

Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken

Werner Seim

Bauingenieur-Praxis



**Bewertung und
Verstärkung von
Stahlbetontragwerken**

Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken

Werner Seim

2., aktualisierte und erweiterte Auflage

Autor

Prof. Dr.-Ing. Werner Seim

Fachgebiet Bauwerkserhaltung und Holzbau
Institut für Konstruktiven Ingenieurbau
Universität Kassel
Kurt-Wolters-Straße 3
34125 Kassel

2. Auflage 2018

■ Alle Bücher von Ernst & Sohn werden sorgfältig erarbeitet. Dennoch übernehmen Autoren, Herausgeber und Verlag in keinem Fall, einschließlich des vorliegenden Werkes, für die Richtigkeit von Angaben, Hinweisen und Ratschlägen sowie für eventuelle Druckfehler irgendeine Haftung.

Titelbild

Detail Linachtalsperre, Vöhrenbach im Schwarzwald (Foto: Werner Seim)

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© 2018 Wilhelm Ernst & Sohn, Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Rotherstraße 21, 10245 Berlin, Germany

Alle Rechte, insbesondere die der Übersetzung in andere Sprachen, vorbehalten. Kein Teil dieses Buches darf ohne schriftliche Genehmigung des Verlages in irgendeiner Form – durch Photokopie, Mikroverfilmung oder irgendein anderes Verfahren – reproduziert oder in eine von Maschinen, insbesondere von Datenverarbeitungsmaschinen, verwendbare Sprache übertragen oder übersetzt werden. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen, Handelsnamen oder sonstigen Kennzeichen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass diese von jedermann frei benutzt werden dürfen. Vielmehr kann es sich auch dann um eingetragene Warenzeichen oder sonstige gesetzlich geschützte Kennzeichen handeln, wenn sie nicht eigens als solche markiert sind.

Print ISBN 978-3-433-03194-0

ePDF ISBN 978-3-433-60840-1

ePub ISBN 978-3-433-60839-5

oBook ISBN 978-3-433-60837-1

Umschlaggestaltung Stefanie Eckert-Kimmig, stilvoll

Satz le-tex publishing services GmbH, Leipzig

Inhaltsverzeichnis

Vorwort zur 2. Auflage IX

Vorwort zur 1. Auflage XI

Abkürzungsverzeichnis XIII

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Konstruktionsgeschichte | 1 |
| 1.1 | Römischer Beton | 1 |
| 1.2 | Portlandzement und Stampfbeton | 5 |
| 1.3 | Die Eisenbetonbauweise | 8 |
| 1.4 | Die Spannbetonbauweise | 17 |
| 1.5 | Fertigteile | 19 |
| 1.6 | Dauerhaftigkeit und neue Werkstoffe | 21 |
| 1.7 | Zeittafel | 22 |
| | | |
| 2 | Zuverlässigkeit von Tragwerken | 25 |
| 2.1 | Angewandte Statistik | 26 |
| 2.2 | Auswertung von Stichproben | 28 |
| 2.3 | Sicherheitskonzepte für Tragwerke | 30 |
| 2.4 | Sicherheitsbeiwerte für bestehende Tragwerke | 35 |
| 2.4.1 | Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile nach Nachrechnungsrichtlinie [38] | 36 |
| 2.4.2 | Modifizierte Teilsicherheitsbeiwerte für Stahlbetonbauteile nach DBV | 37 |
| 2.5 | Rechenbeispiele | 39 |
| 2.5.1 | Auswertung von Versuchen zur Bestimmung der Betondruckfestigkeit | 39 |
| 2.5.2 | Auswertung von Versuchen zur Bestimmung der Oberflächenzugfestigkeit | 39 |
| | | |
| 3 | Beton und Stahl | 41 |
| 3.1 | Beton | 41 |
| 3.1.1 | Spezifisches Gewicht | 41 |
| 3.1.2 | Einachsige Druckbeanspruchung | 42 |
| 3.1.3 | Zugbeanspruchung | 46 |

