Unbekannte Beiträge Robert Maillarts zur Konstruktion dünner Betonschalentragwerke

Autor(en): **Billington, David P.**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Schweizer Ingenieur und Architekt**

Band (Jahr): **102 (1984)**

Heft 22

PDF erstellt am: **28.03.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-75473

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

ren Dienst auf der Baustelle «Tramtunnel» in Zürich. Die grosszügige Einstellung der Investoren hat sich somit gelohnt.

Es ist unsere Aufgabe und unser Ziel, dem Unternehmer eine baustellengerechte Lösung des Staubproblems anzubieten, sei dies Übertage oder wie schon lange auch Untertage. In den letzten Jahren haben wir das Kapitel Energiekosten sehr ernst genommen und haben mit dem neuen Entstauber gleichzeitig den Anlagepreis erheblich senken können, ohne auf gute bis sehr gute Abscheidegrade verzichten zu müssen. Zum Schluss sei den Teilschnittmaschinen-Herstellern nahegelegt, sich des Stauberfassungsproblems bereits bei Entwicklung der Maschinen ernsthaft anzunehmen.

Drei Vorträge, gehalten anlässlich der FGU-VST-Tagung «Baulüftung von Untertagebauten» am 7. Dez. 1983 an der ETH Zürich

Adressen der Verfasser: *H. Butz*, Ing. HTL, Eltecna AG, Ingenieurbüro für Industrieanlagen, Postfach, 8048 Zürich; *R. Wälti*, Ing. HTL, Büro für Bau- und Verfahrenstechnik, Inhaber der Rowa AG, Untertage-Spezialmaschinen und Anlagebau, Alte Eschenbacherstr. 5, 8716 Schmerikon; *J.-Cl. Vuilleumier*, J.-Cl. Vuilleumier AG, 3250 Lyss.

Unbekannte Beiträge Robert Maillarts zur Konstruktion dünner Betonschalentragwerke

Von David P. Billington, Princeton

David P. Billington, Professor für Ingenieurwissenschaften an der Universität Princeton im Staate New Jersey (USA), ist neben seiner praktischen Tätigkeit ein profunder Kenner (und Liebhaber) der Technikgeschichte. Insbesondere hat es ihm das Werk des Schweizer Brükkenbauers Robert Maillart (1872–1940) angetan und ihn zu einem Buch angeregt, das seinesgleichen im technikgeschichtlichen Schrifttum sucht («Robert Maillart's Bridges. The Art of Engineering». Princeton University Press, 1979). Nicht genug damit. Der Autor geht weiter zurück in der Geschichte und hat ein Jahr später in einem Zeitschriftenaufsatz auch das Werk «Wilhelm Ritter: Teacher of Maillart and Ammann» gewürdigt (Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of the Structural Division, Vol. 106, No. ST5, 1980). Offensichtlich ist Billington im Begriff, eine Biographie des ehemaligen ETH-Professors zu schreiben und so gleichsam zu den Grundlagen vorzustossen, auf welche die dereinst weltberühmten Schweizer Brückenbauer gründeten. Billington kennt die Schweiz aus eigener Anschauung; mehrmals weilte er zu Studienaufenthalten an der ETH Zürich. Auf seine Veranlassung hin ist in Princeton auch der zeitgenössische Schweizer Brückenbau in Ausstellungen und Kolloquien dargestellt worden. Der nachfolgende Aufsatz, aus dem Amerikanischen von K. Ziegler-Hagger übersetzt, ist dem Jahresbericht 1981 der Schweiz. Zement-, Kalk- und Gipsfabrikanten entnommen.

Brücken und Hochbauten

Die Berühmtheit Robert Maillarts als Brückenbauer hat seine neuen Ideen für *Tragsysteme des Hochbaus,* insbesondere für dünne Schalentragwerke in Beton, etwas in den Hintergrund gerückt. Hier möchte ich nun zeigen, dass Maillart *wesentliche* Beiträge zu *Entwurf* und *Berechnung* von Betonschalentragwerken geleistet hat, noch vor den berühmten Arbeiten von *Dischinger* und *Finsterwalder* in *Deutschland;* seine berühmte *Zementhalle in Zürich* aus dem Jahre 1939 stellt für ihn nicht nur eine einzigartige und ungewöhnliche Lösung dar, sondern auch einen Höhepunkt *und* Wendepunkt seines Schaffens.

Maillarts hervorragende Karriere als Bauingenieur begann mit einem schlanken Schalentragwerk, das, obwohl heute vergessen, damals rasch als einzigartig und bedeutsam erkannt wurde; seine Laufbahn endete wiederum mit einem dünnen Schalentragwerk, das ebenfalls grosse Berühmtheit erlangte. Dazwischen schuf er eine kleinere Anzahl von Schalentragwerken und entwarf einige weitere. Bemerkenswerterweise zeigen alle diese Schalentragwerke dieselbe *Originalität* wie seine Brücken, die jedoch vielen seiner Hochbauten abgeht. Dünne Schalen geben dem Ingenieur die Gelegenheit, *Schönheit und Nützlichkeit zu vereinen,* denn hier kann das Tragwerk zur Form werden, die Feinheit des Tragsystems lässt sich *optisch* ausdrücken. Mit der Zürcher Zementhalle schuf Maillart ein Tragwerk, das zugleich die gesamte Form darstellte und unmittelbar die ausserordentliche Feinheit zum Ausdruck brachte, die nur dann möglich ist, wenn es das Ziel des Ingenieurs ist, *Stärke und Festigkeit eher durch die Formgebung als durch die Masse zu erreichen* (Bild 1). Sein Weg zu diesem vollendeten Kunstwerk begann im Jahre 1902 mit der Gründung der Firma Maillart und Co. in Zürich.

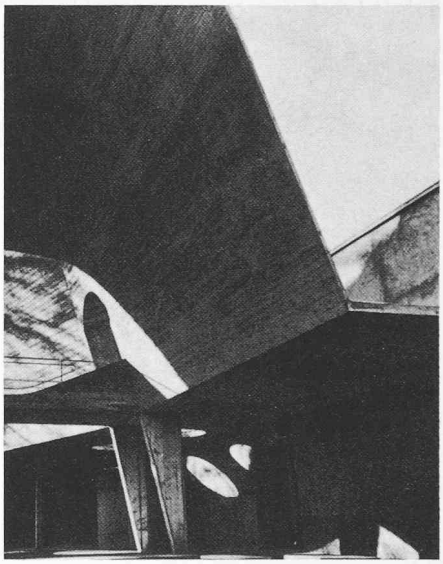


Bild 1.

