unter der Plattenoberkante, wurde aufgrund der zunehmenden Völligkeit des Stützenquerschnitts auf eine andere Modellierungsart übergegangen, und zwar auf die Definition mittels einer horizontalen Schnittrichtung durch das Geometriemodell. Die resultierenden QUAD-Elemente wurden entsprechend an beiden Außenflächen der Schale definiert. Ihre Dicke erstreckt sich jeweils in Richtung des Stützeninneren. Durch automatischen Flächenausgleich der Überlappungsbereiche wurde wiederum eine volumentreue Abbildung des Stützenquerschnitts erreicht. Die innere und die äußere Elementfläche wurde dabei rechnerisch gekoppelt (je 2 gegenüberliegende Knoten), um ein Zusammenwirken („Steiner-Anteile“) zu erreichen.

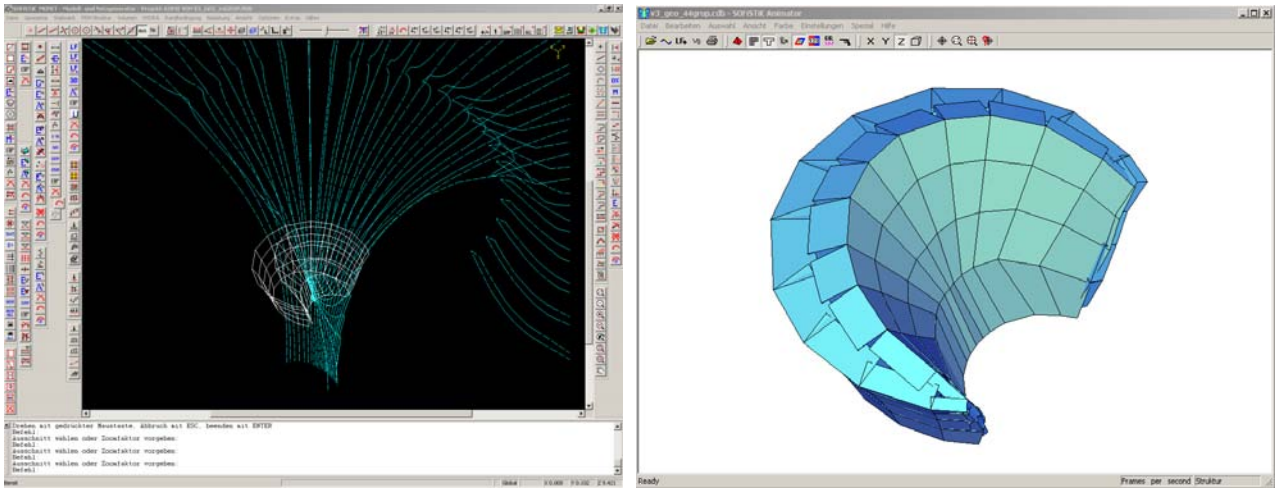


Bild 15: Generierung der finiten Elemente im mittleren Stützenbereich, Leonhardt Andrä und Partner

Im **Fußbereich** ab ca. 9 m unter OK Platte, in dem die Kelchstütze nahezu einen Vollquerschnitt aufweist, wurde analog vorgegangen, mit dem einzigen Unterschied, dass hier schließlich jeweils alle Knoten einer Höhenebene zusammengekoppelt wurden. Dadurch wirken die Schalenelemente vollständig zusammen und ein Ebenbleiben des Gesamtquerschnitts in jeder Höhenebene ist garantiert.