| | | |
|----------|--|------------|
| 3.1.4 | Mehrachsiges Beanspruchung | 48 |
| 3.1.5 | Temperatur, Schwinden, Kriechen | 50 |
| 3.2 | Betonstahl | 52 |
| 3.2.1 | Herstellung | 52 |
| 3.2.2 | Festigkeit und Verformungseigenschaften | 53 |
| 3.2.3 | Oberflächenformen | 57 |
| 3.2.4 | Stahl-Beton-Verbund | 57 |
| 3.2.5 | Schweißbeignung | 64 |
| 3.3 | Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauteilen | 65 |
| 3.3.1 | Feuchteeinwirkung | 65 |
| 3.3.2 | Karbonatisierung und Korrosion | 66 |
| 3.3.3 | Widerstandsfähigkeit | 69 |
| 3.4 | Rechenbeispiele | 70 |
| 3.4.1 | Ermittlung der Druckfestigkeit für umschnürten Beton | 70 |
| 3.4.2 | Prognose des Karbonatisierungsfortschritts | 70 |
| 4 | Baustatik und Bemessung | 71 |
| 4.1 | Elastizität und Plastizität | 73 |
| 4.2 | Schnittgrößen und Beanspruchungen | 76 |
| 4.2.1 | Stabwerke | 76 |
| 4.2.2 | Platten und Scheiben | 77 |
| 4.3 | Bauteilwiderstände und Tragfähigkeiten | 78 |
| 4.3.1 | Definition der Tragsicherheit | 79 |
| 4.3.2 | Biegebemessung | 82 |
| 4.3.3 | Schubtragfähigkeit | 84 |
| 4.3.4 | Druckbeanspruchung und Knicken | 89 |
| 4.4 | Rechenbeispiele | 92 |
| 4.4.1 | Iterative Ermittlung der Schnittgrößen eines Durchlaufträgers | 92 |
| 4.4.2 | Ermittlung der Schnittgrößen eines Durchlaufträgers mit Tabellenwerten | 94 |
| 4.4.3 | Schnittgrößen eines Rahmens nach Kleinlogel | 97 |
| 4.4.4 | Biegebemessung einer Stahlbetonplatte nach alten Vorschriften | 99 |
| 4.4.5 | Schubbemessung eines Stahlbetonunterzugs nach alten Vorschriften | 100 |
| 4.4.6 | Bemessung einer Stütze nach alten Vorschriften | 103 |
| 5 | Zustandserfassung | 105 |
| 5.1 | Bauteilgeometrie und Oberflächen | 106 |
| 5.1.1 | Raumkanten im Grund- und Aufriss | 106 |
| 5.1.2 | Oberflächen | 109 |
| 5.1.3 | Inneres Gefüge | 111 |
| 5.2 | Materialkennwerte | 115 |
| 5.2.1 | Druckfestigkeit von Beton – direktes Verfahren | 115 |
| 5.2.2 | Druckfestigkeit von Beton – indirekte, kombinierte Verfahren | 117 |
| 5.2.3 | Oberflächenzugfestigkeit | 118 |
| 5.2.4 | Alkalität und Chloridgehalte | 119 |
| 5.2.5 | Porosität und Diffusionswiderstand | 120 |

- 5.2.6 Zugfestigkeit und Schweißseignung des Bewehrungsstahles 120
- 5.3 Dokumentation 122

- 6 Bewertung der Tragfähigkeit 125**
 - 6.1 Rechnerische Bewertung der Tragfähigkeit 126
 - 6.1.1 Altes Tragwerk – neue Norm 127
 - 6.1.2 Verwendung „individueller“ Materialkennwerte 129
 - 6.1.3 Plastische Berechnungsverfahren 130
 - 6.1.4 Räumliche Tragwirkung 135
 - 6.2 Experimentelle Verfahren 138
 - 6.2.1 Belastungsversuche an Bauwerken 140
 - 6.2.2 Experimentelle Ermittlung der Tragfähigkeit 144
 - 6.3 Bauwerksüberwachung 145
 - 6.3.1 Inspektion 148
 - 6.3.2 Überwachung von Verformungen und Kräften 150
 - 6.3.3 Überwachung der Dauerhaftigkeit 153
 - 6.4 Brandschutz und Feuerwiderstand 154
 - 6.4.1 Anforderungen an Bauteile 154
 - 6.4.2 Beton und Stahl unter hohen Temperaturen 154
 - 6.4.3 Bewertung der Feuerwiderstandsdauer 156
 - 6.5 Rechenbeispiele 157
 - 6.5.1 Tragfähigkeit einer Stütze 157
 - 6.5.2 Biege- und Schubtragfähigkeit eines Unterzugs 159