Die Gasbehälter in St. Gallen

Zwischen dem 1. Februar und dem 15. Juni 1902 lebte die Firma Maillart mehr von Zuversicht als von Aufträgen. Endlich, gegen Ende Juni, erhielt Maillart seinen ersten Auftrag, nämlich zwei Gasbehälter *aus Stahlbeton* für die Stadt St. Gallen zu bauen. Die Stadt hatte ein Projekt ausgearbeitet (Bild 2) und hatte den Unternehmern erlaubt, alternative Vorschläge einzureichen, was Maillart auch tat (Bild 3) [1]. Da mehrere Varianten eingereicht wurden, zog die Stadt Prof. *François Schüle* (1860–1925) als Berater zu. Schüle, der gerade *Ludwig Tetmajer* (1850–1905) als Leiter der Eidgenössischen Materialprüfungsanstalt (EMPA) in Zürich abgelöst hatte, war im Begriff, in der Schweiz zum führenden Experten in Stahlbeton zu werden. Er empfahl Maillarts Variante, die im Sommer und Herbst 1902 gebaut wurde. Diese beiden Schalentragwerke haben historische Bedeutung; zum ersten weil sie zu jener Zeit die grössten dünnen, zylindrischen Schalentragwerke in Stahlbeton

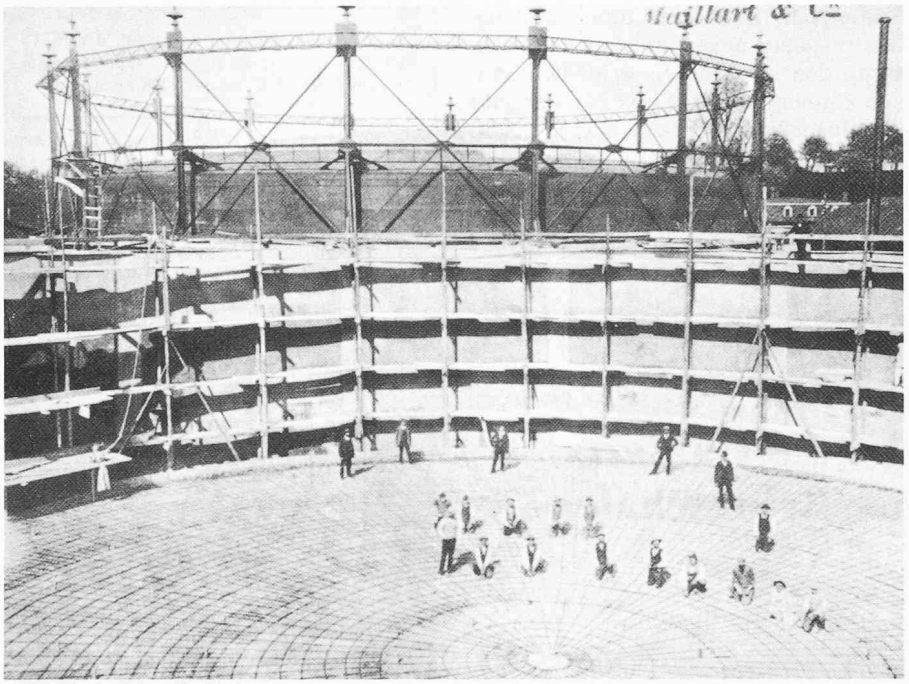


Bild 2.

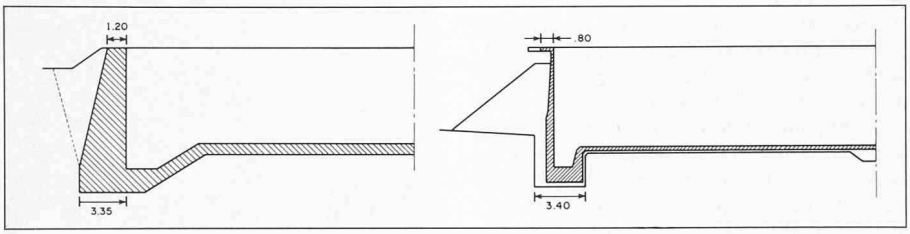


Bild 3.

waren und zweitens weil Maillart für sie die erste weitgehend korrekte Berechnungsmethode für dünne Schalen entwickelt hatte. Die vermutlich beste Übersicht über Tragwerke in Beton bis zum Jahre 1902 findet sich in *Christophes* Buch aus demselben Jahr. Christophe erwähnte, dass bis zum Jahre 1902 armierte Betonbehälter bis zu einer Kapazität von 5000 m³ gebaut worden waren, die also halb so gross waren wie die von Maillart [2]. Im weiteren führt Christophe einige typische Beispiele an, bei denen der grösste Durchmesser 14,6 Meter beträgt, während jeder von Maillarts Behältern einen Durchmesser von 40 Metern und eine Höhe von ungefähr 9 Metern aufweist. Es ist somit sicher, dass Maillarts Behälter zu ihrer Bauzeit im Jahre 1902 die grössten der Welt waren.

Im weiteren hatten die grössten Behälter, die *Edwin Thacher* in seinem Referat über den Fortschritt im Stahlbetonbau in den USA am internationalen Ingenieur-Kongress in *St. Louis* 1904 erwähnte, Kapazitäten von ungefähr 1500 m³ und maximale Durchmesser von etwa 8 Metern [3]. In der Tat waren diese Behälter vergleichsweise so klein, dass Schüle sich in seinem Vortrag in St. Louis über die Europäische Praxis im Stahlbetonbau bemüssigt fühlte, einen an sich nicht gerade in den Zusammenhang passenden Abschnitt beizufügen [4]:

> «Der Bau von Stahlbetonbehältern ist erwähnt worden. Es dürfte von Interesse sein festzuhalten, dass wir in der Schweiz Stahlbeton-Flüssigkeitsbehälter von sehr grossem Ausmass haben. Maillart + Co. aus Zürich hat in St. Gallen zwei Behälter mit 40 Metern Durchmesser, etwa 9 Metern Höhe und einem Fassungsvermögen von etwa 10 000 m³ erstellt. Wir haben mit diesen Stahlbeton-Konstruktionen sehr gute Erfahrungen gemacht.»

Dies sind die einzigen Bauwerke, die Schüle in seinem dreiseitigen Referat speziell erwähnte. Vermutlich wurde hier Maillarts Name auch erstmals in einer amerikanischen Publikation erwähnt.

Indem wir Maillarts Lösung mit derjenigen der Stadt St. Gallen vergleichen, können wir die Richtung erkennen, in welche seine Ideen bereits am Anfang seiner Laufbahn deuteten. Erstens ist die Betonkubatur in Maillarts Variante drastisch geringer. So braucht beispielsweise die Aussenwand im Projekt der Stadt etwa 2700 Kubikmeter gegenüber knapp 600 Kubikmetern bei Maillart. Dies liegt vor allem am unterschiedlichen Konzept: Da die Stadt eine nicht armierte Wand projektierte, war deren gewaltige Wandstärke notwendig, um die Zugspannungen niedrig zu halten, um damit Risse und Lecke zu vermeiden. Maillart hingegen nahm den Vorteil wahr, den der armierte Beton bot, um das Gesamtgewicht zu reduzieren und liess die Armierung die Zugspannungen übernehmen. Der zweite und mit obigem zusammenhängende Unterschied liegt in der Form, die Maillart wählte. Seine zylindrische Wand weist eine minimale Stärke von 0,2 Metern auf, verglichen mit 1,2 Metern im Projekt der Stadt, und die durchschnittliche Wandstärke liegt bei 0,46 Metern gegenüber 2,27 Metern. Die übliche Definition einer dünnen Schale setzt voraus, dass das Verhältnis von Krümmungsradius zu Dicke mindestens 20 beträgt [5]; bei Maillarts Projekt betrug dieses Verhältnis im Mittel etwa 45 gegenüber dem von nur 12 in der Variante der Stadt. Somit hätte die letzte ein Tragsystem ergeben, das sich praktisch wie eine Stützmauer verhalten hätte, während Maillarts Entwurf eine echte dünne Schale ist. Vor 1902 wurden zahlreiche Betontragwerke mit dünnen Wänden, gewölbten Dachkonstruktionen oder konischen Seitenwänden usw. gebaut. Aber keines war von einer solchen Grösse und einer solchen Schlankheit zugleich. Diese früheren Bauwerke konnten mit sehr einfachen Methoden berechnet werden, die bereits für Naturstein- und Stahlkonstruktionen entwickelt worden waren. So viel ich weiss, sind Maillarts Behälter die ersten mit einer solchen Form und Grösse, so dass sie ein neues Konzept für das Tragverhalten als wesentliche Grundlage für die Berechnung erforderten. Maillart hatte sein Konzept bereits für den *Hohlkasten-Querschnitt* bei seiner Brücke in *Zuoz* aus dem Jahre 1901 verwendet [6]; alle seine späteren Neuerungen im Stahlbeton entsprangen hieraus. Nach diesem Konzept müssen alle Elemente eines Stahlbetontragwerkes in monolithischer Bauweise zusammenwirken und einander beim Abtragen der Lasten unterstützen. Die einzelnen Teile wirken nämlich nicht als isolierte Elemente.