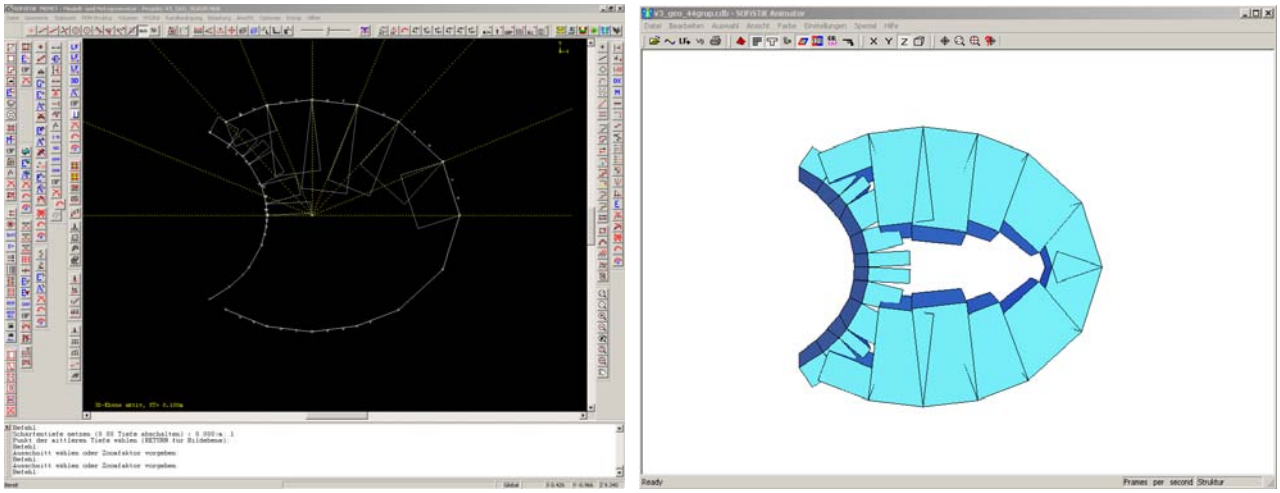


Bild 16: Generierung der finiten Elemente im Fußbereich, Leonhardt Andrä und Partner

Auf diese Weise wurden 3 verschiedenen Kelchstützentypen, die Trogwandelemente und weitere Sonderbereiche modelliert, und schließlich zu einem Gesamtsystem zusammengefügt. Der gesamte Generierungsprozess ließ sich in MONET weitgehend automatisiert und programmgestützt durchführen.

4. Nichtlineare Berechnung – „Processing“

Die DIN 1045-1 stellt neben den üblichen Bemessungsrichtlinien explizite Anforderungen an die Verteilung der Dehnung im Stahlbeton im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Da insbesondere entlang der Vorderkanten der trichterförmigen Lichtaugenöffnungen sehr hohe Druckbeanspruchungen wirken (Hauptmembrandruckkräfte bis zu ca. 8 MN/m), wurde es bereits in der Entwurfsphase erforderlich, diese mittels geometrisch und materiell nichtlinearer Berechnungen zu kontrollieren, unter Berücksichtigung der Mitwirkung der Bewehrung im gerissenen Zustand. Weiterhin war das Verhalten dieser gedrückten Schalenrandbereiche hinsichtlich ihrer Stabilität zu untersuchen.

Um die nichtlineare Berechnung bei vertretbarem Rechenaufwand realisieren zu können, wurde hierzu ein **FEM-Modell einer einzelnen Kelchstütze** verwendet. Die Lasten auf dieses Modell wurden so skaliert, dass die entsprechenden linear berechneten Schnittkräfte in dem oben beschriebenen kritischen Bereich mit den Werten, die am Modell eines representativen Teilausschnitts aus dem Gesamtschalendach ermittelt worden waren, näherungsweise übereinstimmten.

Die **Berechnung** erfolgte mit dem Programmmodul ASE. Das Programm sucht für eine gegebene Bewehrungsverteilung einen Gleichgewichtszustand der äußeren Lasten mit den inneren Schnittgrößen der gerissenen Schalenelemente. Aus der Rissbildung resultierende axiale Dehnungen werden mit erfasst. Eine detaillierte Dokumentation des Berechnungsverfahrens ist in der Programmbeschreibung [2] zu finden.

Die **Bewehrungsverteilung** wird für die nichtlineare Berechnung fest vorgegeben. Dazu wird zunächst mit dem Programm BEMESS eine lineare Bemessung durchgeführt. Die sich daraus ergebende Bewehrungsverteilung wird anschließend als Vorgabe in der nichtlinearen Berechnung verwendet.

