

Stuttgarts Bahnhof der Zukunft - Der Bau des Schalendachs

Rolf Becker

Ed. Züblin AG, Stuttgart

Zusammenfassung: Derzeit entsteht im Herzen von Stuttgart eines der gleichermaßen architektonisch wie ingenieurbaumäßig anspruchsvollsten Bauwerke der Welt, der neue Tiefbahnhof im Rahmen des Großprojektes „Stuttgart 21“. Der nachfolgende Beitrag beschreibt die wesentlichen Meilensteine in der Realisierung des spektakulären Schalendachs.

1 Vom Entwurf bis zur Realisierung – eine Zeitreise

Die Anfänge des Projektes Stuttgart 21 gehen auf erste Konzepte und Machbarkeitsstudien zur Umgestaltung des Bahnknotens Stuttgart in den 1980er und frühen 1990er Jahren zurück. Der neue Durchgangsbahnhof sollte gegenüber dem bisherigen Kopfbahnhof um ca. 90°gedreht angeordnet werden und durch unterirdische Zulaufstrecken aus Richtung Feuerbach, Bad Cannstatt, Ober- und Untertürkheim sowie der Filderebene angebunden werden.

Mit dem Entwurf eines „Schalendachs“, getragen von 28 Kelchstützen, ging Christoph Ingenhoven als Sieger aus dem Realisierungswettbewerb im Jahr 1997 hervor. Die Formfindung unterstützte Frei Otto mittels Seifenhaut- und Kettenhänge-modellen, wobei das Ideal einer druckbeanspruchten Gewölbeschale verfolgt wurde. Um die Jahrtausendwende entstanden dann erste räumliche FEM-Modelle, mit denen die damaligen Ingenieurbüros Happold sowie Leonhardt, André & Partner erste statische Berechnungen durchführten [1],[2].

Zu dieser Zeit wurden Stahlbetonbauten in Deutschland noch nach der DIN 1045 vom Juli 1988, später dann nach DIN 1045-1 vom Juli 2001 berechnet und bemessen. Die Form der Kelche wurde über einen Zeitraum von mehreren Jahren an die Bedürfnisse des Bahnhofs, i. B. die Ästhetik, die Belichtung, das Lichtraumprofil und den Platzbedarf der Kelche auf den Bahnsteigen, angepasst.

Im Jahr 2006 schließlich wurde die Baugenehmigung für den Planfeststellungsabschnitt 1.1 mit dem Tiefbahnhof durch Ablauf der Einspruchsfrist am VGH Mannheim rechtskräftig. Die Tragwerksplanung wurde 2009 an das Büro Werner Sobek Stuttgart übertragen; zwei Jahre später wurde mit dem Eurocode 2 DIN EN 1992-1-1 vom Januar 2011 bereits die dritte Bemessungsnorm für Stahlbeton im Laufe der Geschichte dieses Projektes bauaufsichtlich eingeführt.



Abbildung 1: Visualisierung des neuen Tiefbahnhofs in Stuttgart (Quelle: plan b, Stuttgart)

Im Sommer des darauffolgenden Jahres 2012 erhielt die Ed. Züblin AG, Direktion Stuttgart, von der DB Projekt Stuttgart Ulm GmbH (DB PSU), den Auftrag zum Bau des Tiefbahnhofs.

2 Die Bahnhofshalle mit dem Schalendach

Das Schalendach besteht aus 28 sogenannten Kelchen mit Lichtaugen, davon einem Sonderkelch mit besonders großem Lichtauge zur Aufnahme einer Zugangsanlage mit Treppe, zweier Rolltreppen und einem Aufzug. Zusätzlich gibt es 18 Restkelche und die Deckenrestfelder, die statisch als Schwindgassen dienen und die Einzelkelche umlaufend verbinden.

Ein Kelch besteht aus einem Kelchfuß, einer Kelchschale und der sogenannten „Hutze“. Dabei handelt es sich um einen halbkreisförmigen Überzug, der das Schalendach im Bereich des Lichtauges aussteift. Im Endzustand wird das Lichtauge (Durchmesser im Lichten ca. 17 m) mit einer Glas-Stahl-Konstruktion geschlossen.

