

1

Konstruktionsgeschichte

Alles an diesem Teil Italiens ist seltsam, dachte er. Sogar die rostrote Erde in der Umgebung von Puteoli hatte etwas Magisches; wenn man sie mit Kalk vermischte und ins Meer warf, verwandelte sie sich in Stein. Dieses Puteolanum, wie es zu Ehren seines Herkunftsortes genannt wurde, war die Entdeckung, die Rom verwandelt hatte. Außerdem hatte es seiner Familie ihren Beruf ermöglicht, denn was früher mühsam aus Ziegeln und Stein konstruiert werden musste, konnte jetzt über Nacht gebaut werden.

(Aus: Robert Harris, Pompeji)

1.1 Römischer Beton

Ob die betontechnologischen Kenntnisse der Römer Ergebnis systematischen Experimentierens waren oder ob die Entdeckung der hydraulischen Wirksamkeit der am Golf von Neapel vorgefundenen Puzzolane eher zufälliger Natur war, bleibt heute weitestgehend der Spekulation überlassen. Tatsache ist, dass die Verwendung von Beton den Aufbau der Infrastruktur des römischen Weltreiches ganz entscheidend vorangebracht hat. Dabei konnten die römischen Baumeister auf Naturbeobachtungen und auf Erfahrungen anderer Völker des Altertums zurückgreifen: Breccien oder Nagelfluh sind verfestigte Sedimentgesteine, deren natürliche Erscheinungsformen einem Beton sehr nahekommen. Die „Zuschläge“ – das sind in diesem Fall rollige Kiese oder kantige Gesteins- und Mineralstücke – werden durch tonige, kalkige oder kieselige Bindemittel verkittet und verfestigt.

Auf der anderen Seite reichen die Erfahrungen mit hydraulischen Mörteln bis zu den Phöniziern zurück, die schon um 1000 v. Chr. fein gemahlenes Ziegelmehl mit Luftkalk mischten. Später verwendeten die Griechen als Bindemittel für ihr Gussmauerwerk (Emplekton) gemahlenes vulkanisches Gestein der Insel Santorin. Noch ältere Zeugnisse der Verwendung hydraulischer Bindemittel sollen in den Karpaten bei Lepenski Vir als Estrichplatten erhalten sein [1].

Sicher kam den Römern zugute, dass die Lagerstätten der als natürliche hydraulische Bindemittel verwendeten vulkanischen Tuffe in Puzzolaneum (heute: Pozzuoli) am Golf von Neapel vergleichsweise verkehrsgünstig lagen. So konnten



Abb. 1.1 Römische Wasserleitung, Detail.

die Puzzolane auf dem Seeweg einfach verschifft werden. Es wurden aber auch alternative Lagerstätten erkundet. In Rom verwendete man Puzzolane aus den Albaner Bergen und in Germanien wurde man in der Eifel fündig. Und so wurde für den Beton der römischen Bauten in Trier und Köln vorwiegend Trass als Bindemittel verwendet. Dass hydraulische Bindemittel unter Wasser erhärten, widerstandsfähig gegen Feuchteinwirkung bleiben und im Vergleich zum Luftkalk auch höhere Druckfestigkeiten entwickeln, waren Vorteile, die das neue Material, vor allem im Hafenbau sowie bei der Errichtung von Wasserleitungen (Abb. 1.1) und Zisternen, zum Einsatz kommen ließ. Aber auch beim Bau massiver Wand- und Gewölbekonstruktionen war es jetzt erst möglich, eine mehr oder weniger gleichmäßige Festigkeit über den gesamten Querschnitt und gleichzeitig eine hohe Dauerhaftigkeit zu erreichen. Der im frühen Altertum verwendete Luftkalkmörtel benötigt CO_2 – das im Allgemeinen aus der Umgebungsluft kommt – zum Erhärten. Der eingeschränkte Luftzutritt zum Innern massiver Bauteile hat zur Folge, dass dort die Erhärtung nur außerordentlich langsam voranschreiten kann oder ganz zum Erliegen kommt.

Zu den materialtechnologischen Vorteilen des Betons treten auch arbeitstechnologische und damit ökonomische Aspekte. Nach wie vor war der Mauerwerksbau eine Konstruktionsform, die von Römern vor allem im Brückenbau beherrscht und weiterentwickelt wurde. Allerdings erfordert diese Bauweise gutes Material und ausgebildete Fachleute auf der Baustelle. Es ist gut nachvollziehbar, dass sich der Beton auch für Wände und gewölbte Konstruktionen durchsetzte, wenn ein geeignetes Bindemittel in ausreichendem Umfang zur Verfügung stand und wenn man sich einen schnelleren und kostengünstigeren Bauablauf versprach. Das wird insbesondere bei den römischen mehrschaligen Wandbauweisen deutlich. Hier werden die steinsichtigen Oberflächen im wahrsten Sinne des Wortes mehr und mehr ausgedünnt. Tragende Funktion

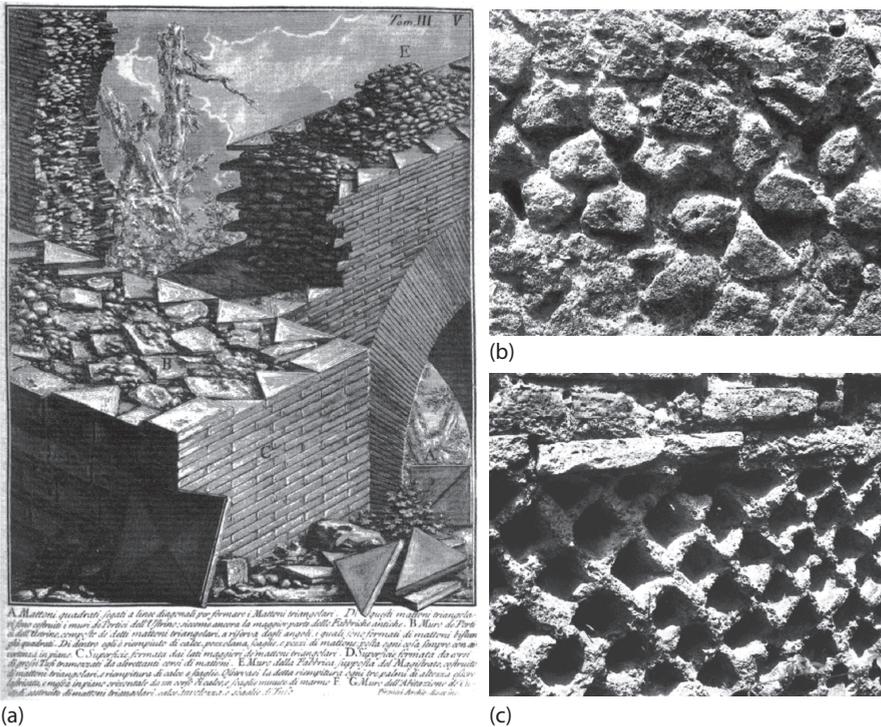


Abb. 1.2 Römische Wandkonstruktionen. (a) Nach Piranesi 1756 aus [3]; (b) *opus incertum* aus [2]; (c) *opus reticulatum* (Außenschale verwittert) aus [2].

übernimmt ausschließlich der Kern aus Beton. Wandkonstruktionen, bei denen ganz auf Außenschalen aus Natur- oder Ziegelsteinen verzichtet wurde, nannte man *opus caementitium*. Mit diesem Begriff wird heute häufig römischer Beton ganz allgemein bezeichnet. Andere mehrschalige Mauerwerkskonstruktionen mit sichtbaren Außenschalen aus behauenen Naturstein und Ziegeln werden nach ihren Fugenmustern unterschieden: Beispiele sind *opus reticulatum* und *opus spicatum*, bei dem die Steine in der Diagonalen bzw. in einem Fischgrätmuster verlegt wurden. Beim *opus incertum* bestehen die Außenschalen aus unbehauenen Bruchsteinen (Abb. 1.2).

Charakteristisch für römischen Beton ist die Einbettung größerer Zuschläge (Ausfallkörnung) sowie die Verwendung von Ziegelsplitt. Bei systematischen Untersuchungen an Materialproben aus gut erhaltenen Bauwerken ergaben sich Rohdichten zwischen 1,7 und 2,0 kg/dm³. Die Druckfestigkeiten lagen in der Größenordnung zwischen etwa 6 und 20 N/mm² [2].

Gelegentlich finden sich in römischem Beton auch Eiseneinlagen in Form von Klammern oder geschmiedeten Bändern. Meist war hierbei wohl beabsichtigt, im Bereich von Fugen einen Verbund herzustellen. Oder man kann – so z. B. bei einer Heizungsanlage – die vorhandenen Eisenbänder auch als Versuch deuten, bei erhöhter thermischer Beanspruchung eine bessere Verteilung der Risse zu erzielen. Systematisch bewehrt wurde der Beton der Römer nicht. Das ist mit

ein Grund dafür, dass zahlreiche Zeugnisse dieser Konstruktionsform bis heute sehr gut erhalten sind: Da keine Bewehrung eingelegt wurde, gibt es auch keine Bewehrungskorrosion.