Das in ASE implementierte **Materialgesetz des Stahlbetons** verwendet eine nichtlineare Arbeitslinie im Zug-Druckbereich, die auf der folgenden Literatur basiert: Stempniewski – Eibl [3], Feenstra – De Borst [4] und Schießl [5]. Alternativ hierzu kann mittlerweile auch bereits die nichtlineare

Arbeitslinie eingesetzt werden, die gemäß DIN 1045-1 Abs. 9.1.5 für nichtlineare Verfahren der Schnittgrößenermittlung und für Verformungsberechnungen zu verwenden ist. Allen diesen Arbeitslinien ist gemeinsam, dass sie nach Überschreiten des Höchstwerts der Betondruckspannung bis zum Erreichen der Bruchdehnung in einen abfallenden Ast übergehen. Die spezifischen Eigenschaften des hier eingeplanten selbstverdichtenden Betons sind derzeit Gegenstand aktueller Untersuchungen.

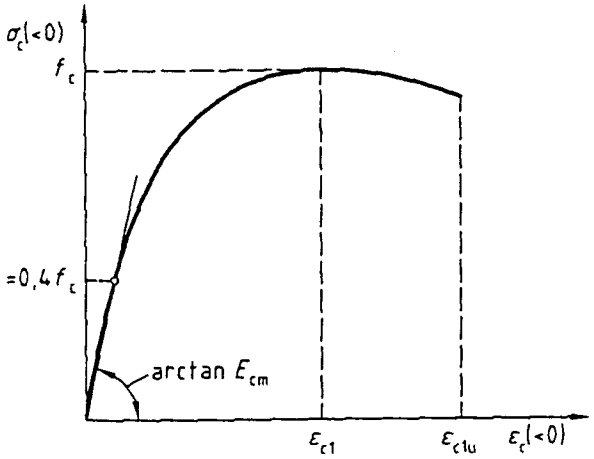


Bild 17: Spannungs-Dehnungs-Linie für Beton im Druckbereich, DIN 1045-1 Abs. 9.1.5 Bild 22

Die Betondehnungen im Grenzzustand der Tragfähigkeit nach DIN 1045-1 Abs. 10.2 sind bei biegebeanspruchten Querschnitten auf ε_{c2u} = -3,5‰ und bei vollständig überdrückten Querschnitten auf ε_{c2} = -2,0‰ zu begrenzen. Bei geringen Ausmitten bis $e_d/h \leq 0{,}1$ darf für Normalbeton die günstige Wirkung des Kriechens des Betons vereinfachend durch die Wahl von ε_{c2} = -2,2‰ berücksichtigt werden. Die Betonstahldehnung (Zugbewehrung) ist auf ε_{su} = +25‰ zu begrenzen.