- 7 Instandsetzung und Reparatur von Betonbauteilen 163**
 - 7.1 Vorbereitung der Instandsetzung 164
 - 7.2 Vorbereitung des Betonuntergrundes 165
 - 7.3 Vorbereiten der Bewehrung 168
 - 7.4 Instandsetzungs- und Reparaturmörtel 168
 - 7.5 Füllen von Rissen und Hohlräumen 170
 - 7.6 Oberflächenschutzsysteme 175

- 8 Nachträgliche Verstärkung mit Beton und Spritzbeton 179**
 - 8.1 Technologische Grundlagen 180
 - 8.1.1 Verfahrenstechnik 180
 - 8.1.2 Materialtechnologie 180
 - 8.1.3 Vorbereitung, Auftrag und Nachbehandlung 182
 - 8.2 Nachträgliche Verstärkung von Platten und Balken 183
 - 8.2.1 Grundlagen der Bemessung 183
 - 8.2.2 Ergänzungen von oben 187
 - 8.2.3 Ergänzung von unten 188
 - 8.3 Verstärkung von Stützen 191
 - 8.3.1 Grundlagen der Bemessung 192
 - 8.3.2 Stützenverstärkung mit Spritzbeton 195
 - 8.4 Beispiele 196
 - 8.4.1 Nachträgliche Verstärkung eines Biegeträgers – monolithischer Querschnitt 196

| | | |
|----------|---|------------|
| 8.4.2 | Nachträgliche Verstärkung einer Stahlbetonstütze mit Spritzbeton | 198 |
| 9 | Nachträgliche Verstärkung mit geklebten Faserverbundwerkstoffen | 201 |
| 9.1 | Klebertechnologie und Faserverbundwerkstoffe | 202 |
| 9.1.1 | Klebstoffe | 202 |
| 9.1.2 | Faserverbundwerkstoffe | 207 |
| 9.1.3 | Kleben im Bauwesen | 212 |
| 9.2 | Verstärkung von Stahlbetonplatten und -balken | 215 |
| 9.2.1 | Grundlagen der Bemessung – Biegetragfähigkeit | 219 |
| 9.2.2 | Grundlagen der Bemessung – Zugkraftdeckung, Verankerung | 228 |
| 9.2.3 | Schubtragfähigkeit | 235 |
| 9.3 | Umschnürung von Druckgliedern und Rahmenecken | 238 |
| 9.4 | Ausführung und Qualitätssicherung von Klebearbeiten | 239 |
| 9.4.1 | Vorbereitung | 239 |
| 9.4.2 | Durchführung von Klebearbeiten | 241 |
| 9.4.3 | Abschluss und Dokumentation | 243 |
| 9.5 | Rechenbeispiele | 244 |
| 9.5.1 | Zugfestigkeit und Elastizitätsmodul von Faserverbundwerkstoffen | 244 |
| 9.5.2 | Nachträgliche Verstärkung einer Stahlbetonplatte – Bemessung mit Teilsicherheitsbeiwerten | 244 |
| | Literatur | 249 |
| | Stichwortverzeichnis | 259 |

Vorwort zur 2. Auflage

Die 1. Auflage dieses Buches entstand vor über zehn Jahren, in einer Zeit als Baumaßnahmen in Bestand längst zu den täglichen Aufgaben für Bauingenieure gehörten, die Methoden für die „Bewertung und Verstärkung von Stahlbetontragwerken“ aber noch sehr unvollständig und lückenhaft dokumentiert und erläutert waren.