Im deutschsprachigen Raum finden wir die wichtigsten Zeugnisse dieser Zeit in Köln (Stadtmauer, Hafenspeicher, Eifel-Wasserleitung) und Trier (Basilika, Dom, Kaisertherme).

Von den römischen Bauten in Italien sollen hier nur zwei wichtige Beispiele genannt werden: Eines der ältesten Zeugnisse für den Einsatz von Beton im konstruktiven Ingenieurbau sind die Hafenanlagen von Cosa aus dem 1. Jh. v. Chr., etwa 120 km nördlich von Rom gelegen. Das eindrucksvollste Bauwerk aus Beton, das uns die Antike hinterlassen hat, ist wohl das Pantheon (2. Jh. n. Chr.). Die Kuppel überspannt 43 m mit einer Gesamtdicke, die von etwa 3,70 m am Auflager auf etwa 1,30 m im Scheitel abnimmt (Abb. 1.3). Der Beton wurde mit Zuschlägen aus Tuff und Bims hergestellt, um das Eigengewicht der Konstruktion zu reduzieren. Die räumliche Wirkung des Bauwerks wird davon geprägt, dass für die Wandhöhe des Rundbaus und für den Radius der Kuppel identische Abmessungen gewählt wurden. Mit anderen Worten: Eine Kugel mit einem Durchmesser, der der Spannweite der Kuppel entspricht, ließe sich in den Raum einschreiben.

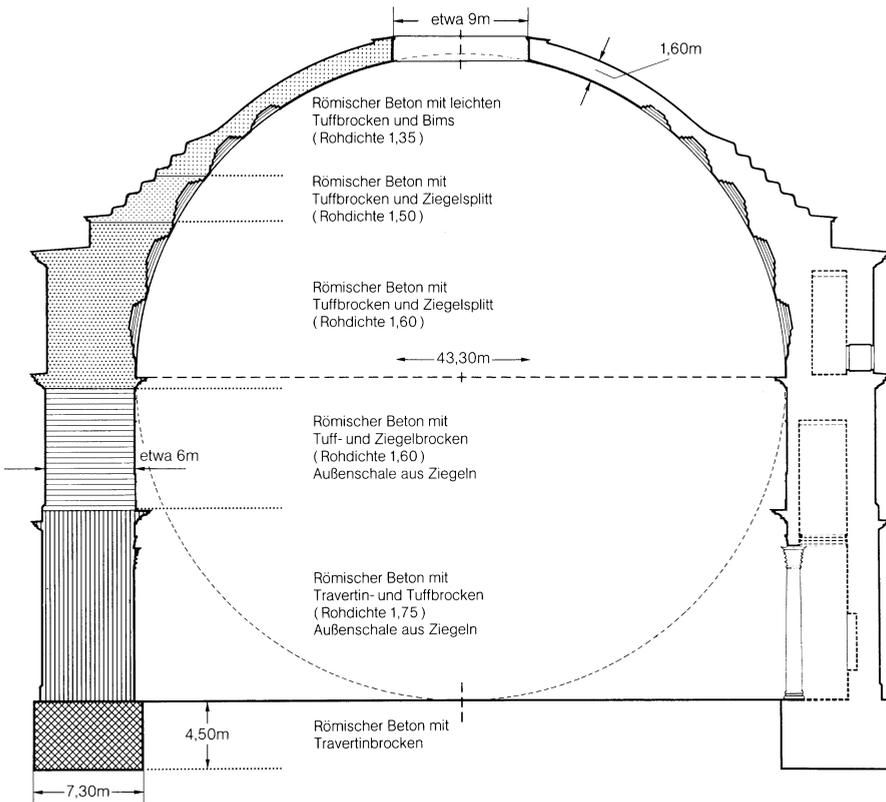


Abb. 1.3 Querschnitt durch das Pantheon (erbaut 2. Jh. n. Chr.) aus [4].

Diese Meisterleistung der Ingenieurbaukunst blieb bis zur Renaissance unübertroffen.

Einen vergleichbaren Umgang mit Kräften und Baumassen findet man erst wieder bei Brunelleschi, der 1420 das Bauprogramm für die Kuppel des Domes in Florenz vorlegt. Als Konstruktionsmaterial werden nun Ziegelmauerwerk und Natursteinmauerwerk verwendet. Beton steht als Werkstoff nicht mehr zur Verfügung, da die Kenntnisse der Römer in Vergessenheit geraten sind. Brunelleschi muss also mit dem Mauerwerk auf eine Konstruktionsform zurückgreifen, die die Römer für Kuppeln und Gewölbe schon überwunden hatten.

Besonders deutlich wird dieser Wissensverlust auch bei der mehrschaligen Wandbauweise. Diese Konstruktionsform wird im Mittelalter beibehalten. Allerdings werden die sichtbaren Außenschalen wieder dicker und übernehmen die tragende Funktion. Was man im Inneren dieser Konstruktionen vorfindet, ist eine schlechte Imitation des Betons: Abfallstücke der Steinmetzen und Maurer werden mehr oder weniger gut mit Kalkmörtel gemischt und in den Zwischenraum zwischen innerer und äußerer Schale eingebracht. Dieser Kern übernimmt nur eine untergeordnete bis gar keine Tragfunktion.

Nachdem man in der Renaissance begonnen hatte, Bauten und Bauformen der Antike zu studieren, erwacht auch das Interesse an der Bautechnik der Römer. Zeitgenössische Mörtelrezepturen mit Eiern, Käse, Quark, Essig und ähnlichen organischen Beigaben tragen eher den Charakter alchimistischer Experimente. Aber auch Puzzolane und Trass als hydraulische Bindemittel waren nicht völlig in Vergessenheit geraten; ihre Verwendung blieb allerdings regional beschränkt. Beispielhaft ist in diesem Zusammenhang der Export des Eifeltrasses nach Holland zu nennen, wo er vor allem für Wasserbauten verwendet wurde. Es blieb dem Organisationstalent und den Kenntnissen des örtlichen Baumeisters überlassen, den Trass zu besorgen und ihn im richtigen Mischungsverhältnis dem Mörtel beizugeben. Erst im 18. und 19. Jahrhundert begann man, die Wirkungsweise der Bestandteile hydraulischer Bindemittel systematisch zu erforschen, und legte damit die Grundlage für eine breite Anwendung.

1.2 Portlandzement und Stampfbeton

Wie auf allen Gebieten der Technik setzt die industrielle Revolution auch im Bauwesen ein bis dahin nicht gekanntes Tempo bei den technischen Innovationen in Gang. Und wie bei nahezu allen bedeutenden technischen Entwicklungen sind in dieser Zeit auch die Entwicklungen im Bauwesen direkt mit dem Einfallsreichtum und der Schaffenskraft einzelner Personen verknüpft.

So war es *John Smeaton* (1724–1792), der 1756 mit dem Neubau des Edystone-Leuchtturms bei Plymouth begann (Abb. 1.4a). Zuvor hatte er systematische Versuche zu den hydraulischen Eigenschaften des Plymouthkalkes durchgeführt und dabei die Bedeutung des Tonanteiles festgestellt. Beim Bau des Leuchtturms wählte er dann als Bindemittel für den Mörtel eine Mischung, die zu gleichen Teilen aus tonhaltigem Alberthaw-Kalk und aus Italien importierter Puzzolanerde bestand. Seine Ergebnisse wurden später sowohl in Frankreich als auch in England aufgegriffen mit der Konsequenz, dass man nun als Grundstoff

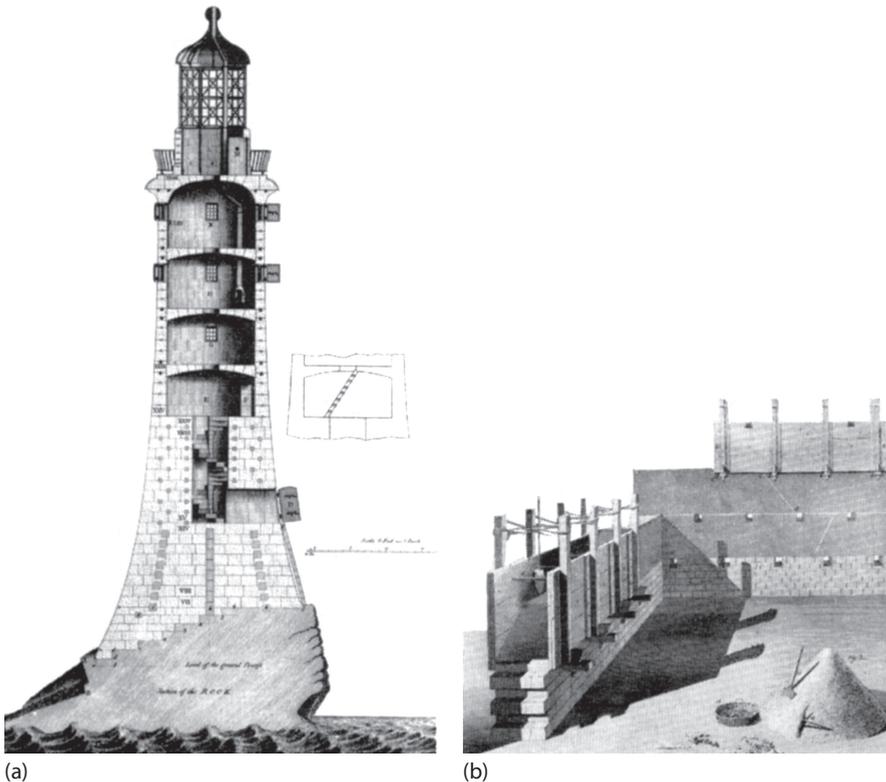


Abb. 1.4 (a) Zeitgenössische Darstellung des Edystone-Leuchtturms, aus [5]; (b) Schalungstechnik des Pisébaus nach Rondelet, aus [5].