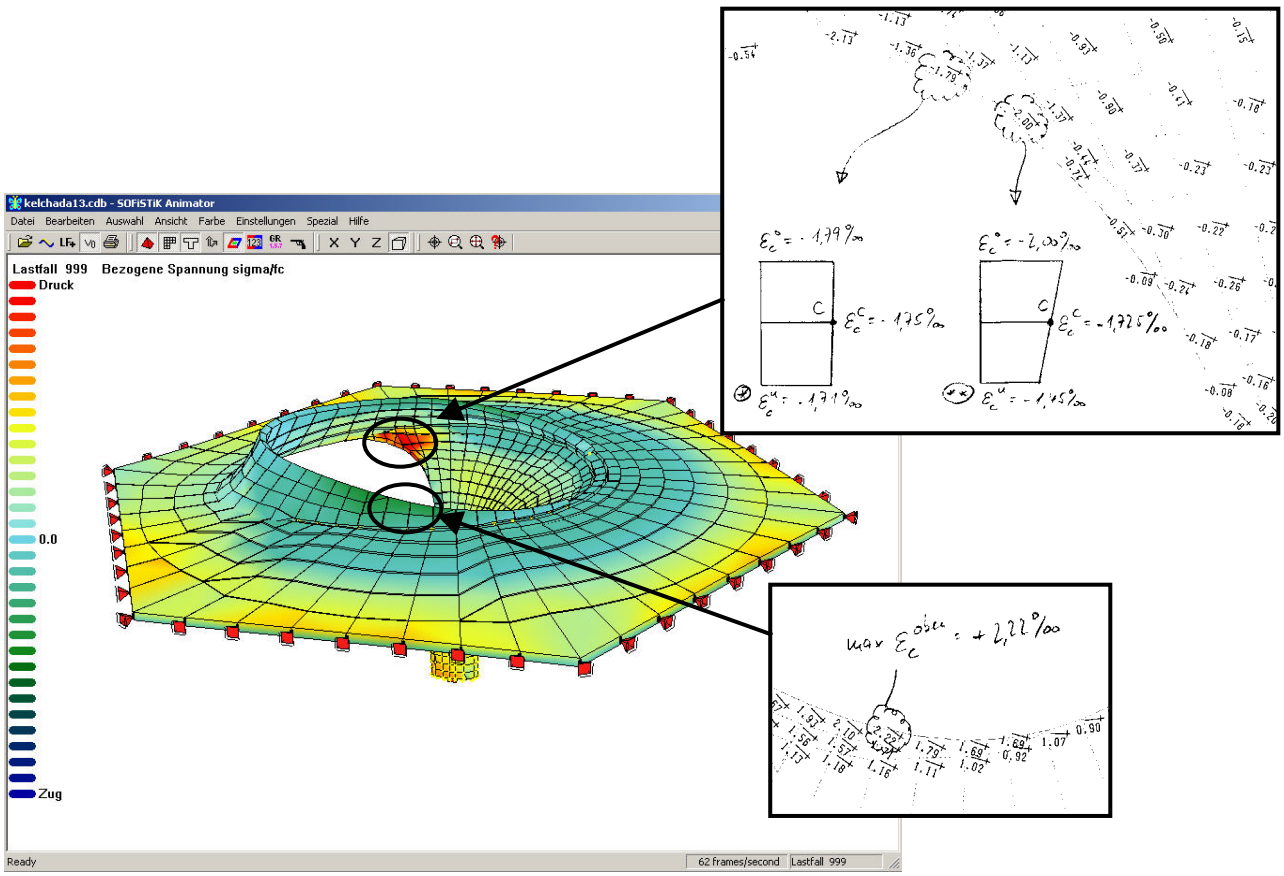


Bild 18: Verformter Einzelkelch mit Hauptdehnungen im GZT, Leonhardt Andrä und Partner

Im auf Druck höchstbeanspruchten Bereich – den Vorderkanten der trichterförmigen Lichtaugenöffnungen – ergaben die Berechnungen eine maximale mittlere Betondruckdehnung von ca. $\varepsilon_c = -1{,}75$ ‰. Der auf Zug höchstbeanspruchte Bereich liegt an der plattenoberseitigen Aufkantung des Lichtauges. Hier beträgt die maximale rechnerische Betonstahldehnung ca. $\varepsilon_s = +2{,}1$ ‰.

5. Auswertung der Ergebnisse, Bemessung – „Postprocessing“

Die Stahlbetonbemessung erfolgt mit dem Programmmodul BEMESS. Die Bemessung stützt sich auf das von Baumann [6], sowie im SOFiSTiK-Handbuch [7] beschriebene Verfahren.

Es basiert auf der Idee, dass die Schalenschnittkräfte zerlegt werden in rechnerische Scheibenkräfte, die in gedachten Ersatzscheiben an den Außenseiten der Schalen wirken, und anschließend diese Ersatzscheiben konventionell nach dem Verfahren von Baumann auf Zug und Druck bemessen werden. Hierbei wird zunächst aus der Betondruckzonenbeanspruchung (dem k_h-Wert) ein minimaler Hebelarm z bestimmt. Damit werden die Momente m-xx, m-yy und m-xy über n = m / z in Scheibenkräfte in der oberen und unteren Ersatzscheibe aufgeteilt. Die echten Normalkräfte n-xx, n-yy und n-xy werden hälftig aufgeteilt.