Sämtliche Flächen sind dreidimensionale Freiformflächen. Die Herstellung der Halle erfolgt in zehn Bauabschnitten, wobei der letzte ca. vier Jahre nach dem ersten Bauabschnitt hergestellt wird.

Der sehr lange Zeitraum von 15 Jahren zwischen Realisierungswettbewerb und Baubeginn war für die planenden Architekten und Ingenieure gleichzeitig Herausforderung und Chance. Einerseits änderten sich wichtige technische Baubestimmungen wie beispielsweise im Brandschutz oder in der Stahlbetonbemessung, infolge derer erhebliche Anpassungen der Planung erforderlich wurden. Andererseits standen ab den 2010er Jahren Soft- und Hardwareressourcen zur Verfügung, an die Ende der 1990er Jahre nicht zu denken war.

Damit war es nun möglich, Trogbauwerk und Schalendach als integrales Tragwerk räumlich und mit dem Baugrund interagierend zu bemessen und auch dynamische Berechnungen für den Lastfall Erdbeben durchzuführen.

Gegenüber der in der frühen Phase gefundenen Form wurden jedoch aus funktionalen und ästhetischen Gründen Abweichungen von der idealen Geometrie erforderlich, die das Tragverhalten erheblich beeinflussen und einem Membranspannungszustand, wie er in Schalentragwerken üblicherweise angestrebt wird, zuwiderlaufen. Dies sollte sich im Rahmen der Ausführungsplanung durch sehr hohe Bewehrungsgrade niederschlagen.

3 Planung und Ausführung in enger Interaktion

Nicht nur die lokal hohen Bewehrungsmengen, auch die Geometrie des Schalendachs mit ihren doppelt gekrümmten Freiformflächen stellen an die Herstellung und Verlegung der Bewehrung außergewöhnlich hohe Anforderungen.

In aufwendigen Biegeversuchen und daran anschließenden konzeptionellen Untersuchungen wurden die notwendigen Herstellkriterien eruiert und sukzessive in der Ausführungsplanung berücksichtigt.

Wesentliche Erkenntnis aus diesen Untersuchungen ist, dass die Präzision in der Herstellung von 2D/3D-Biegeformen durch die geometrischen und physikalischen Besonderheiten von Betonstahl limitiert wird.

Die das Biegeergebnis maßgeblich beeinflussende Steifigkeit des Bewehrungsstabs variiert von Stab zu Stab und sogar über die Länge eines Stabs, je nachdem, an welcher Stelle er an die Biegerolle angelegt wird. Diese Eigenschaften erschweren Vorhersehbarkeit und Reproduzierbarkeit einer Biegeform gleichermaßen und sind damit bei den hohen Genauigkeitsanforderungen im Projekt Stuttgart 21 mitverantwortlich für den enorm großen Aufwand in der Herstellung.



Abbildung 2 und 3: Biegeversuche in den Jahren 2014/2015 zur Ermittlung der Maßhaltigkeit, Formtreue und Reproduzierbarkeit

Der geometrisch notwendige Wechsel der Bewehrungsrichtungen von radial / konzentrisch (im Bereich der Kelche) auf orthogonal (in den flachen Dachbereichen) erfordert ein „Vernähen“ dieser Bewehrungsrichtungen und damit eine Aufbauhöhe der Bewehrung von jeweils bis zu acht Lagen oben und unten in diesen mit 45 cm relativ schlanken Dachbereichen. Speziell für Bereiche mit derart hohen Bewehrungskonzentrationen (stellenweise über 550 kg/m^3) wurde zusätzlich eine Betonrezeptur mit 8 mm Größtkorn in das Betonsortenverzeichnis aufgenommen. In der Regel kommt jedoch ein Beton mit 16er-Größtkorn zum Einsatz.

Die Lage von Muffenstößen musste in jedem Einzelfall detailliert abgestimmt werden, um deren Einbaubarkeit unter Einhaltung der Aufbauhöhen sicherzustellen. Dies geschah unmittelbar am 3D-Modell der Bewehrung.