In seiner Zuozer Brücke hatte Maillart eine neue Form entwickelt, indem er berücksichtigte, dass die Fahrbahnplatte, die Hauptträgerstege und der gekrümmte Bogen zusammen als Hohlkasten Lasten abtragen können. Diese grundlegende Idee, sich bei der Bemessung das Zusammenwirken der einzelnen Elemente zunutze zu machen, warf allerdings für den Statiker beinahe unüberwindliche Schwierigkeiten auf. Sogar *Wilhelm Ritter* wusste nicht, wie der Hohlkasten-Querschnitt berechnet

werden sollte. In den 70er Jahren war dieses Problem immer noch Gegenstand von grösseren Forschungsprogrammen, ohne dass eine klare, wirklich befriedigende Berechnungsmethode entwickelt worden wäre. Dennoch haben sich Tausende von Tragwerken in Hohlkasten-Bauweise in den letzten 75 Jahren bewährt, da die Idee, die diesem System zugrunde liegt, einwandfrei und zuverlässig ist, sofern sie von einem erfahrenen Ingenieur angewandt wird.

Dieselbe Idee des Zusammenwirkens liegt Maillarts Konzept bei den Behältern in St. Gallen zugrunde. Maillarts Vorgehen bestand darin, sich vorzustellen, dass der Zylinder den gesamten Wasserdruck über Ringzugspannungen aufnimmt *und* die Zylinderwand im unteren Bereich wie ein vertikaler eingespannter Balken wirkt, der den gesamten Wasserdruck im unteren Bereich und ein sich verringender Anteil darüber mittels Biegespannungen aufnimmt. Maillart bewältigte das Bemessungsproblem mit *Diagrammen,* indem er zuerst abschätzte, wie sich die Zylinderwand verhalten könnte und anschliessend dieses Verhalten so aufzeichnete, dass er den anfänglichen Fehler herauslesen konnte. Durch sukzessives Korrigieren näherte er sich so der richtigen Lösung.

Als *Wuczkowski,* der Chefingenieur bei *Fritz von Emperger* war, im Jahre 1910 in der zweiten Ausgabe von «Von Emperger's Handbuch» [7] die Entwicklung in der Bemessung von zylindrischen Behältern zusammenfasste, erwähnte er, «dass die erste bekannte Studie dieser Art (welche das Ringtragverhalten und die Einspannwirkung der Bodenplatte berücksichtigte) in empirischer Art und Weise von der Firma Maillart + Co. für die Gasbehälter in St. Gallen durchgeführt worden ist». Mit empirisch meinte der Verfasser ein graphisches Verfahren. Somit war Maillarts Berechnungsmethode die erste korrekte Methode und bis zum Jahre 1907 auch die einzige, die *von Emperger* bekannt war. Sie beruhte auf dem einfachen graphischen Verfahren von Wilhelm Ritter: ihre Bedeutung jedoch ist weit grösser als der blosse Umstand, dass sie die erste korrekte Bemessung einer dünnen Schale war.

Indem Maillart das Tragverhalten als Wechselwirkung von zwei Systemen betrachtete (vertikale Fassdauben und horizontale Ringe), konnte er sehen, wie sie zusammenwirken mussten. Wenn nämlich der untere Teil der Zylinderwand dicker war als der obere, wie es auch sein sollte, so konnte er sich vorstellen, wie sich dieser untere Bereich weniger stark nach aussen bewegte als wenn er ebenso dünn gewesen wäre wie der obere Bereich. Auf diese Weise gelang es Maillart, eine anschauliche Methode zur Berechnung dünner Schalen zu entwickeln, die jegliche Variation in der Wandstärke berücksichtigen konnte. Seine Methode entsprang aus seiner räumlichen Betrachtungsweise des Tragverhaltens.

Eine weitere Lösungsmethode für dasselbe Problem entwickelte 1908 der deutsche Wissenschaftler *Hans Reissner,* der die allgemeine mathematische Theorie für dünne Schalen für den Spezialfall des Zylinders unter innerem Flüssigkeitsdruck weiter entwickelte. Dazu angeregt wurde Reissner zum Teil durch die 1907 vom Englischen ins Deutsche übersetzte, *erste vollständige Schalentheorie* (verfasst von *A.E.H. Love* und in zwei Bänden 1892–93 veröffentlicht). Reissners Lösungsweg war typisch für die aufkommende Betrachtungsweise des 20. Jahrhunderts, nach der die der Bemessung zugrunde liegende Berechnungsmethode von einer *einzigen mathematischen Theorie* abgeleitet sein sollte. Allerdings musste Reissner, da die allgemeine Theorie derart kompliziert ist, einige drastische Vereinfachungen einführen, wobei die wichtigste darunter die Beschränkung auf eine konstante oder linear abnehmende Wandstärke war (nach Reissner musste die Zylinderschale zuoberst eine Wandstärke von Null aufweisen, also eine rein dreieckförmige Querschnittsfläche haben). Da Reissner von einer allgemeinen mathematischen Theorie ausging, war er in den praktischen Anwendungsmöglichkeiten stark eingeschränkt. Trotzdem war es seine Lösungsmethode, die im Verlauf des 20. Jahrhunderts zur Standard-Methode wurde. Bereits im Handbuch aus dem Jahre 1910 wurde sie als wesentliche Bemessungsgrundlage hervorgehoben, obwohl Maillarts Methode immer noch unverändert aus der Ausgabe von 1907 übernommen worden war. In der dritten Ausgabe von 1923 schliesslich wurde Reissners Methode erweitert, andere mathematische Verfahren beigefügt und Maillarts Berechnungen ganz fallen gelassen. Das im englischen Sprachbereich am weitesten verbreitete Werk ist ein 1931 erschienenes Buch über Behälter, welches in der Folge noch zweimal herausgegeben wurde (1942 und 1954) und nur Reissners Methode erwähnte.

Der Haupteinfluss der *mathematischen Lösungsmethoden* lag im Schaffen einer wissenschaftlichen Berechnungstheorie, losgelöst von konkreter Formgebung, ferner im Aufstellen von Standardmethoden für die Berechnung, die für die Praxis verbindlich werden sollten und schliesslich in der Abkehr der Ingenieure von den konkreten und anschaulichen Methoden, die sie in den früheren Bemessungsverfahren verwendet hatten.