Die Ersatzscheiben haben bei überwiegend auf Biegung beanspruchten Schalen (e/d > 0,20) eine Dicke von 0,35 x Bauteildicke. Bei annähernd zentrisch gedrückten Schalen würde durch diese Begrenzung der Querschnitt nicht voll ausgenutzt werden, daher wird für e/d < 0,20 die Ersatzscheibendicke linear bis auf 0,50 x Bauteildicke erhöht.

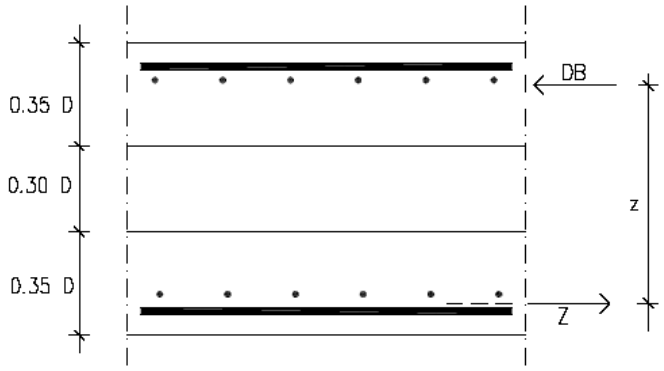


Bild 19: Schalenelementbemessung in SOFiSTiK nach Baumann [6], [7]

Die Bemessung des Schalendachs erfolgt nach DIN 1045-1 im Grenzzustand der Tragfähigkeit. Dabei wird die maximal angesetzte Stahlspannung von Druckbewehrungen auf 400 N/mm² begrenzt (2 ‰ Dehnung bei E = 200000 N/mm²). Es ist geplant, einen selbstverdichtenden Normalbeton der Festigkeitsklasse C35/45 nach DIN 1045-1 und -2 einzusetzen.

Für die korrekte programmtechnische Bemessung ist es erforderlich, den einzelnen finiten Schalenelementen Informationen über die exakte Lage und Ausrichtung der jeweils zu bemessenden Bewehrungslagen mitzugeben. Dies geschieht im wesentlichen durch entsprechende Ausrichtung der lokalen Element-Koordinatensysteme im Preprozessor und durch anschließende Angaben über die Ausrichtung der einzelnen Bewehrungslagen – bezogen auf diese lokalen Koordinatenrichtungen – im Bemessungsmodul. Für orthogonale Bewehrungsanordnungen in Platten oder Rotationsschalen ist dies sowohl von der Eingabe, wie auch von der Berechnung her, Standard.