für das Brennen ganz gezielt natürliche Kalkvorkommen mit hohen Tonanteilen verwendete. Die entsprechenden Produkte – genau genommen immer noch hydraulische Kalke – wurden gelegentlich schon als Romancement bezeichnet. Smeatons Leuchtturm wurde 1882 abgebrochen, Stein für Stein nach Plymouth gebracht und dort als Denkmal wiederaufgebaut. Aufgrund von Rissen in den Klippen war die Standsicherheit der Gründung infrage gestellt. Einziges Relikt vor Ort blieb der Stumpf des Turmschafts, der heute noch zu sehen ist.

Ein entscheidender Fortschritt war erreicht, als der englische Bauunternehmer *Joseph Aspdin* (1779–1855) erstmals eine Mischung von Ton und Kalksteinen brannte. Mit dem Begriff Portlandzement, den er einführte, wollte er deutlich machen, dass es das Endprodukt, das unter Verwendung seines Bindemittels hergestellt wird, durchaus mit dem sprichwörtlich widerstandsfähigen natürlichen Portlandstein aufnehmen kann. Dieser Kalkstein, der auf der Halbinsel Portland abgebaut wird, galt in England als besonders hochwertiges Baumaterial. Aspdin lässt sich sein Verfahren 1824 patentieren. In den folgenden Jahren leitet *Isaak Charles Johnson* (1811–1911) durch umfangreiche Versuchsreihen ein optimales Mischungsverhältnis von Ton und Kalk her. Er fordert darüber hinaus höhere Brenntemperaturen bis zur Sinterung der Klinker, wodurch die Qualität des Portlandzements nochmals entscheidend verbessert wurde. Weitere Untersuchun-

gen, auch im deutschsprachigen Raum, befassen sich vor allem mit der chemischen Analyse der Komponenten und der Qualitätssicherung des Endproduktes. Man kann davon ausgehen, dass auf der Grundlage dieses Wissens seit 1844 Zement zur Verfügung stand, der unseren heutigen Qualitätsanforderungen standhält. Das gilt auch für die Produkte des ersten Zementwerkes in Deutschland – 1855 in Züllchow bei Stettin gebaut.

Heftige Diskussionen brachen aus, als 1879 einem Portlandzement erstmals Hüttensand beigemischt wurde. Die industrielle Verwertung der bis dahin wertlosen Hochofenschlacke brachte erhebliche Kostenvorteile. Der Streit entzündete sich daran, ob die latent hydraulischen Schlacken in der Mischung mit Portlandzement wirksam werden oder nicht. Oder anders ausgedrückt, ob das Beimischen als Verbesserung oder als Strecken des Ausgangsproduktes anzusehen ist. Der Streit führte zur Aufspaltung des Verbandes der Zementindustrie und zur heute noch gültigen Definition der drei Produktgruppen: neben dem „reinen“ Portlandzement (Anteil der Beimischung $< 2\%$), der Eisenportlandzement (Anteil der Hochofenschlacke $< 30\%$) sowie der Hochofenzement (Anteil der Hochofenschlacke $< 50\%$).

Wofür wurde nun der neue Werkstoff genutzt? Man versuchte in erster Linie bekannte Techniken und Konstruktionsprinzipien zu verbessern. Schon zuvor hatte man, vor allem im Brückenbau und bei Gründungen, durch das Beifügen von Ziegelmehl beim Kalkmörtel gewisse hydraulische Eigenschaften erzielt. Mit der Beigabe von Zement hatte man nun einen Mörtel zur Verfügung, der zuverlässig unter Wasser erhärtete. Aufgrund der besseren Festigkeitsentwicklung erhöhte sich auch die Tragfähigkeit der Fugen, was zu einem wirtschaftlichen Vorteil hinsichtlich höherer zulässiger Toleranzen bei der Bearbeitung der Steinflächen führte. Schnelleres Abbinden des Zementanteils verkürzte die Bauzeit.

Die sogenannte Pisétechnik – eine Konstruktionsform, die zuvor vor allem in Südfrankreich verbreitet war – wurde von *Françoise Coignet* (1814–1888) Mitte des 19. Jahrhunderts für den Beton adaptiert. Bei der Pisétechnik werden Wände aus Lehm in einer Schalung hergestellt. Der Lehm wird lagenweise eingebaut, durch Stampfen verdichtet und ist dann, allerdings nach monatelanger Trocknungsphase, ausreichend witterungsbeständig. Coignet erkannte früh, dass die von ihm erstmals angewandte Stampfbetonbauweise nur dann zu einem befriedigenden, dauerhaften Ergebnis führt, wenn es in der Mischung keinen Wasserüberschuss gibt. Damit war die Frage nach dem Wasser-Zement-Wert



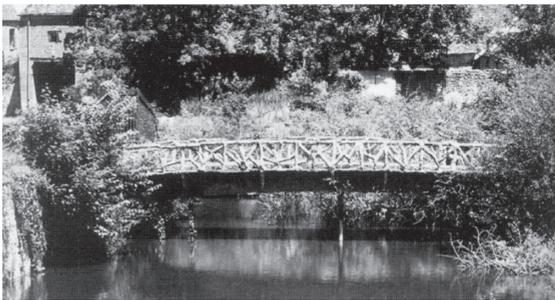
Abb. 1.5 Coignets Aquädukt im Wald von Fontainebleau (1867), aus [5].

(W/Z-Wert) formuliert. Er ließ sich die Stampfbetonbauweise 1855 als *Béton aggloméré* patentieren. Seine Firma führte zahlreiche Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke aus (siehe Abb. 1.5). Schon 1856 ordnet Coignet ganz gezielt auf der Zugseite eines biegebeanspruchten Trägers eine Zugstange an. Sein erstes Patent lässt er sich 1861 für bewehrten Beton erteilen. Doch dazu mehr im folgenden Abschnitt.

1.3 Die Eisenbetonbauweise

Dass man die Eisenbetonbauweise teilweise bis heute über die Begriffe „Monierbauweise“ und „Moniereisen“ mit *Joseph Monier* (1823–1906) verbindet, ist vor allem darauf zurückzuführen, dass dieser seine Konstruktionen seit dem Jahre 1867 durch mehrere zum Teil sehr allgemein abgefasste Patente umfassend schützen ließ.

So konnte über viele Jahre in Frankreich, Deutschland, Österreich und der Schweiz bewehrten Beton nur derjenige herstellen, der zuvor bei Monier eine Lizenz erworben hatte. Für Monier selbst waren die sprichwörtlichen Blumenkübel, deren Frostsicherheit er durch das Einlegen eines Drahtgeflechts in den Zementmörtel erreichte, nur der Anfang. Wasserbehälter, Gewölbe, sogar erste Eisenbetonbrücken folgten (Abb. 1.6a).



(a)



(b)

Abb. 1.6 Bauwerke Moniers. (a) Eisenbetonbrücke in Chazelet (1875), aus [6]; (b) Wasserbehälter in Pontorson (1880), aus [6].

Heute geht man davon aus, dass Monier das Eisen vor allem als Hilfe zur Formgebung, d. h. als Unterkonstruktion für die eigentlich tragende Mörtelschicht ansah. Mechanische Zusammenhänge, hinsichtlich des Zusammenwirkens der beiden Komponenten, interessierten ihn nicht. Es wird sogar berichtet, dass er Bauteilversuche, die Ende des 19. Jahrhunderts zur wissenschaftlichen Absicherung erster Bemessungsregeln durchgeführt wurden, mit einem gewissen Desinteresse verfolgte.