Es ist sehr erfreulich, dass sich die Situation zwischenzeitlich völlig verändert hat. Beispielhaft seien hier die Aktivitäten des Deutschen Beton- und Bautechnik-Vereins genannt, der allein seit 2007 sechs Merkblätter und zehn Hefte herausgebracht hat, zu Themen in Zusammenhang mit dem Bauen im Bestand.

Lag vor zehn Jahren die Herausforderung darin, die verfügbaren Informationen in eine sinnvolle Ordnung zu bringen und die vorhandenen Lücken durch praxistaugliche Ansätze zu schließen, so konnte ich bei der Vorbereitung der zweiten Auflage auf eine Vielzahl nützlicher und aktueller Veröffentlichungen zurückgreifen.

Für die zweite Auflage wurden die Inhalte vollständig aktualisiert mit Bezug zu den gültigen technischen Regelwerken. Darüber hinaus wurden einige Teile zum besseren Verständnis vollständig überarbeitet. Dazu zählen die Abschnitte zur Statistik, zu den Sicherheitsbeiwerten sowie zu den Materialkennwerten für Stahl und Beton.

Neu hinzugekommen sind die Abschnitte zum Bestandsschutz, zur Feuerwiderstandsdauer und zum Stahl-Beton-Verbund.

Ein besonderer Dank gilt *Karsten Schilde* für seine sorgfältige Durchsicht und seine Korrekturvorschläge zu den aktualisierten Teilen dieser 2. Auflage.

Kassel, im Juni 2018

Werner Seim

Vorwort zur 1. Auflage

Bezogen auf das gesamte Bauvolumen ist der Anteil reiner Neubauten rückläufig. Unterschiedliche Schätzungen gehen davon aus, dass der Anteil der Baumaßnahmen im Bestand am gesamten Bauvolumen derzeit etwa 60 % beträgt. Es wird als realistisch angesehen, dass sich dieser Anteil in den kommenden Jahren auf bis zu 70 % erhöhen wird.

Baustoffindustrie, Baufirmen und Handwerker haben sich auf den veränderten Markt längst eingestellt; das gilt auch für viele Universitäten und Hochschulen, die spezielle Kurse und Vertiefungsrichtungen anbieten. Die Fachliteratur zum Thema „Bauwerkserhaltung“ ist so umfangreich, dass es schwer wird, die Übersicht zu bewahren.

Dennoch scheint es, dass das Thema „Bewertung und nachträgliche Verstärkung von Stahlbetontragwerken“ bisher etwas zu kurz gekommen ist. Das mag zum einen daran liegen, dass in den vergangenen Jahren die Einführung neuer Normkonzepte die Aufmerksamkeit auf sich zog. Zum anderen gab es bei der Verstärkungstechnologie mit der Anwendung der Klebetechnik eine geradezu sprunghafte Entwicklung.

Das vorliegende Buch soll helfen, diese Lücke zu schließen. Mein Ziel war es, Erfahrungen aus der Praxis, aus der Lehre und aus der Bearbeitung von Forschungsprojekten einzubringen und zusammenzufassen. Dabei war es mir wichtig, die Themen der neun Kapitel in die Grundsystematik einzubinden, die von *Klaus Pieper* vor über 40 Jahren mit „*Anamnese – Diagnose – Therapie*“ zeitlos treffend aus der Medizin für den Umgang mit bestehenden Bauwerken übernommen wurde.

Das erste Kapitel gibt einen gestrafften Überblick zur *Konstruktionsgeschichte*, um ein Gefühl dafür zu vermitteln, was den Planer im Bestand erwarten kann. Die Grundlagen zur *Zuverlässigkeit von Tragwerken* werden im zweiten Kapitel so weit dargestellt, wie sie für die Definition und das Verständnis von Teilsicherheitsbeiwerten und für die Bewertung von am Bauwerk gewonnenen Stichproben erforderlich sind. Neben den wichtigsten Grundlagen zur Werkstoffmechanik und zur Dauerhaftigkeit von *Beton und Stahl* enthält das dritte Kapitel einige Hinweise auf die historischen Wurzeln dieser Erkenntnisse. Das vierte Kapitel dokumentiert die wichtigsten Entwicklungsschritte im Zusammenhang mit der *Baustatik und Bemessung* von Stahlbetontragwerken. Ein grundlegendes Verständnis dieser ingenieurgeschichtlichen Meilensteine ist unerlässlich, wenn man Bestandsunterlagen verstehen und interpretieren muss.