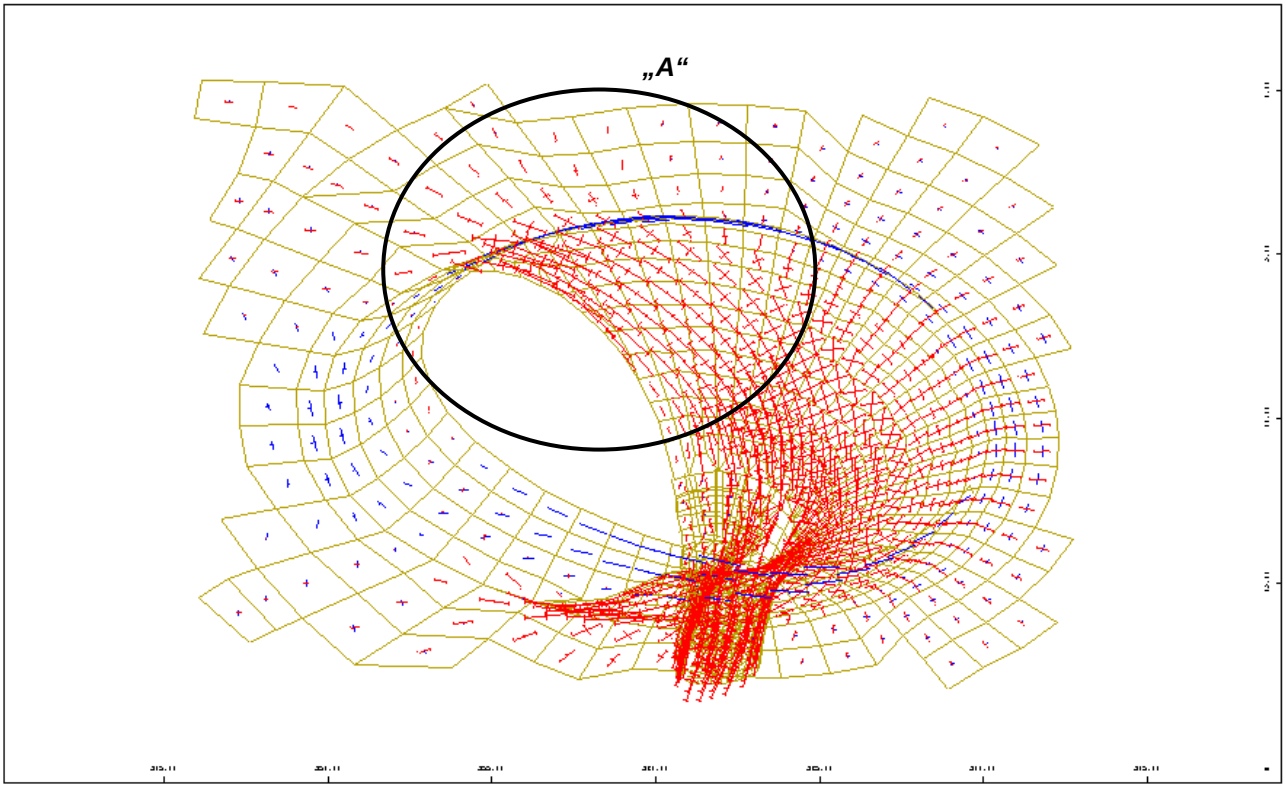


Bild 20: Trajektorien der Hauptmembrankräfte in Kelchstützenschale, Leonhardt Andrä und Partner