Es ging dabei nicht um eine Entscheidung zwischen mathematischer Strenge und Intuition oder zwischen Näherungsrechnungen und exakten wissenschaftlichen Verfahren. Die wichtigsten Unsicherheiten beim Stahlbeton konnten durch keine noch so rigorosen mathematischen Verfahren ausgeschaltet werden. Es war eher eine *Frage der Gewichtung.* Sollten Zeit und Denken des Ingenieurs vermehrt für immer kompliziertere Berechnungen zur Behebung analytischer Unsicherheiten verwendet werden oder sollten sie auf das Tragverhalten und auf die Formgebung verwendet werden? Dieser Konflikt war es, den Maillart während seiner gesamten Schaffenszeit beschäftigen sollte, und die Vollkommenheit seiner Werke wuchs in wissenschaftlicher *und* in gestalterischer Hinsicht, je weiter er sich von der mathematischen Tradition entfernte, die bereits vor dem Ersten Weltkrieg das Denken des Bauingenieurs zu beherrschen begann.

Die St. Galler Gaskessel waren eine *Pionierleistung,* selbst wenn sie in der Geschichte des armierten Betons vergessen worden sind. In ihnen verwendete Maillart eine *neue Form* (die Form der Behälterwand-Schnittfläche), erfand eine *neue Bemessungsmethode* und konstruierte die vermutlich grössten zylindrischen Behälter in Stahlbeton. Genau wie in Zuoz zeigten sich auch bei diesen in besonderem Masse einzigartigen Tragwerken einige *Schwierigkeiten.* Erstens wurde der Bau erschwert durch schlechte Baugrundverhältnisse, und zweitens waren die Behälter nicht dicht, als sie das erste Mal gefüllt wurden, wahrscheinlich der genannten Umstände halber. Maillart war in der Lage, den ersten Behälter zufriedenstellend zu flicken, indem er die Innenseite mit einer Zementmörtelschicht überzog, doch der zweite wies mehrere grosse Risse in der Bodenplatte auf. Scheinbar konnten auch diese schliesslich repariert werden und die Behälter bestanden weiter, bis sie nach dem Zweiten Weltkrieg zu Gebäuden umgestaltet wurden. Ein grosser Teil der ursprünglichen Betonkonstruktion steht immer noch, allerdings wird sie nicht mehr als Wasserbehälter verwendet.

Dünne Schalentragwerke aus den 20er Jahren

Während der folgenden zwölf Jahre, in denen auch seine Firma wuchs, entwarf und baute Maillart zahlreiche weitere

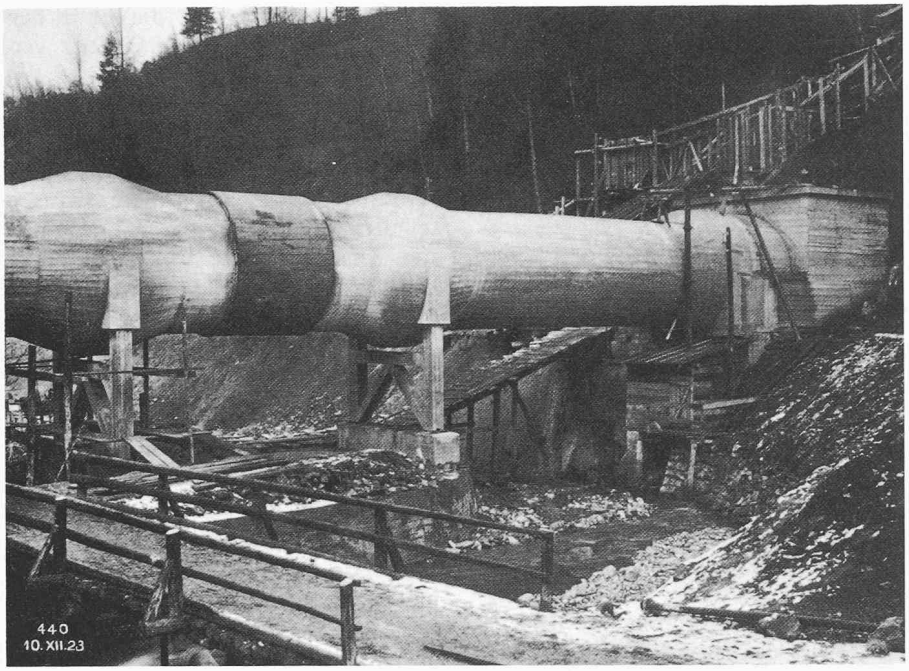


Bild 4.

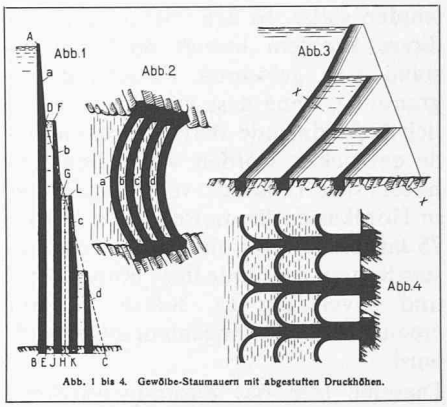


Bild 5.

Behälter und auch eine kleine Kuppel für den *Musik-Pavillon beim Bürkliplatz* in Zürich. Den grössten Teil seiner Energie widmete er dem Brückenbau, der Skelettbauweise und grossen Gebäuden. Als er nach dem Krieg aus *Russland* zurückgekehrt war, wo er seinen Besitz und beinahe sein Leben verloren hatte, wandte er sich ausschliesslich der *Projektierung* zu und schuf in den folgenden zwei Dekaden die wichtigsten Bauwerke, für die er heute so berühmt ist. In den 20er Jahren, als er nach Möglichkeiten suchte, sich in der Schweiz neu zu etablieren, befasste er sich mit den verschiedensten Konstruktionsproblemen, für die er auch prompt neue und überraschende Lösungsvorschläge präsentierte. In jedem dieser Fälle gab eine bestehende Lösung den Ansporn, die aber einen *baulichen Fehler* aufwies oder für die *zu viel Material verwendet wurde. In der Tat war für Maillart überflüssiges* Material schon ein Fehler an sich, das zumeist gar nicht eine grössere Sicherheit, sondern eine reduzierte Tragfähigkeit bringt.

Im Jahre 1921 entwarf Maillart für das *Kraftwerk Klosters-Küblis* einen *Betondruckstollen* [9]. Dabei wird das Rohr durch den inneren Druck belastet und wird von aussen durch den Fels gestützt. Einige dieser Stollen waren früher mit einem unregelmässigen Querschnitt nach dem Muster der Eisenbahntunnel aus dem 19. Jahrhundert gebaut worden. Im Mai 1920 war beim *Kraftwerk Ritom* ein solcher Druckstollen mit unregelmässigem Querschnitt unter dem Wasserdruck geborsten und – wie in der Schweiz üblich – erhielt dieses Ereignis grosse Publizität [10]. Dies war für Maillart Anlass, eine umfangreiche Artikelreihe zu schreiben, in der er die Problematik in *Ritom* darlegte und zeigte, wie seine eigene Lösung, die er bereits vor dem Krieg entwickelt und die sich in Klosters-Küblis bewährt hatte, dieses Problem lösen könnte. Die *Druckrohre* sind an sich *dünne Zylinderschalen*. Sie zeigen, wie sich Maillart eine sehr einfache Berechnung ausgedacht hatte, die dünnere Querschnitte als in Ritom rechtfertigte, jegliches Leck ausschloss und zudem zuverlässiger war. Seine *Druckrohr-Berechnungen* wurden später für das *Kraftwerk Amsteg,* für das *Kraftwerk Wägital* und sogar in *Österreich* angewendet.