Die 1854 entstandenen Zeichnungen aus den Patentschriften von Coignet belegen darüber hinaus, dass Monier nicht der Erste mit seiner Idee war (Abb. 1.7). Ebenfalls schon 1855 erhielt *Joseph Louis Lambot* (1814–1887) ein Patent zur Herstellung von „Feuchtigkeitsgefährdeten Gegenständen“ aus Beton unter Verwendung eines Drahtnetzes zur Formung. Zu diesen „Gegenständen“ zählten vor allem Boote und Behälter. Der Jurist und Gutsbesitzer Lambot nannte den neuen Baustoff „Ferciment“.

William Boutland Wilkinson (1819–1902) erkennt als einer der Ersten die Vorteile von bewehrtem Beton im Zusammenhang mit dem feuersicheren Bauen. 1854 lässt sich der Gipsermeister eine Deckenkonstruktion patentieren, bei der eine Bewehrung der Zugzone vorgesehen ist. Wilkinson, der in Newcastle eine Fabrik für künstliche Steine betrieb, setzte für seine Deckenkonstruktionen auch erstmals vorgefertigte Hohlkastenträger ein. Wilkinson war Unternehmer und es lag ihm wenig an einer wissenschaftlichen Aufbereitung seiner Erfindung. Ganz im Gegensatz dazu *Taddeus Hyatt* (1816–1901): Der Rechtsanwalt, der in New York und London lebte, war ebenfalls über die Frage des Brandschutzes bei

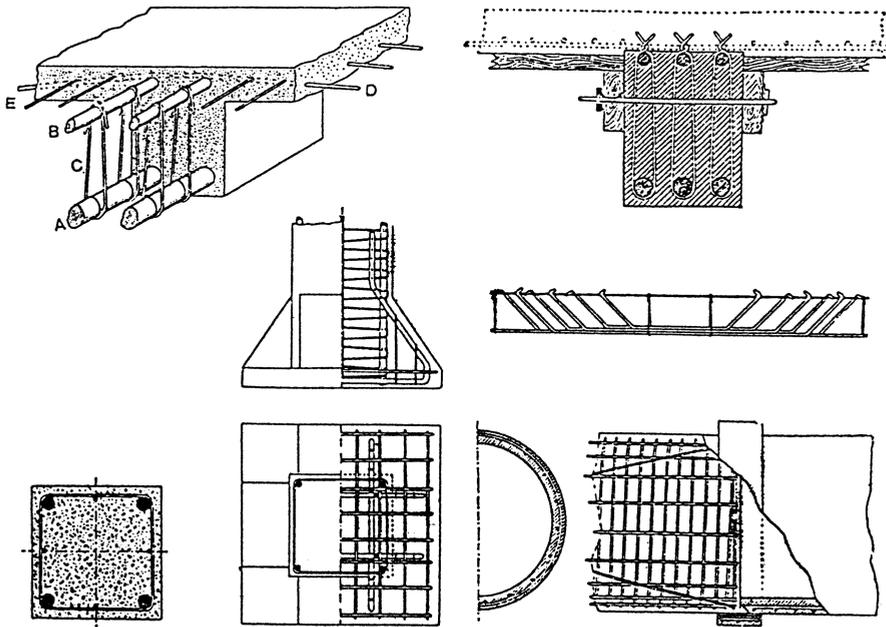


Abb. 1.7 Françoise Coignet, Zeichnung aus seinem Patent zur Bewehrung von Betondecken (1854), aus [4].

Geschossbauten auf die neue Bauweise gestoßen. 1877 veröffentlicht er auf eigene Kosten einen Bericht über seine wissenschaftlichen Untersuchungen der letzten 15 Jahre. Feuerbeständigkeit und Wirtschaftlichkeit sind Themen seiner Broschüre; aber auch mechanische Fragestellungen wie das Verhältnis des Elastizitätsmoduls von Eisen und Beton werden behandelt. Darüber hinaus gibt Hyatt eine klare Stellungnahme ab, dass die Bewehrung auf der Zugseite anzuordnen ist.

Diese lückenhafte Aufzählung zeigt, dass Monier sicher ein wichtiger Wegbereiter des Eisenbetons war, dass seine Bedeutung aber doch häufig überschätzt wird. Dieses Phänomen ist vor allem auf die gute Vermarktung der „Monier-Patente“ zurückzuführen. In der Folge wurde vor allem auch im deutschsprachigen Raum bewehrter Beton lange Zeit als „Monierbauweise“ bezeichnet und der Begriff „Monier-Eisen“ hielt sich bis in das 20. Jahrhundert. Die Überbewertung von Moniers Beitrag zur technologischen Entwicklung des Stahlbetons hat sicherlich mehrere Gründe: zum einen eine gewisse Nachlässigkeit französischer, aber auch deutscher, schweizerischer und österreichischer Patentämter bei der Zuerkennung von „Monier-Patenten“, zum anderen ein offensichtliches Desinteresse der technischen Hochschulen, die Innovation durch firmenunabhängige Forschung zu fördern. Zur Popularität des Namens trug sicherlich auch bei, dass der deutsche Bauunternehmer Gustav Wayss, der das „Monier-Patent“ im Jahre 1885 erworben hatte, den aktuellen Wissensstand zusammenfasste und im Eigenverlag 1887 in der sogenannten Monier-Broschüre („Das System Monier“) veröffentlichte.

Die Konstruktionsformen der ersten Stahlbetondecken wurden direkt aus den bis dahin üblichen Deckenkonstruktionen abgeleitet. Abbildung 1.8 zeigt einige frühe Beispiele: Wie bei einer Holzbalkendecke oder bei gemauerten Kappendecken spannt die Betonplatte bzw. das Betongewölbe einachsig von Träger zu Träger. Zwischen Stahlträgern und Beton gibt es keinen planmäßigen Verbund. Das gilt auch für die Weiterleitung in Wände und Stützen. Die Bewehrung des Betons mutet aus unserer Sicht vergleichsweise intuitiv an. Querschnittsform (Rundstähe und Flachstähe) und die geometrische Anordnung der Bewehrung unterscheiden sich bei den einzelnen – meist patentierten – Konstruktionen und sind untereinander nicht kompatibel. Materialersparnis und Vergrößerung der bis dahin möglichen Spannweiten waren die wichtigsten Vorteile der neuen Bauweise. Diese setzte sich allerdings nur zögerlich durch, vor allem dort, wo man wegen hohen Lasten oder wegen auftretender Feuchtigkeit Holzkonstruktionen ersetzen wollte. Der Wohnungsbau der Gründerzeit dagegen blieb eine Domäne für klassische Holzbalkendecken. Und auch bei Verwaltungsgebäuden nutzte man Ende des 19. Jahrhunderts noch überwiegend das System gemauerter Kappendecken, das bei den Baubehörden gut eingeführt war.

Die Grundlagen für den modernen Stahlbeton wurden von einem gleichermaßen innovativen und geschäftstüchtigen Bauunternehmer geschaffen. *Françoise Hennebique* (1843–1921) erhielt 1879 als Ingenieur in Brüssel den Auftrag ein „feuersicheres“ Landhaus zu erbauen. In der „Monierbauweise“, die er kurz zuvor kennengelernt hatte, sah er die beste Möglichkeit, dieses Ziel umzusetzen. Er erkannte aber, dass es dafür erforderlich war, auch alle Stahlträger und Stützen der unmittelbaren Brandeinwirkung zu entziehen. Er tat dies, indem er diese Bau-

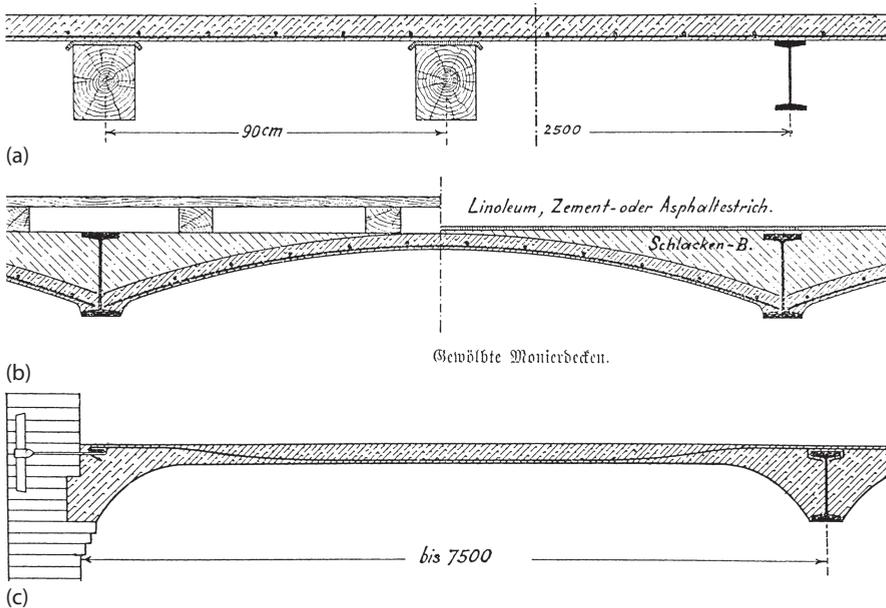


Abb. 1.8 Deckenkonstruktionen, aus [7]. (a) Monierplatte; (b) Moniergewölbe, aus [7]; (c) Voutendecke von Koenen, aus [8].