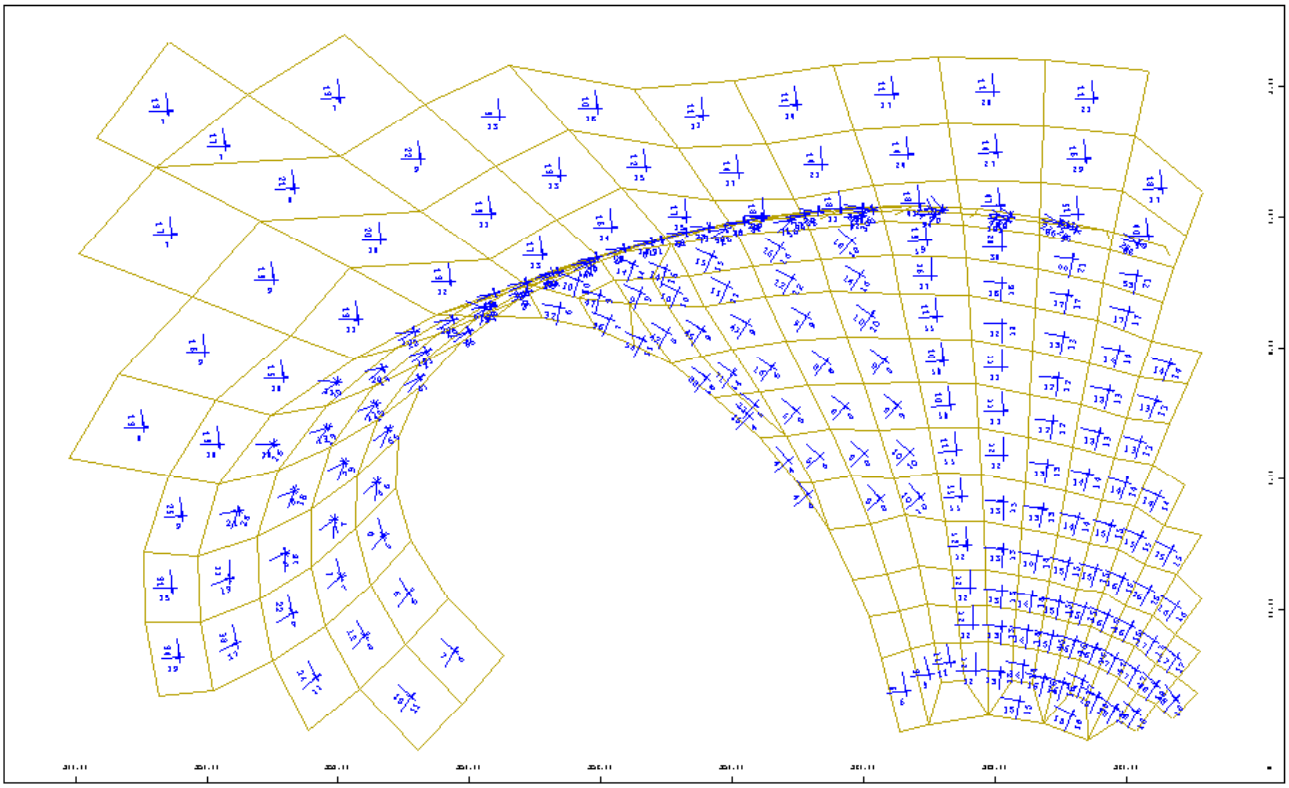


Bild 21: Bewehrungsrichtungen und –querschnitte im Detailausschnitt „A“, Leonhardt Andrä und Partner

Die Besonderheit im hier vorliegenden speziellen Fall der Kelchstützenschalen ist allerdings, dass es aufgrund der sehr hohen Druckbeanspruchung in den Vorderkanten der trichterförmigen Lichtaugenöffnungen und der besonderen Geometrie notwendig wurde, in diesem Bereich die innere Hauptbewehrungslage in Richtung der Trajektorien der Hauptmembrandruckkräfte (näherungsweise randparallel) anzuordnen, wie bereits in Abschnitt 2 beschrieben. Zusätzlich dazu musste die

äußere Bewehrungslage als Verbügelung und/oder Vernadelung ausgebildet werden. Je nach Lage des Elementes im Raum liegt diese entweder vom dünnen freien Schalenrand ausgehend orthogonal zur inneren Bewehrungslage oder aber tangential (auf den Höhenlinien) um die Kelchstütze herumlaufend.

Auch hierfür mussten sowohl im Preprozessor MONET als auch im nachgeschalteten Bemessungsmodul BEMESS Sonderfunktionen entwickelt werden, um eine automatisierte Handhabung der Bemessungsroutine zu gewährleisten.

6. Projektbeteiligte

Bauherr, Deutsche Bahn AG, Berlin,
vertreten durch DB ProjektBau GmbH Niederlassung Südwest, Projektzentrum Stuttgart 1
Architekten, Ingenhoven Overdiek Architekten, Düsseldorf
Beratung Tragwerk, Frei Otto, Leonberg mit SL-Sonderkonstruktion und Leichtbau, Leinfelden
Tragwerksplanung, Ingenieurarbeitsgemeinschaft Tragwerksplanung S21 Hauptbahnhof GbR
Leonhardt, Andrä und Partner, Stuttgart mit Happold Ingenieurbüro GmbH, Berlin

7. Literatur

[1] Ingenhoven Overdiek und Partner „energies“, Birkhäuser Verlag, 2002
[2] SOFiSTiK AG: „Nichtlineare Berechnungen von Platten und Schalen“, Stand 30.03.2000
[3] Stempniewski – Eibl: „Finite Elemente im Stahlbeton“, Betonkalender 1993 - Teil 1, S. 249
[4] Feenstra – De Borst: „Aspects of robust computational modeling for plain and reinforced concrete“, Heron Vol. 38, 1993, No. 4
[5] Schießl: „Grundlagen der Neuregelung zur Beschränkung der Rissbreite”, Heft 400 DAfStb
[6] Baumann: „Zur Frage der Netzbewehrung von Flächentragwerken“, Der Bauingenieur 47 , 1972, Seiten 367 – 377
[7] SOFiSTiK AG: „BEMESS - Bemessung von Flächentragwerken“, Version 10.88, 2004