Eine augenfälligere Anwendung dünner Schalentragwerke ergab sich beim Bau des *Wägital-Kraftwerks,* für das Maillart im Jahre 1924 die *Druckleitungsbrücke* über den *Trebsenbach* entwarf. Hier wurde erstmals eine *Druckrohrleitung direkt als Brücke* verwendet, die ihr eigenes Gewicht und das des Wassers ohne zusätzliche Tragstruktur trug [12]. Maillarts Berechnung verwendete die fortschrittlichsten Theorien der Zeit [13], die Formgebung ist einfach und klar, auch wenn die Feinheit des Schalentragwerkes unsichtbar bleibt. Ein Jahr später entwarf er für das *Kraftwerk Châtelard im Wallis* eine weitere gechlossene Rohrbrücke. Diese geschlossene Röhre kann man sich als Faltwerk vorstellen, bei dem die horizontalen Flächen die Last in Querrichtung durch Plattenbiegung aufnehmen und die vertikalen Stege in Längsrichtung als dünnwandige Träger wirken [14]. Bei den Projekten Trebsenbach und Châtelard hat Maillart die Funktionen Wasserführung und Tragstruktur in einem einzigen dünnen Schalentragwerk vereinigt. Beide neuartigen Tragsysteme erhielten damals beträchtliche Publizität in der Fachwelt, auch wenn sie später von Autoren ignoriert wurden.

Unter den zahlreichen neuartigen, aber nicht realisierten Tragwerksformen, die Maillart in den 20er Jahren vorgeschlagen hatte, ist der *Entwurf für eine bogenförmige Beton-Staumauer* sicher der ungewöhnlichste. Er zeigt, wie Maillart die Lösung eines Konstruktionsproblems immer in der Verwendung dünner Scheiben anstelle von schweren Massen sah. In den 20er Jahren wurde die Bogenmauer langsam «populär» als eine Alternative zu den massiven Schwergewichtsmauern. Hier war der von Maillart eingeschlagene Weg ähnlich dem wie für die Behälter in St. Gallen; dort hatte die Stadt eine stützmauerähnliche Form vorgeschlagen, während Maillart ein *Ring-Kragarm-System* entwarf.

In der «Schweizerischen Bauzeitung» vom 4. Februar 1928 waren verschiedene Beispiele von unlängst in Frankreich gebauten *Schwergewichtsmauern* publiziert worden, was Maillart anspornte, einen Artikel zu schreiben, in dem er ein grundsätzlich neues Konzept anhand von zwei Lösungsvorschlägen zeigte [15]. Im ersten wird eine *Stützmauer als eine Reihe dünner zylindrischer Schalen* vorgesehen, die in der *horizontalen Ebene als Bogen* und in der *vertikalen als Kragarm* wirken (Bild 5). Zwischen jeder Bogenmauer befindet sich ein mit Wasser gefüllter Hohlraum. Die Bogenmauer auf der Reservoirseite ist die höchste. Die nächste Bogenmauer ist niedriger, und das Wasser zwischen beiden Mauern reicht bis zur Höhe der niedrigeren Mauer, so dass die höhere nur den Wasserdruck aufzunehmen hat, der der Höhendifferenz zwischen den beiden Bogenmauern entspricht. Für die weiteren Bogen-

mauern gilt dasselbe, so dass sich eine Reihe von sehr dünnen zylindrischen Schalen ergibt, von denen jede nur einen Teil der gesamten Druckhöhe aufzunehmen hat. Maillarts zweite Lösung ergibt ähnlich niedrige Wasserdrücke, aber diesmal durch *doppelt gekrümmte Schalen,* die durch *Zwischen-Widerlager* getragen werden.

In einem zweiten Artikel aus dem gleichen Jahr [16] zeigt Maillart auf *numerischem* Wege, wie sein Entwurf nicht nur die Spannungen infolge Wasserdruck reduziert, sondern auch zu geringeren Spannungen infolge *Rippenverkürzung* und *Temperaturänderungen* führt. Er demonstriert anhand dieses Beispiels seine Leitidee, dass die *Geometrie und nicht die Masse wirtschaftliche und dauerhafte Bauwerke ergibt.* Maillarts Leitidee wies allerdings immer auch noch einen dritten Aspekt auf, nämlich dass Tragwerke aufgrund ihrer Geometrie nicht nur wirtschaftlicher und dauerhafter sondern auch in ihrem Äusseren viel ausdrucksvoller sein können. Sie können, wie er sich ausdrückte, *gleichzeitig rationaler und schöner sein.* Diese grosse Idee brauchte eine solche Problemstellung, wo Schlankheit offen sichtbar gemacht werden kann, ohne dass die primären Funktionen beeinträchtigt werden. Eine solche Wirkung konnte am besten realisiert werden bei Brückenbauwerken oder bei Dachkonstruktionen. Obwohl es an sich möglich wäre, seine ausgesteiften Bogenbrücken als dünne zylindrische Schalentragwerke zu bezeichnen, möchte ich hier betonen, dass Maillarts Einfluss auf die Entwicklung der Schalentragwerke auch von seinen *Dachkonstruktionen* herrührt, denen wir uns abschliessend zuwenden möchten.

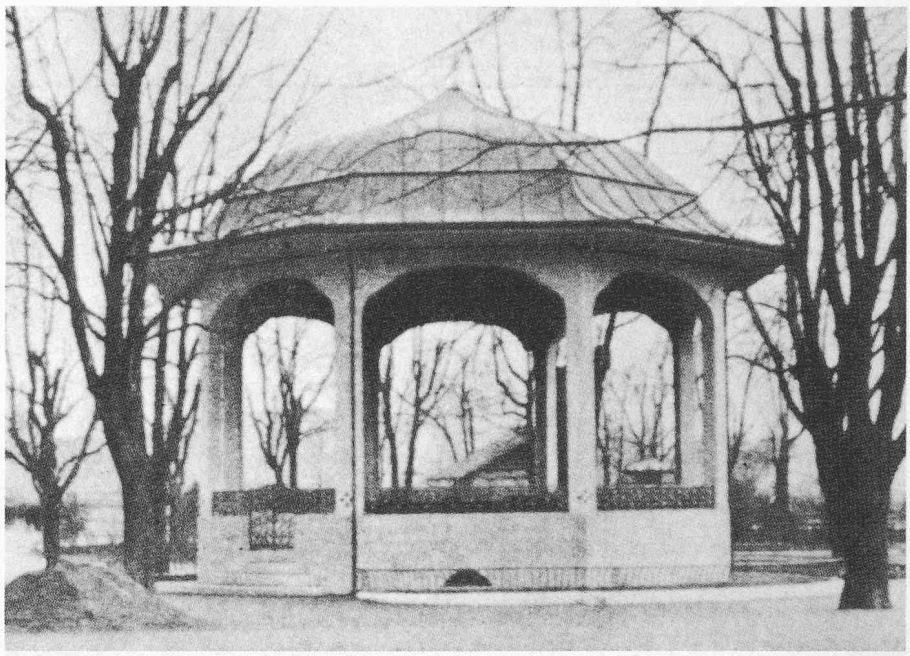


Bild 6.