teile ebenfalls aus Eisenbeton herstellte. Damit war der Plattenbalken erfunden. Die Formgebung der einzelnen Bauteile, insbesondere die Vouten der Unterzüge im Auflagerbereich sowie die Bewehrungsführung, die vieles vorwegnimmt, was erst Jahre später wissenschaftlich erforscht wurde, zeugen vom hervorragenden intuitiven Verständnis, auf dessen Grundlage Hennebique die Entwicklung seiner Konstruktionsweise betrieb (Abb. 1.9 und 1.10). Wie bereits Jahre zuvor Monier, so vereinte auch Hennebique technisches Verständnis mit Geschäftstüchtigkeit. Er übersiedelte 1892 nach Paris und ließ sich seine Deckenkonstruktionen im gleichen Jahr umfassend patentieren. In Frankreich gründete er Niederlassungen in allen größeren Städten. Im europäischen Ausland und in den USA vergab er Lizenzen an Ingenieure und Bauunternehmen. Lizenznehmer waren unter anderen die Firmen Wayss & Freytag sowie Dyckerhoff & Widmann.

Die Vorteile der neuen Bauweise lagen klar auf der Hand: Mit monolithischen Plattenbalken und Durchlaufträgern wurden hohe Tragfähigkeiten bei vergleichsweise geringer Bauhöhe erreicht. Bei ausreichender Betondeckung und gutem Oberflächengefüge waren Brandschutz und Dauerhaftigkeit der Konstruktion gewährleistet. Größere Spannweiten, bei vergleichsweise schlanken Stützen, erhöhten die Flexibilität der Nutzung. Die Typisierung von Spannweiten und Bauteilabmessungen ermöglichte gleichzeitig eine wirtschaftliche Herstellung der Konstruktionen. Aber es gab auch Rückschläge: 1901 stürzte in Basel der fünfstöckige Neubau des „Hotels zum Bären“ noch vor der Fertigstellung ein. Bei der anschließenden Untersuchung stellte man gravierende Mängel beim Tragwerksentwurf, in der statischen Berechnung sowie bei den Ausführungsdetails fest. Die Zuständigkeiten der Qualitätsüberwachung waren alles andere

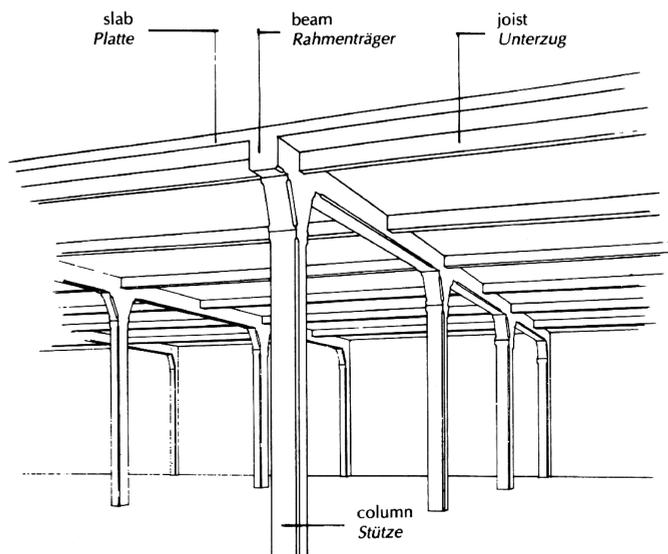


Abb. 1.9 Monolithisches Beton-Rahmentragwerk 1904, aus [4].

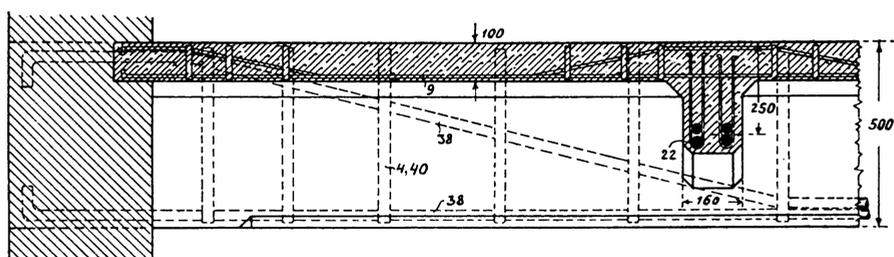


Abb. 1.10 Bewehrungsführung einer Hennebique'schen Decke, aus [8].

als eindeutig geregelt. Hier rächte es sich, dass Hennebique die Lizenz für seine Bauweise als Ganzes vermarktete. Damit war für die Reproduktion beim Lizenznehmer vordergründig kein Verständnis für die Bedeutung und Wirkungsweise einzelner Details erforderlich. Dieses Defizit wurde erkannt und es begann, mit ausgelöst durch das Basler Unglück, aber auch angesichts des für das Jahr 1907 zu erwartenden Auslaufens der Patente Hennebiques, die systematische wissenschaftliche Untersuchung der materialtechnologischen und der mechanischen Grundlagen der Stahlbetonbauweise.

Dass es an grundlegendem Wissen fehlte, obwohl sich die neue Bauweise in allen Gebieten des Bauwesens durchzusetzen begann, zeigt auch ein Missgeschick, das Eugène Freyssinet – über ihn wird im folgenden Abschnitt noch zu berichten sein – im Jahre 1912 unterlief. Freyssinet hatte eine Bogenbrücke bei Bourtou/Vichy als schlanke Stahlbetonkonstruktion errichtet. Aufgrund einer Fehleinschätzung des Kriechens des Betons senkten sich die Scheitel der drei etwa 72 m weit gespannten Bögen um bis zu 12 cm. Freyssinet kompensierte diese für



(a)



(b)



(c)



(d)

Abb. 1.11 Protagonisten der Eisenbetonbauweise. (a) François Coignet; (b) Joseph Monier; (c) François Hennebique; (d) Emil Mörsch.

die Stabilität der Bögen bedenkliche Verformung über ein hydraulisches Auseinanderpressen der Scheitel.

Zu großen Teilen erarbeitet und zwischen 1905 und 1926 im Standardwerk *Der Eisenbetonbau* zusammengetragen wurden die grundlegenden betontechnologischen und mechanischen Kenntnisse von *Emil Mörsch* (1872–1950) (Abb. 1.11d). Mörsch hatte 1901 die Leitung des technischen Büros der Ways & Freytag AG übernommen. In den folgenden Jahren verknüpfte er auf einzigartige Weise seine Tätigkeit als Hochschullehrer, Forscher und zeitweiliges Vorstandsmitglied der Ways & Freytag AG. Nachdem die Patente Hennebiques 1907 ausgelaufen waren und im gleichen Jahr das „Preußische Ministerium der öffentlichen Arbeiten“ die „Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton bei Hochbauten“ erließ, stand der allgemeinen Anwendung des Eisenbetons nichts mehr im Wege.

Nicht zu vergessen sind in diesem Zusammenhang die Entwicklungen auf dem Gebiet der Herstellungstechnologie. Für das Mischen, Transportieren und Verdichten des Betons waren nach und nach Geräte und Maschinen entwickelt worden, mit denen, auch unter Baustellenverhältnissen, hochwertiger und homogener Beton hergestellt werden konnte. Insbesondere die Einführung des Innenrüttlers – in Deutschland 1934 durch die Firma Wacker – bedeutete einen grundsätzlichen Fortschritt. Zuvor hatte man Beton durch Stampfen, Stochern und Klopfen an der Schalung mit sehr unterschiedlichem Erfolg verdichtet. Das Stampfen – für unbewehrten Beton gut geeignet – wurde durch die eingelegte Bewehrung behindert und durch das Klopfen an der Schalung entmischte sich der Beton.

Mit den „Bestimmungen für die Ausführung von Bauteilen aus Eisenbeton“ aus dem Jahre 1916, die schon 1926 durch die erste Fassung der DIN 1045 ersetzt wurden, lag den Bauingenieuren eine verlässliche Grundlage für den Entwurf und die Bemessung von Stahlbetonbauteilen vor. Dies förderte die breite Anwendung, führte in der Folge aber auch zu einer Vereinheitlichung der Konstruktionsformen. Nur wenige Ingenieure versuchten außerhalb oder am Rande der Regelwerke neue, kreative Wege zu gehen. Einer von Ihnen war *Robert Maillart* (1872–1942), der die flächige und räumliche Tragwirkung monolithischer Stahlbetontragwerke erkannte und bei seinen Bauten auf eine Art und Weise perfektionierte, die auch heute noch Bewunderung hervorruft. 1902 gründete er sein eigenes Ingenieurbüro und Baugeschäft. Zuvor hatte er einige Jahre Berufserfahrung gesammelt, nachdem er 1894 das Studium an der ETH in Zürich abgeschlossen hatte. 1908 entwickelte er ein unterzugsloses Deckensystem mit Pilzkopfstützen, das er sich patentieren ließ und u. a. 1910 beim Lagerhaus Giesshübel (Abb. 1.12) in Zürich ausführte. Das von ihm vorgeschlagene orthogonale Bewehrungskonzept für unterzugslose Deckenplatten wird auch heute noch angewandt.