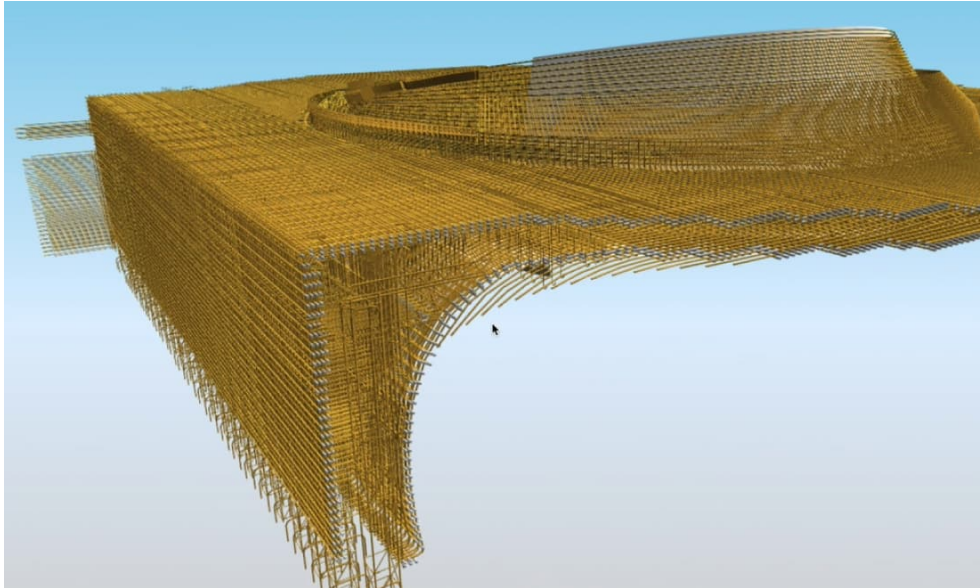


Abbildung 4: Bewehrungsmodell eines Randkelchs mit Übergang zur Trogwand in der Software „BIMPLUS“, mit Lage aller Muffenverbindungen

Dafür wurde in einem Pilotprojekt in Zusammenarbeit mit der Firma ALLPLAN die Software BIMPLUS getestet und für die Belange der Bewehrungsplanung im anspruchsvollen Ingenieurbau weiterentwickelt. Mit dieser Lösung wurden dann nicht nur die Planungsgespräche geführt und die Erfordernisse des Baubetriebs koordiniert. Vielmehr wurde das BIM-Modell selbst als wesentliche Grundlage für den Einbau der Bewehrung auf die Baustelle, unmittelbar an den Einbauort gebracht. Dort kann über einen Großbildschirm in einem Container und über Tablet-Computer der Bauleiter auf das Modell zugegriffen werden.

Die komplexen Einbauabfolgen der teilweise über 20 Lagen werden im Rahmen der Arbeitsvorbereitung in Montagegruppen zerlegt. Der Bewehrungsverleger hat damit die Möglichkeit, die Bewehrung im Modell lagenweise ein- und auszublenden.

Für den letzten Betonierabschnitt eines Kelchs, die sogenannte Hutze, kann aus geometrischen Gründen keine Muffenverbindung ausgeführt werden. Ersatzweise hat der Planer Son-derelemente aus geschweißten Blechen entwickelt, mit denen die Verbügelung der Hutze geschlossen wird, nachdem die ringförmige Biegebewehrung der Hutze vollständig eingebaut wurde. Wegen der hohen Genauigkeitsanforderungen und der Vielzahl unterschiedlicher Biegeformen erforderte der Einbau der Bügel die Vorfertigung von Bügelkörben auf der Baustelle. Die Ausrichtung der Bügel zueinander gewährleisten dabei Schablonen aus massivem Brettschichtholz, die bei ZÜBLIN Timber gefräst und gefertigt wurden.