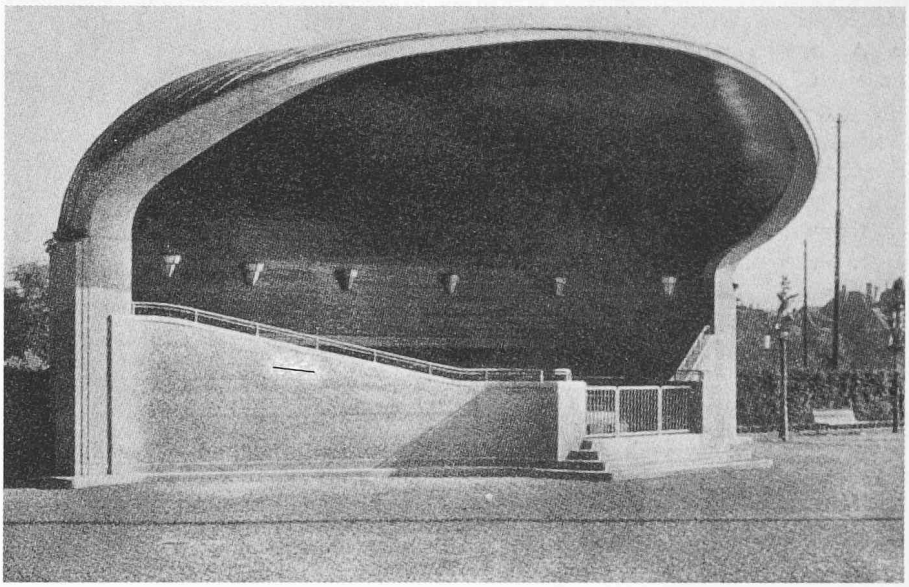


Bild 7.

Höhepunkt in Zürich

Maillart hat in Zürich *drei Pavillons* entworfen, von denen jeder ein dünnes Schalentragwerk darstellt und jeder gut dokumentiert ist. Seine *Zementhalle* aus dem Jahre 1939 (Bild 1, 10) bildet den Höhepunkt unter seinen dünnen Schalenkonstruktionen, aber auch einen *Übergang vom Problemkreis der Bogenbrücken zu den Dachkonstruktionen.*

Das erste Schalentragwerk in Zürich, das übrigens immer noch am *Bürkliplatz* steht (Bild 6), ist der *Musikpavillon* aus dem Jahre 1908, dessen generelle Form vom Stadt-Architekten festgelegt wurde, während Maillart Ingenieur und Projektleiter war [17]. Die dünne Schale ist unsichtbar, sie wird verdeckt

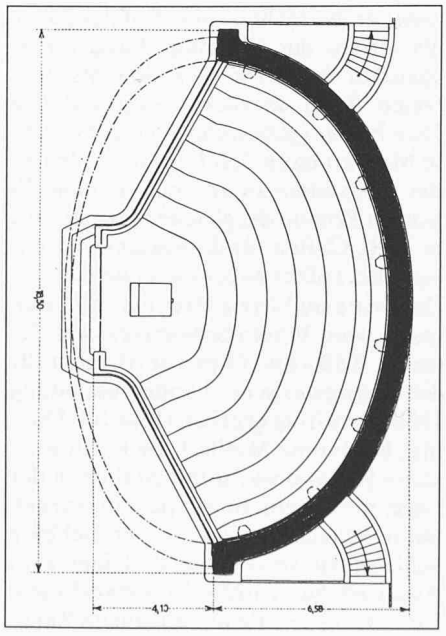
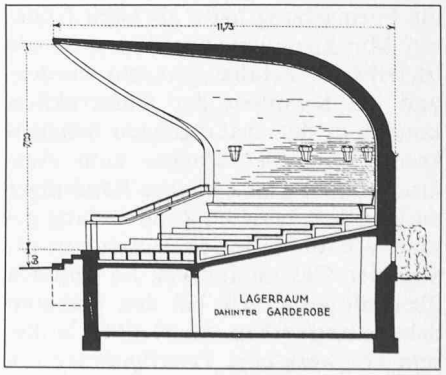


Bild 8.

Bild 9.



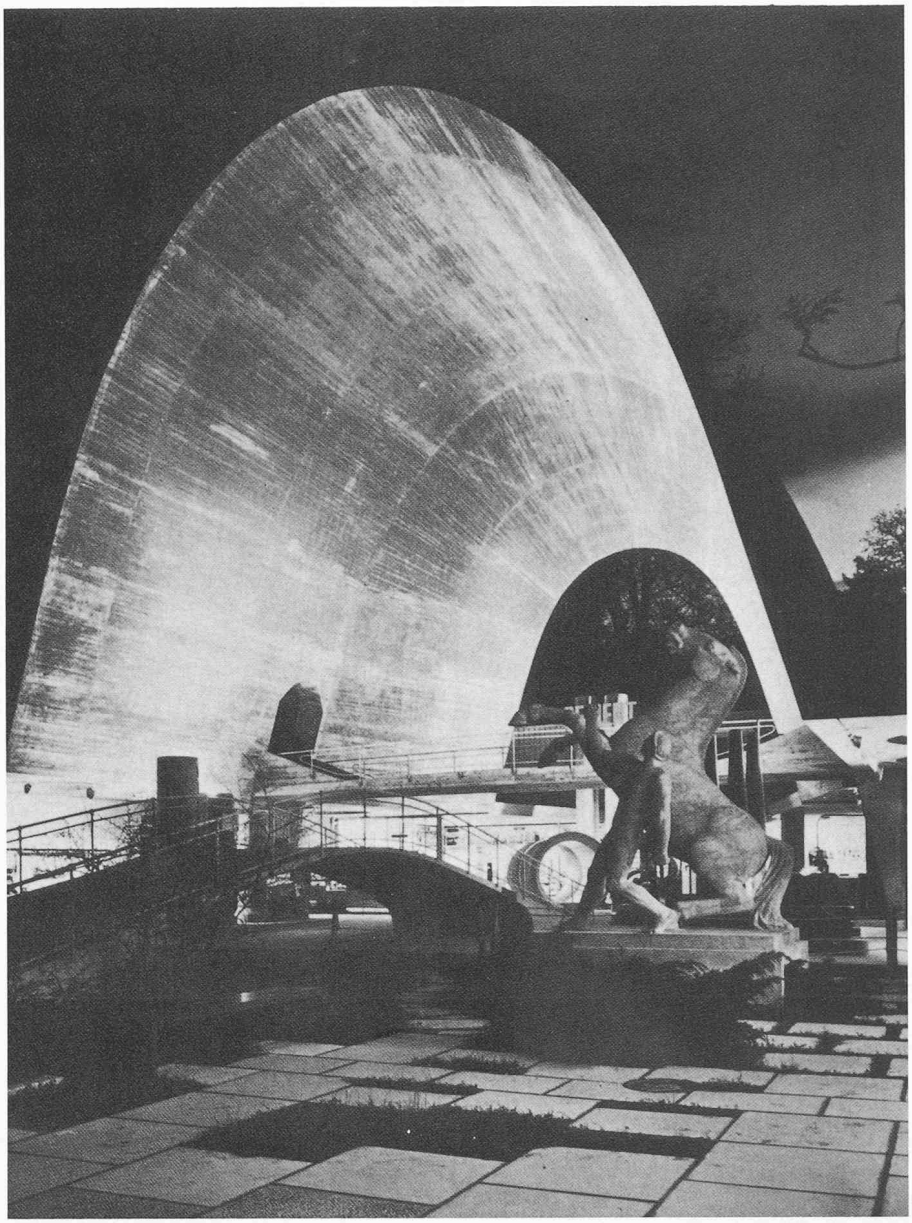


Bild 10.