Abb. 1.12 Lagerhaus Giesshübelstraße in Zürich, Deckentragwerk von Robert Maillart (1910), aus [9].

Maillart ist Ingenieur und Bauunternehmer zugleich und er bekommt seine Aufträge im Wettbewerb. Um preiswert bauen zu können, optimiert er seine Konstruktionen. Im Brückenbau führt ihn diese Optimierung zum Konzept des versteiften Stabbogens. Bei diesem Konstruktionsprinzip ist der Fahrbahnträger über die Aufständering mit dem Bogen monolithisch verbunden. Dadurch entsteht ein räumliches Tragwerk, bei dem die Stabilität des Bogens nicht mehr von der Steifigkeit des Bogens alleine, sondern vom räumlichen Zusammenwirken von Fahrbahn, Aufständering und Bogen abhängt. Aufgrund dieser „Versteifung“ des Bogens durch den Fahrbahnträger kann das Tragwerk sehr schlank ausgeführt werden. Das spart nicht nur Beton. Auch der Aufwand bei der Herstellung des Lehrgerüsts verringert sich aufgrund des geringen Eigengewichtes des Bogens erheblich. Zwischen 1920 und 1933 hat Maillart das Konstruktionsprinzip des versteiften Stabbogens mehrfach angewandt. Zuletzt bei der Schwandbachbrücke (Abb. 1.13) unter schwierigen geometrischen Bedingungen: Die Fahrbahn wird in einer Kurve über den geradlinigen Bogen geführt, der mit einer Dicke von 20 cm 37,4 m überspannt. Der Standort der Brücke im Zuge einer Nebenstraße bei Hinterfultigen (Kt. Bern) ist typisch für die kühnen Konstruktionen Maillarts, die fast alle abseits der großen städtischen Zentren entstanden und somit heute häufig schwer aufzufinden sind. Die schlichten, schnörkellosen Formen entsprachen – noch – nicht dem Zeitgeschmack. Erst nach und nach und sehr zögerlich wurde der Stahlbeton im 20. Jahrhundert zum bevorzugten Werkstoff der modernen Architektur. So schreibt 1899 Henry van der Velde, dass „es eine Klasse von Menschen gibt, denen man den Titel Künstler nicht mehr länger vor enthalten kann. Diese Künstler, die Schöpfer der neuen Architektur, sind die Ingenieure“ (zitiert nach [10]).

Weitgehend unabhängig von stilistischen und formalen Fragen der Architektur wird von den Ingenieuren die Optimierung von Tragwerken aus Stahlbeton vorangetrieben. 1913 wird die Kuppel der Jahrhunderthalle in Breslau (Abb. 1.14) fertiggestellt und in der Folge werden Berechnungs- und Herstellungsverfahren

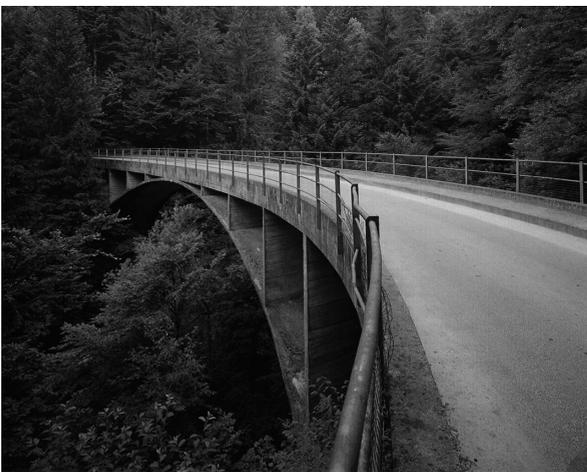


Abb. 1.13 Schwandbachbrücke von Robert Maillart (1933), aus [9].

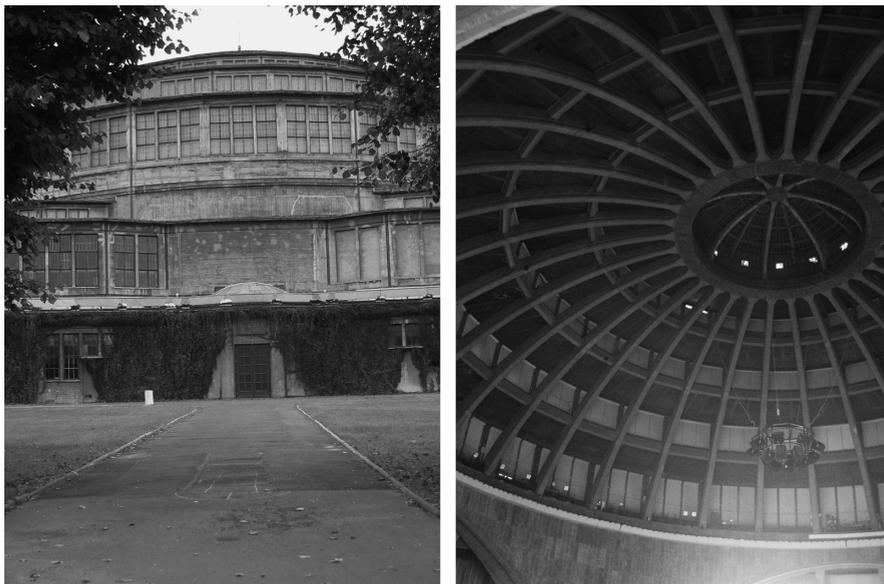


Abb. 1.14 Jahrhunderthalle Breslau von Max Berg (1913).

entwickelt, um die freie Formbarkeit des Betons für optimierte Schalentragwerke zu nutzen. Zwei unterschiedliche Ansätze sind hier zu unterscheiden: Mathematisch beschreibbare räumliche Flächen wie zum Beispiel Hyparschalen oder Kugelschalen lassen sich berechnen. Schnittgrößen, Beanspruchungen und Auflagerkräfte sind über Differenzialgleichungen eindeutig zu bestimmen. Allerdings unterliegen diese Formen auch streng einzuhaltenden Randbedingungen und lassen sich deswegen nur eingeschränkt an unterschiedliche nutzungsbedingte Grundrissformen und Bauwerksgeometrien anpassen. Anders die sogenannten freien Formen. Freiformflächen folgen keiner mathematischen Formulierung und können deshalb einer Nutzung besser angepasst werden.

Ein herausragender Vertreter für die Entwicklung und Konstruktion freigeformter Schalentragwerke ist *Heinz Isler* (1926–2009). Isler entwickelte modellstatische Verfahren, die es ihm ermöglichten, Schalenformen, die er auch aus Naturbeobachtungen herleitete, in ihren Abmessungen zu optimieren und sicher zu bemessen. Durch die Wiederverwendung von Schalungen und Schalungssegmenten verhalf er der Schalenbauweise auch zu einer gewissen Wirtschaftlichkeit. So gelingt es ihm rund 1400 Schalen in etwa 40 unterschiedlichen Grundformen zu realisieren. Abbildung 1.15 zeigt das Gartencenter Bürgi in Camorino (Kt. Tessin, Schweiz), dessen vierpunktgelagerte Schale eine Fläche von $27,2 \times 27,2 \text{ m}^2$ überspannt. Die Dicke der Schale im Scheitel beträgt 8 cm.

Nicht ganz so umfangreich ist das Werk von *Ulrich Müther* (1934–2007), der zwischen 1963 und 1996 über 50 Hypar- und Kugelschalen entwarf und in der Anfangszeit auch mit dem familieneigenen Bauunternehmen errichtete (Abb. 1.16). Auch hier spielten Überlegungen zur wirtschaftlichen Herstellung eine wichtige Rolle und so ist es kein Zufall, dass es vor allem Hyparschalen sind, mit denen sich Müther intensiv befasst. Da eine doppelt gekrümmte Hy-



Abb. 1.15 Gartencenter in Camorino von Heinz Isler (1971).



Abb. 1.16 Seerose in Potsdam von Ulrich Müther (1980), aus [11].

paraschale aus sich im Raum verwindenden Geraden gebildet wird, lässt sie sich auch auf entsprechend angeordneten geraden Schalbrettern betonieren. Bei Kugelschalen, wie sie Müther mehrfach für Planetarien konzipiert, entwickelt er ein Herstellungsverfahren, bei dem Spritzbeton auf ein zuvor ausgerichtetes Bewehrungsgerippe aufgebracht wird.