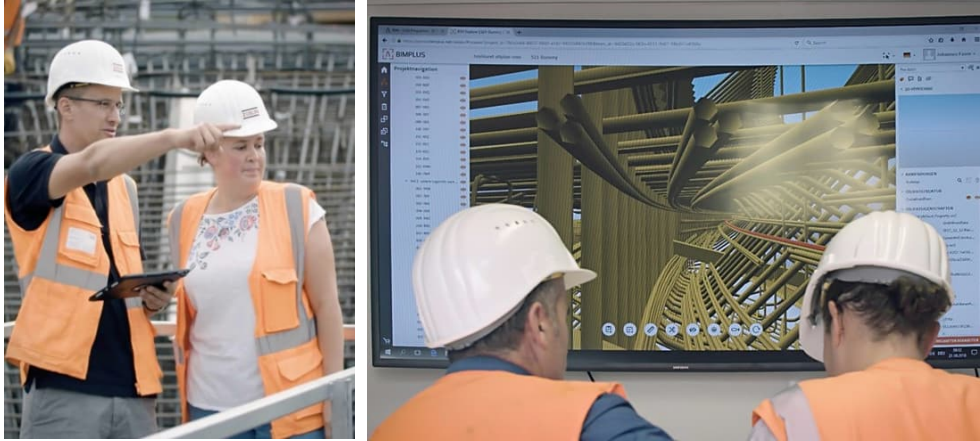


Abbildung 5 und 6: Einbau der Bewehrung mittels BIM-Modell auf dem Tablet-PC und Großbildschirm

Nach vollständiger Bestückung wurden die Bügel in der Schablone dann durch Verschweißen von Längseisen zu Montagegruppen verbunden, mit dem Kran zur Einbaustelle transportiert und dort auf Stahltraversen montiert und in ihrer Lage fixiert.

Die gesamte Bewehrung des Tiefbahnhofs wird in einer eigens für das Projekt Stuttgart 21 eingerichteten Projektbiegerei der Firma Sülzle in Denkendorf gebogen. Die Qualitätsüberwachung der komplexen Biegeformen erfolgt dabei im direkten Abgleich zwischen gebogenem Stab und maßstäblicher Laserprojektion der jeweiligen Biegeform.

Insgesamt werden für das Schalendach 35.000 m³ Beton, verteilt auf 10 Bauabschnitte, verbaut.

Die architektonische Anforderung nach einem Weißbeton mit definiertem Reflexionswert werden ergänzt durch die statische Notwendigkeit einer sehr hohen Festigkeit (C50/60) in Verbindung mit einer niedrigen Hydratationswärme beim Abbinden.

Für den Brandschutz wiederum müssen geeignete PP-Fasern beigesetzt werden; diese wirken sich jedoch ungünstig auf die Fließfähigkeit des Betons aus.

Um all diese - teilweise konträren - Anforderungen erfüllen zu können, wurden zahlreiche Versuche mit über 200 Versuchskörpern durchgeführt. Federführend bei diesen Testreihen waren der zum STRABAG-Konzern gehörende Servicebetrieb TPA GmbH, Bereich Betontechnologie International, sowie der Betonlieferant, die Fa. Godel Beton GmbH.

Begleitet wurden die Versuche durch verschiedene, den Architekten und Bauherrn beratende Gutachter und Materialprüfanstalten.

Im Ergebnis kommt ein Gemisch aus CEM I als Weißzement und einem sehr hellen CEM III zur Begrenzung der Temperaturentwicklung auf maximal 70° C zum Einsatz.



Abbildung 7: Der Beton C 50/60 mit Weißzement, geringer Hydratationswärmeentwicklung, PP-Fasern und Sichtbetonqualität SB 4

Weiterhin wurde das Einbringen des Betons in die doppelt gekrümmten Schalungen mit Deckschalung an der Kelchoberseite getestet. Die daraus resultierenden Positionen der Rüttelgassen und der Betoneinbringöffnungen mussten dann exakt verortet werden zur Übernahme in die Bewehrungsplanung.

Auch für den Bau der Schalung mit einer Gesamtfläche von 50.000 m² wurde das 3D-Modell des Architekten zu Grunde gelegt. Es wurde ergänzt um sämtliche im Endzustand sichtbare Schalungsfugen, die durch die Schalkörper und Schalkörperstöße abzubilden sind.