durch den achteckigen Rahmen, der der kleinen Kuppel als Randträger dient. Das zweite Schalentragwerk wurde 1933 erbaut, ebenfalls als *Musikpavillon* für die *Zürcher Sport- und Grünanlagen* im *Sihlhölzli* [18], Bild 7-9. Hier arbeitete Maillart mit dem Stadtarchitekten *H. Herter* zusammen, mit dem er bereits vor dem Krieg gearbeitet hatte, aber es scheint, dass diesmal der Ingenieur einen grösseren Einfluss auf die Formgebung hatte als beim früheren Musikpavillon. Die dünne Schale ist teilweise sichtbar gemacht worden, und die Kühnheit der Konstruktion kommt in der auskragenden Schalenkonstruktion des Daches zum Ausdruck. Ein äusserst kleiner Randträger entlang dem äusseren Rand verbirgt gerade, wie dünn die Schalenstruktur ist, aber der Gesamteindruck ist dennoch überwältigend. Wie bei den früheren Schalentragwerken sah Maillart in diesem Tragwerk eine *Verschmelzung von zwei einfachen Tragsystemen:* die *auskragende Fläche* und der *starre Rahmen;* er betrachtete die Schalenfläche als ein in der hinteren Wand eingespannter Kragarm, der sich bis zum freien Rand erstreckt. Aufgrund von Durchbiegungsberechnungen bestimmte Maillart dann den Lastanteil, den jedes Tragsystem zu übernehmen hat. Es war im Prinzip die gleiche Methode, die er in St. Gallen für die Gaskessel dreissig Jahre früher angewendet hatte.

Der dritte und letzte Pavillon in Zürich wurde vom Verein Schweizerischer Zement-, Kalk- und Gips-Fabrikanten für die Schweizerische Landesausstellung 1939 in Auftrag gegeben (Bild 10). Diesmal bestimmte Maillart die Form ganz allein [19] und war somit endlich in der Lage, die bei einem richtig bemessenen Beton-Schalentragwerk erreichbare Schlankheit vollständig und klar zum Ausdruck zu bringen. Er entwarf diese 6 cm starke Schale ohne jegliche Rand-

Literaturhinweise

[1] *Schlussbericht,* City of St. Gallen, 1906, p.8

[2] *Christophe, P.:* «Le Béton armé et ses applications», Librairie Polytechnique, Paris et Liège, 2nd ed., 1902, p. 351

[3] *Thacher, E.:* «Concrete and Concrete-steel in the United States», Transactions, American Society of Civil Engineers, vol. 54E, 1905, 433-434

[4] *Schüle, F.:* «Discussion», Transactions, ASCE vol. 54E, 1905, p. 551

[5] *Novozhilov, V.V.:* «Thin Shell Theory», 2nd ed., Groningen, 1964, p. 2

[6] *Billington, D.P.:* «Robert Maillart's Bridges: The Art of Engineering», Princeton University Press, Princeton, 1979, chapter 3

[7] For Maillart's bid and design see «Handbuch für Eisenbetonbau», vol. III, ed. by E. von Emperger, Verlag von W. Ernst & Sohn, Berlin 1907, p. 410

[8] *Reissner, H.:* «Über die Spannungsverteilung in zylindrischen Behälterwänden», Beton und Eisen, vol 7, no. 6 (1908), pp. 150-155

[9] *Marquardt, E.:* «Rohrleitungen und geschlossene Kanäle», Handbuch für Eisenbetonbau, vol. 9, 4th ed., Berlin 1934, p. 605

[10] *Jegher, C.:* «Vom Ritom-Kraftwerk der SBB», Schweizerische Bauzeitung, Bd. 76, Heft 2 (July 10, 1920): pp. 19-20

[11] *Maillart, R.:* «De la construction de galeries sous pression intérieure», Bulletin Technique de la Suisse romande, vol. 48, nos. 22, 23, 25 (1922) and vol. 49, nos. 4 and 5 (1923)

[12] *Marquardt, E.:* op. cit., pp. 651-655

[13] *Maillart, R.:* «Statische Berechnung», Kraftwerk Wägital, 1923

[14] *Bill, M.:* «Robert Maillart», 3rd ed., Zürich, 1969, pp. 52-55

[15] Schweizerische Bauzeitung, Bd. 91, Heft 5 (February 4, 1928), p. 60, and R. Maillart, «Gewölbe-Staumauern mit abgestuften Druckhöhen», Schweizerische Bauzeitung, Bd. 91, Heft 15 (April 14, 1928), pp. 183-185

[16] *Maillart, R.:* «Die Wahl der Gewölbestärke bei Bogenstaumauern», Schweizerische Bauzeitung, Bd. 92, no. 5 (August 4, 1928), pp. 55-56

[17] *Moser, A.:* «Der Musikpavillon in der Stadthausanlage in Zürich», Beton- und Eisen-Konstruktionen, vol. 1, no. 1 (July 30, 1909), pp. 1-4

[18] *Maillart, R.:* «Die Zürcher Sport- und Grünanlagen im neuen ‹Sihlhölzli›: Konstruktives», Schweizerische Bauzeitung, Bd. 101, Heft 9 and 10 (March 4 and 11, 1933), pp. 103-105

[19] «Schweizerische Landesausstellung Zürich, 1939. Baubericht Ende August 1938». Schweizerische Bauzeitung, Bd. 112, Heft 10 (3. September 1938), pp. 126-128. Diese erste offizielle Publikation über die Zementhalle zeigt die Pläne und ein Modell mit der Anschrift «Die Zementhalle von Ing. Robert Maillart, Zürich-Genf». In späteren Publikationen ist auch der Architekt *H. Leuzinger* erwähnt, doch gibt es keine Hinweise auf seine Mitwirkung bei der Gestaltung der Betonschale. Leuzinger hat die Halle der keramischen Industrie entworfen, p. 127

[20] *Roš, M.:* «Ergebnisse der Belastungsversuche an der Zementhalle der Schweizerischen Landesausstellung Zürich, 1939», Bericht 99, Verein Schweizerischer Zement-, Kalk- und Gips-Fabrikanten, Zürich, 1940, pp. 21-59

träger, einzig getragen durch zwei innere bogenförmige Rippen. Ein Durchgang wirkt als Bindeglied, das die einzelnen Bogenrippen zusammenschloss. Wiederum stellt sich Maillart die dünne Schale als Tragwerk vor, das Lasten auf zwei verschiedene Arten aufnimmt: in Querrichtung als bogenförmige Streifen und in Längsrichtung als Unterzüge, die durch die tief hinuntergezogenen Randbereiche gebildet werden. Die Bogenrippen dienen als Aussteifung gegen Beulen und waren bemessen, die gesamte statische Last, die von der Schale übertragen wird, aufzunehmen. Die horizontalen Schalen-Randplatten versteifen die Schale zusätzlich.