Es sind vor allem zwei Gründe, weshalb in der Gegenwart kaum noch Schalen gebaut werden, obwohl eine Berechnung freier Formen heute mit modernen numerischen Methoden ohne Weiteres möglich ist. Zum einen ist der Herstellungsaufwand nach wie vor vergleichsweise groß, zum anderen bereitet es häufig Probleme, einen in seiner Wirkung solitären Schalenbau in ein städtebauliches Umfeld einzugliedern.

1.4 Die Spannbetonbauweise

Durch das Einlegen der Bewehrung wird die fehlende Zugfestigkeit des Betons ausgeglichen. Dass der Beton in der Zugzone reißt, lässt sich durch die Bewehrung erst einmal und ohne weitere Maßnahmen nicht verhindern. Das bedeutet,



Abb. 1.17 Belastungsprobe an „Wettstein-Brettern“, aus [5].

der Beton in der Zugzone ist, zumindest was die Biegetragfähigkeit eines Balkens anbelangt, nutzlos – sieht man einmal vom Korrosionsschutz der Bewehrung ab. Dazu kommt, dass das Verformungsverhalten von gerissem Beton rechnerisch nur schwierig zu erfassen und mit erheblichen Unsicherheiten behaftet ist. Schon Ende des 19. Jahrhunderts versucht man deshalb, durch das Vorspannen der Bewehrung, zumindest im Gebrauchszustand, ein quasi linear-elastisches Verhalten des Betons unter Biegebeanspruchung zu erzielen. Man erwartet zurecht eine höhere Tragfähigkeit und geringere Verformungen, wenn es gelingt, den Beton so „vordrücken“, dass eine Biegebeanspruchung keine Risse hervorruft, sondern in der Zugzone nur einen Abbau von Druckspannungen bewirkt.

Peter. H. Jackson (1829–1908) aus San Francisco lässt sich 1886 ein Patent auf ein Konstruktionsprinzip erteilen, das den Grundgedanken der Vorspannung ohne Verbund erkennbar beschreibt. *Mathias Koenen* (1849–1924) stellt 1906 erste Überlegungen an, Bewehrung in gespanntem Zustand einzubetonieren. Damit war das Spannbettverfahren erstmalig beschrieben. Aufgrund der vergleichsweise geringen Streckgrenze der damals üblichen Bewehrungsstähle sieht sich Koenen gezwungen, die maximale Vorspannung des Stahles auf 60 N/mm^2 zu begrenzen. Daraus folgert er selbst, dass der eigentlich angestrebte Effekt der Vorspannung durch Kriechen und Schwinden schnell verloren geht.

Im Jahr 1919 entwickelt *Karl Wettstein* in Böhmen ein Verfahren, Betondielen mit Klaviersaiten vorzuspannen. Er lässt sich dieses Verfahren 1921 patentieren und hat damit die Entwicklung des modernen Spannbetons um zwei wesentliche Schritte vorangebracht. Zum einen verwendet er erstmalig hochfesten Stahl, zum anderen sichert er den Haftverbund durch das günstige Verhältnis von Umfang zu Querschnittsfläche der dünnen Drähte (Abb. 1.17).

Eugéne Freyssinet (1879–1962) war schon mit zahlreichen Stahlbetonbauten als herausragender Ingenieur bekannt geworden. Eines der wichtigsten Beispiele sind sicherlich die Luftschiffhallen von Paris-Orly von 1923. Das Spannbettverfahren, das er sich 1928 patentieren lässt, nutzt die zwischenzeitlich zur Verfügung gestellten materialtechnologischen Entwicklungen: Hochwertiger Beton und vor allem hochfeste Stähle lassen eine Vorspannung der Bewehrung auf bis zu 400 N/mm^2 zu. Damit werden die Einflüsse von Kriechen und Schwinden so weit kompensiert, dass eine dauerhafte Wirkung der Vorspannung sichergestellt ist. In Deutschland ist es wiederum die Firma Wayss & Freytag, die als erstes Un-



Abb. 1.18 Autobahnbrücke bei Oelde/Westf. von Wayss & Freytag (1939), aus [54].

ternehmen das Potenzial einer neuen Entwicklung erkennt und sich durch die Übernahme des Patentes für Deutschland die Verwertungsrechte sichert. Allerdings – wie schon zuvor beim Stahlbeton – nicht ohne durch umfangreiche eigene Untersuchungen das Verfahren theoretisch und experimentell abzusichern und weiterzuentwickeln. Dass 1938 die erste Spannbetonbrücke in Deutschland von der Firma Wayss & Freytag errichtet werden konnte, war durch die umfangreichen Versuche, die zwischen 1935 und 1938 in Stuttgart und Dresden von Emil Mörsch durchgeführt worden waren, möglich geworden. Die 33 m langen im Spannbett vorgespannten Träger überspannen bei Oelde in Westfalen die Autobahn stützenfrei (Abb. 1.18).

Freyssinet lässt sich 1939 und 1940 ein neues System patentieren, bei dem die Bewehrung nach dem Erhärten des Betons vorgespannt wird. Damit standen auch das Spanngliedverfahren bzw. die Vorspannung mit nachträglichem Verbund zur Verfügung. Dieses System wurde in der Schweiz von den Ingenieuren N. Birkenmeier, A. Brandestini, N.R. Ros und K. Vogt (BBRV-Verfahren), in Deutschland von Fritz Leonhardt und Walter Bauer (LEOBA-Verfahren) sowie durch U. Finsterwalder für die Firma Dyckerhoff & Widmann (DYWIDAG-Verfahren) auf den auch heute noch weitgehend aktuellen Stand der Technik entwickelt.

1.5 Fertigteile

Schon Lambots Boot und die Blumenkübel von Monier waren Fertigteile im Sinne von vorgefertigten Bauelementen. Aufgrund der Vorteile bei der Herstellung von Bauteilen in einer – vielleicht nur provisorisch errichteten – Halle und in einer mehrfach verwendbaren Schalungsform entwickelte sich die Fertigteilbauweise (Abb. 1.19). Der erstmalige Einsatz vorgefertigter Betonbalken durch Coignet beim Bau des Casinos in Biarritz ist für das Jahr 1891 belegt. In den USA werden im Jahre 1900 erstmals flächige Dachelemente in Brooklyn verwendet. 1912 lässt sich John F. Conzelmann erstmals ein System patentieren, mit dem Geschossbauten komplett aus vorgefertigten Fertigteilen errichtet werden können.

Höhere Betonqualitäten und die ersten Vorspannsysteme ermöglichen die Herstellung von schlanken Bauteilen, die sich transportieren und auf der Baustelle

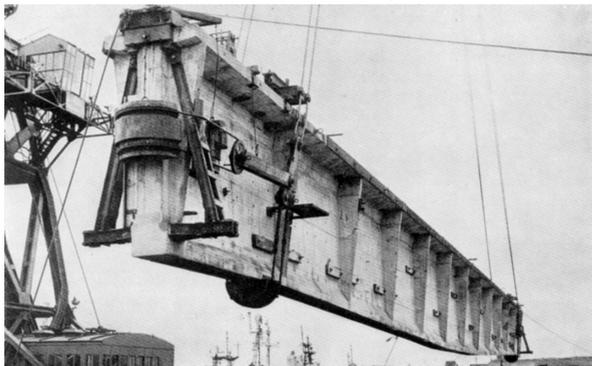


Abb. 1.19 Versetzen eines Fertigteilbrückenträgers 1958, aus [5].

versetzen und montieren lassen. Die Firma Wayss & Freytag führt das Spannbettverfahren 1939 ein.

Der Bauingenieur und Architekt *Pier Luigi Nervi* (1891–1979) nutzt die Möglichkeiten, die sich durch die Addition gleicher oder ähnlicher Bauelemente ergeben, auf neue und einzigartige Weise. Das bekannteste Beispiel ist wohl der Palazzetto dello Sport in Rom (Abb. 1.20) aus dem Jahre 1957. Die Halle wird von einer flachen Kalotte mit einem inneren Durchmesser von knapp 60 m überspannt. Die auf der Innenfläche sichtbaren Rippen und die dazwischen liegenden Flächen wurden als Fertigteile vorgefertigt und mit Ortbeton zu einer monolithischen Struktur ergänzt.

Auch wenn die „Platte“ heute mit einem eher negativen Image belegt ist, so muss man doch anerkennen, dass die Plattenbauweise – aus der Wohnungsnot nach 1945 heraus entwickelt – in ganz Europa neben weniger gelungenen auch zahlreiche gute Beispiele hervorgebracht hat. Komplett vorgefertigte Decken- und Wandplatten werden heute im Wohnungsbau kaum noch eingesetzt. Allerdings haben sich Halbfertigteile mit Ortbetonerfüllung für Decken bis zu mittleren Spannweiten, aber auch für Kellerwände ohne größere statische Anforderungen, als Standard-Konstruktion durchgesetzt.



Abb. 1.20 Palazzetto dello Sport von Pier Luigi Nervi (1957), aus [13].