Die durch die ZÜBLIN Timber GmbH gefertigten Schalkörper wurden aus vorgefertigten Brettsperrholzplatten mittels CNC-gesteuerten Fräsrobotern gefräst. Hierbei wurden die Brettsperrholzplatten in ihren Dicken fein abgestuft, um den Materialverbrauch effizient zu halten. Die Planung für das sogenannte Produktionsmodell (Rohkörper) resultiert aus dem 3D-Modell. Fräsungen erfolgen oberseitig und an allen Seitenflächen einschließlich der Nuten für die Dichtung. Im weiteren Schritt wurde durch Schleifen von Hand nachgearbeitet und die Oberfläche mit bis zu fünf Schichten Glasfaser-Epoxydharzlaminate beschichtet.

Die so auf die Baustelle gelieferte Schalung wurde auf einem extra für dieses Projekt entworfenen Traggerüst der Firma Robusta-Gaukel GmbH und Co. KG aufgesetzt. Insgesamt wurden 12, wie Tortenstücke in Einzelsegmente unterteilte Schalungselemente, zu einer kompletten Schalung zusammengefügt; wobei die Reihenfolge sowohl beim Ein- als auch beim Ausschalen genau beachtet werden musste.



Abbildung 8: Der komplexe Ein- und Ausschalprozess

Um die empfindliche Schalhaut nicht durch Eindrückungen aus dem immensen Gewicht der teilweise mehr als 20 Lagen Bewehrung zu beschädigen, mussten in den Trogwänden am Übergang zum Schalendach speziell angefertigte galgenförmige und biegesteife Stahlgitterträger geplant und eingebaut werden. Die Lagegenauigkeit der Verbügelung im Hutzenbereich wurde durch eine aufwändige Stahltraversen-Konstruktion sichergestellt, die in das Schalendach einbetoniert wurden.



Abbildung 9: In Teilbereichen fertig gestelltes Schalendach mit Notunterstützung
(Foto: Arnim Kilgus / DB)

Nach dem Ausschalen der Kelche wurden diese durch Stahlstützen am Kelchrand unterstützt. Damit konnten Verformungen der Kelchränder in dem bis zu mehrere Jahre andauernden Bauzustand vor dem Schließen der sogenannten „Schwindgassen“ weitgehend vermieden werden. Auch diese Unterstützungen mussten aufwändig mit der Architektur in Lage und Gestalt sowie der Tragwerksplanung in Bezug auf statische Verträglichkeit abgestimmt werden.

4 Fazit

Das Projekt Stuttgart 21 mit dem Bau des neuen Tiefbahnhofs stellt aufgrund der einzigartigen Architektur der Halle sehr hohe Anforderungen an die Planung und die Bauausführung. Um dieses äußerst komplexe Bauwerk herstellen zu können, ist eine enge Interaktion zwischen der Planung den Belangen der Ausführung erforderlich.

Teilweise wurden völlig neu entwickelte Lösungen für die Planung und den Bau des Schalendachs erforderlich, um die geforderte Präzision und die hohen architektonischen, statischen und brandschutztechnischen Anforderungen an die Konstruktion erreichen zu können.

Die sehr lange Laufzeit des Projektes vom Entwurf bis zur Realisierung brachte dabei nicht nur den Nachteil der sich fortschreibenden normativen und baurechtlichen Grundlage, die in der Planung nachzuführen war, sondern auch die Chance des technologischen Fortschritts mit sich.

Am 21. Juni 2023 wurde der letzte Kelch des Schalendachs ausgeschalt. Auch wenn das Schalendach und der Tiefbahnhof damit noch nicht fertiggestellt sind, markiert dieses Datum doch einen wesentlichen Meilenstein in der Geschichte dieses einmaligen Großprojektes.

Informieren Sie Sich auch auf YouTube über ZÜBLIN und das Projekt S21: <https://youtu.be/Zp4PJN1KMEI>

Literatur

- [1] SEILFRIED, G.; SANDNER, D.; MOK, D.: „Stuttgart 21, Formentwicklung und Modellierung der neuen Bahnhofshalle.“ SOFISTIK Seminar Lectures, 07.05.2004.
- [2] BECHMANN, R.; SCHMID, A.; NOAK, T.; SOBEK, W.: „Neuland in Planung und Realisierung: Die Kelchstützen des neuen Stuttgarter Hauptbahnhofs.“ Beton- und Stahlbetonbau, 114. Jahrgang, 05.2019.