Der *Belastungsversuch* bis zum Bruch wurde von Maillarts engem Freund Prof. *Mirko Roš* zwischen dem 26. Januar und 9. Februar 1940 durchgeführt. Maillart war zugegen und verfolgte die endgültige Zerstörung seines letzten und grössten Schalentragwerkes. Eine Photographie zeigt ihn zwischen den Trümmern stehend. Später äusserte er sich gegenüber seiner Tochter, hier habe, was als Eierschale begonnen, sich schliesslich als Elefant entpuppt. Roš bemerkte in den Schlussfolgerungen zu diesem Versuch [20]: «Die Synthese des meisterhaft gestaltenden Geistes Maillarts beherrscht auch in diesen seinen Werken die Analyse der konstruktiven Einzelgedanken.» Roš wusste wahrscheinlich besser als irgendeiner seiner Zeitgenossen, wie Maillarts klares Denken und vereinfachende Berechnungsmethoden seinem meisterhaften Gestaltungssinn gedient haben. Als Roš die Zusammenfassung am 1. August 1940 schrieb, war Maillart gerade drei Monate tot. Niemand hat in technischer Hinsicht mehr für das Weiterleben von Maillarts Gestaltungsideen beigetragen als Roš. Seine einzigartigen Berichte sind nicht hoch genug einzuschätzen. Besonders der über die Zürcher Zementhalle ist ausserordentlich gut dokumentiert und weist wie kein anderer auf die Tragreserven dünner Schalenkonstruktionen in Beton hin.

Verdankungen

Dieser Artikel entstand aus den Forschungsarbeiten für eine Biographie über *Robert Maillart* und wurde finanziell unterstützt durch den Schweizerischen Nationalfonds, durch die Stiftung für humanitäre Wissenschaften und durch den Verein Schweizerischer Zement-, Kalk- und Gips-Fabrikanten. Von grosser Bedeutung für diese Forschung war auch die enge Zusammenarbeit mit Madame *Marie-Claire Blumer-Maillart*, der Tochter *Maillarts*, sowie mit ihrem mittlerweile verstorbenen Mann, *Eduard Blumer*.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *D.P. Billington*, Professor of Civil Engineering, School of Engineering/Applied Sciene, Princeton, New Jersey 08544.

Umschau

Preisgekrönte Eisenbahn-Spannbetontrogbrücke in den Niederlanden

Die eingleisige Strecke Enkhuizen–Amsterdam (50 Züge/Tag) wird mit diesem Bauwerk schienenfrei in den Bahnhof Zaandam an der stark befahrenen zweigleisigen Strekke Amsterdam–Alkmaar eingeführt. Die Brücke (Bild 1) kreuzt zwei Streckengleise und eine Bundes- und zwei Ortsstrassen; sie ist 1,3 km lang und der mit trogförmigem Überbau ausgeführte Teil 735 m lang mit 97 bis 165 m Fugenabstand; die Einzelspannweiten haben bis 39 m Länge. Die räumlich gebogene Brücke hat einen Bogen von 550 m Halbmesser, und für die vertikalen Ausrundungen beträgt der Halbmesser 10 km.

Der Brücken*überbau* ist an Ort und Stelle in Spannbeton ausgeführt. Sein Querschnitt hat U-Form (Trogquerschnitt) und ist 7,20 m breit und gleichbleibend 2,00 m hoch. Die Bauhöhe beträgt bei direkter Schienenauflagerung nur 0,83 m von Schienenoberkante bis Unterseite Überbau und die Hauptträgerbreite 1,25 m. Der Überbau ruht auf Stahlbeton*stützen*, und zwar 32 Einzelstützen von 0,90 m ∅ und fünf Festpunktstützen (Bild 1).

Betontechnologie

Für den Überbau ist ein Beton B 37,5 (Klasse II) gefordert. Mit Zuschlägen 0/31,5 mm, 360 kg Zement Klasse HA/m³ Festbeton und einem Plastifizierer erzielte man bei einem Wasserzementwert *(W/Z)* von 0,47 im Alter von 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 44,2 N/mm² – ermittelt an 25-cm-Würfeln – bei 2,42 kg/dm³ Raumgewicht. Der Beton der Stützen sollte einem Beton B 30 entsprechen; seine Druckfestigkeit betrug im Alter von 28 Tagen 52,5 N/mm².

Als *Bewehrung* wurden in den Überbau für die Längsvorspannung 50 ∅ 7 mm FeP 1670 BBRV (nur auf 165 m Überbaulänge) und 16 ∅ 12,9 mm FeP 1860 Cona eingebaut sowie für die Quervorspannung an den Abschnittsenden ∅ 32 mm Dywidag; das sind 35 kg Spannbewehrung. Zusammen mit 125 kg FeB 400 beträgt der Bewehrungsgrad der Überbauten 160 kg je m³ Festbeton. Bei den Stützen beträgt der Bewehrungsgrad 250 kg FeB 400/m³ Festbeton.

Bauausführung

Der Überbau wurde in 97 bis 165 m langen Teilstücken betoniert: zuerst der untere Teil der beiden Hauptträger, dann die Fahrbahnplatte und danach der obere Teil der Hauptträger. Dabei kühlte man einige Zeit den Beton der Hauptträger und vermied so Rissbildung und innere Spannungen. Bei dem starken Bewehrungsgrad musste der Beton entsprechend verarbeitbar sein. Die Schalung für diese Ortbetonausführung ruhte auf einem flachen I-Trägerrost (450/500 mm), der sich auf Hilfsstützen neben dem Gleis abstützte; so wurde zwar das elektrische Lichtraumprofil der darunter liegenden

Bild 1. Eingleisige Spannbeton-Eisenbahnbrücke von 1,3 km Länge im Bahnhof Zaandam in den Niederlanden mit Ortbeton-, Festpunkt- und Fertigteil-Einzelstützen

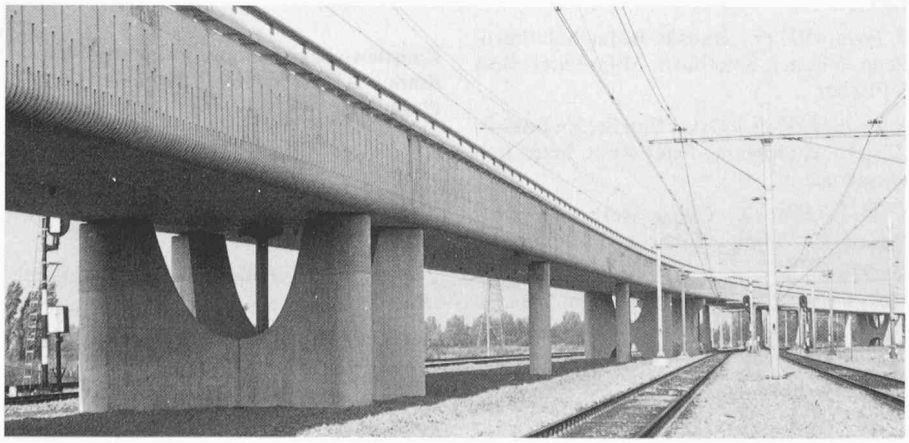


Bild 2. Blick in den Trog des Überbaus mit schallschluckender Auskleidung der Wände und direkter Schienenauflagerung