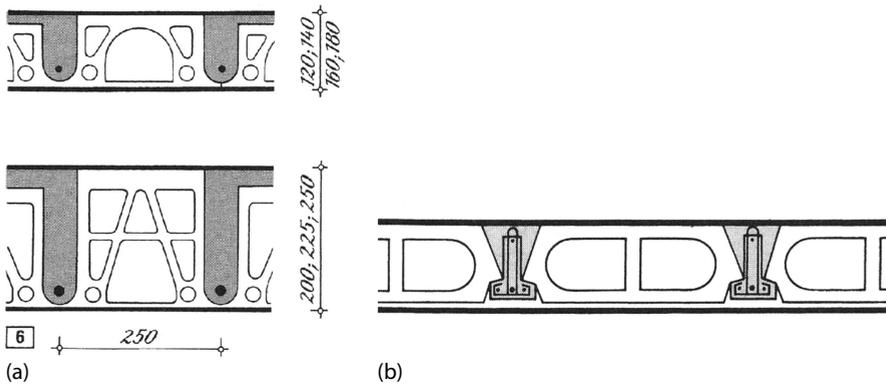


Abb. 1.21 Deckensysteme. (a) Kaiser-Decke; (b) Decke mit nichttragenden Füllkörpern und Fertigteilbalken, aus [14].

Bis in die frühen 1980er-Jahre waren für Ein- und Zweifamilienhäuser Balkendecken mit Hohlkörpern sehr beliebt (Abb. 1.21). Sowohl die tragenden Balkenelemente als auch die dazwischen angeordneten Betonhohlkörper konnten ohne aufwendige Hebezeuge transportiert und versetzt werden. Zur Herstellung einer planen Oberfläche war vergleichsweise wenig Ortbeton erforderlich. Mangelhafter Schallschutz auf der einen und Rissanfälligkeit wegen fehlender Querbewehrung auf der anderen Seite sind die Gründe, weshalb dieses Konstruktionsprinzip heute nicht mehr angewandt wird. Zurückzuführen ist es auf das System der sogenannten Stahlsteindecken, das zu Beginn des 20. Jahrhunderts, vor allem im mehrgeschossigen Wohnungsbau, sehr beliebt war. Bei diesem Konstruktionsprinzip tragen schmale, etwa 5 cm breite, bewehrte Ortbetonrippen im Verbund mit Hohlkörpern, die meist aus Ton gebrannt wurden. In der Druckzone wurden die Fugen der Hohlkörper vermörtelt oder mit fließfähigem Mörtel vergossen. Eine Druckplatte aus Ortbeton kann, muss aber nicht vorhanden sein. Ein solches Deckensystem wurde 1894 als Kleine'sche-Decke erstmalig zugelassen. 1904 ermöglichte es ein Runderlass der preußischen Bauverwaltung, dass auf der Grundlage klar definierter Randbedingungen jeder Unternehmer sein eigenes Stahlsteindeckensystem entwickeln konnte. Davon wurde rege Gebrauch gemacht. Die einschlägige Literatur [14] listet knapp 400 unterschiedliche Systeme auf.

1.6 Dauerhaftigkeit und neue Werkstoffe

Die Begeisterung für den Stahlbeton erfuhr seit den 1970er-Jahren eine gewisse Dämpfung, weil immer häufiger bei einzelnen Bauwerken die Karbonatisierungsfreigrenze, den bekannten Gesetzmäßigkeiten folgend (siehe Abschn. 3.3.2), die Ebene des Bewehrungsstahls erreicht hatte und der Stahl somit nicht mehr vor Korrosion geschützt war. In der Konsequenz wird seit 1988 in DIN 1045 ein über das Mindestmaß der Betondeckung hinausgehendes Vorhaltemaß von 1 cm definiert. Diese Forderung hatte G. Franz schon fünf Jahre zuvor formuliert [15].

Vonseiten der Betontechnologie wurden in dieser Zeit Betonverflüssiger und Erstarrungsverzögerer als Betonzusatzmittel entwickelt, mit dem Ziel, die Verarbeitung des Frischbetons auf der Baustelle ohne negative Beeinflussung des W/Z-Wertes zu vereinfachen. Weitere Bestrebungen zur Verbesserung des Betongefüges im Sinne einer möglichst hohen Packungsdichte gipfelten Ende des 20. Jahrhunderts in der Entwicklung von ultrahochfestem Beton (UHPC – ultra high performance concrete) mit Druckfestigkeiten über 150 N/mm^2 .

Die weltweit erste Fußgängerbrücke, bei der 1997 die wesentlichen Tragelemente aus UHPC hergestellt worden waren, überbrückt mit einer Spannweite von 60 m den Rivière Magog in Sherbrooke (Quebec, Kanada) [16]. In Deutschland hat die Gärtnerplatzbrücke in Kassel einige Berühmtheit erlangt. Bei dieser Konstruktion wurde ein Stahlfachwerk mit UHPC-Fertigteilen kombiniert. Diese bilden gleichzeitig den Obergurt des Fachwerks und die Gehwegplatte [17]. Ein imposantes Beispiel, bei dem 15 trogförmige Fertigteile durch Vorspannung zu einem 69 m weit spannenden Träger verbunden wurden, ist die 2005 fertiggestellte Fußgängerbrücke über den Herault Canyon bei Montpellier (Frankreich) [16, 18].

Da UHPC eine sehr gute Oberflächenhaftung aufweist, eignet er sich auch für nachträgliche Verstärkungen. Bei der Instandsetzung der 1969 fertiggestellten Hangbrücke bei Chillon (Schweiz) wurden durch den flächigen Auftrag einer 40 mm dicken schlaff bewehrten UHPC-Schicht die Tragfähigkeit und die Ermüdungssicherheit des Brückenträgers erhöht [19].

Die Bewehrungskorrosion kann auch dadurch verhindert werden, wenn anstelle Stahls Bewehrungselemente aus Kunststofffasern verwendet werden. Die erste ausschließlich textilbewehrte Brücke hat 15 m Spannweite und wurde 2010 in Albstadt-Ebingen fertiggestellt [20].

1.7 Zeittafel

ca. 1000 v. Chr.	Wasserfester Mörtel durch das Mischen von Luftkalk und gebranntem Ton, vermutlich durch die Phönizier erfunden
3. Jh. v. Chr.	Hydraulisches Bindemittel gewonnen aus der Puzzolanerde
2. Jh. v. Chr.	Römisches Gussmauerwerk, <i>opus caementitium</i>
2. Jh. n. Chr.	Bau des Pantheons
1756	Edystone-Leuchtturm mit hydraulischem Mörtel gemauert, <i>John Smeaton</i>
1824	Patent für Portlandzement, <i>Joseph Aspdin</i>
1854	Patent für eine bewehrte Deckenkonstruktion, <i>William Boutland Wilkinson</i>
1855	Erstes deutsches Zementwerk in Züllchow bei Stettin
1855	Patent für die Stampfbetonbauweise, <i>Françoise Coignet</i>
1855	Patent zur Herstellung von „feuchtigkeitsgefährdeten Gegenständen“ aus Beton unter Verwendung eines Drahtnetzes, <i>Joseph Louis Lambot</i>
1861	Patent zur Bewehrung von Betondecken, <i>Françoise Coignet</i>
1867	Erstes Patent für die Eisenbetonbauweise, <i>Joseph Monier</i>

1877	Technischer Bericht zu Deckenkonstruktionen aus Stahlbeton, <i>Taddeus Hyatt</i>
1885	<i>Gustav Wayss</i> erwirbt die Monier-Patente für Deutschland
1887	<i>Gustav Wayss</i> gibt die von <i>Mathias Koenen</i> in den wesentlichen Teilen verfasste <i>Monier-Broschüre</i> heraus
1892	Patent für das monolithische Verbundbalkensystem, <i>Françoise Hennebique</i>
1901	Einsturz des nach den Patenten Hennebiques errichteten Hotels „Zum Bären“ in Basel
1904	Erste preußische „Bestimmungen für die Ausführung von Konstruktionen aus Eisenbeton“
1905	Erste Auflage „Der Eisenbetonbau“ von <i>Emil Mörsch</i>
1908	Deckensystem mit Pilzkopfstützen, <i>Robert Maillart</i>
1913	Jahrhunderthalle in Breslau
1920	Brücken mit versteiftem Stabbogen, <i>Robert Maillart</i>
1928	Patent für das Spannbettverfahren, <i>Eugène Freyssinet</i>
1938	Erste Spannbetonbrücke in Deutschland, <i>Wayss und Freitag</i>
1939	Patent für das Spannverfahren mit nachträglichem Verbund, <i>Eugène Freyssinet</i>
1988	Einführung des Vorhaltemaßes für die Betondeckung in DIN 1045

Einen anschaulichen Überblick über die spannenden Entwicklungen der Ingenieurbaukunst im 19. und 20. Jh. geben Peters [12] und Straub [13].