Die wichtigsten Hilfsmittel für eine *Zustandserfassung* und die Systematik dazu werden im fünften Kapitel vorgestellt und erläutert. Das sechste Kapitel enthält zahlreiche Hinweise zur *Bewertung der Tragfähigkeit* von Stahlbetontragwerken und zur Quantifizierung von Tragreserven. In diesem Zusammenhang werden auch experimentelle Verfahren beschrieben und es werden einige Grundlagen zur Bauwerksüberwachung eingeführt. Das siebte Kapitel *Instandsetzung und Reparatur von Betonbauteilen* ist sehr kurz gefasst. Zu diesem Thema kann auf das umfangreiche Fachschrifttum verwiesen werden. Die beiden abschließenden Kapitel *Nachträgliche Verstärkung mit Beton und Spritzbeton* und *Nachträgliche Verstärkung mit geklebten Faserverbundwerkstoffen* sind ähnlich aufgebaut. Es werden zuerst einige technologische Grundlagen zur Spritzbetonbauweise bzw. zum Kleben von Faserverbundwerkstoffen eingeführt. Darauf aufbauend werden die Grundlagen der Bemessung von Verstärkungsmaßnahmen erläutert und es werden Hinweise für die Ausführung und Überwachung entsprechender Maßnahmen gegeben.

Bei meiner Arbeit haben mich zahlreiche Kollegen und Mitarbeiter unterstützt:

Gerhard Mehlhorn hat das Manuskript vollständig durchgesehen und es durch Korrekturen und kollegiale Hinweise an vielen Stellen verbessert.

Dirk Matzdorff, *Jan Rassek* und *Karsten Schilde* haben ihre vertieften Kenntnisse zu den Themen Spritzbeton, Zustandserfassung und geklebte Verstärkungen in die entsprechenden Kapitel eingebracht.

Peter Machner und *Wolfgang Römer* haben mich in zahlreichen Gesprächen an ihrer Erfahrung mit altem Beton und altem Stahl teilhaben lassen.

Von meinen Mitarbeitern *Heiko Koch*, *Uwe Pfeiffer* und *Martin Schäfers* wurden die Rechenbeispiele durchgesehen und die didaktischen Konzepte kritisch hinterfragt.

Vanessa Thurau und *Silvia Bruch* haben aus meinen Skizzen anschauliche Abbildungen entwickelt.

Marianne Aschenbrenner hat mit großer Sorgfalt handschriftliche Texte, Tabellen und Formeln für meine Vorlesungsmanuskripte getippt.

Claudia Ozimek hat als Lektorin die Entstehung des Buches mit großer Geduld und seine Fertigstellung mit dem nötigen Nachdruck begleitet.

Ihnen allen danke ich sehr herzlich.

Wenn es mir insgesamt gelungen ist, die Inhalte klar nachvollziehbar, theoretisch fundiert und so darzustellen, dass sie für die Praxis zu gebrauchen sind, so verdanke ich das nicht zuletzt meinen Lehrern *Bruno Thürlimann* und *Fritz Wenzel*.

Abkürzungsverzeichnis

Indizes

| | |
|----|--|
| 0 | Kräfte, Spannungen, Dehnungen vor einer Verstärkung |
| C | Beton |
| d | Bemessungswert |
| E | Einwirkung |
| f | Faserverbundwerkstoff |
| G | Eigengewicht |
| is | in situ, am Bauwerk oder aus am Bauwerk entnommenen Proben ermittelt |
| k | charakteristischer Wert |
| L | Kohlefaserlamelle |
| m | Mittelwert |
| Q | veränderliche Einwirkung |
| R | Bauteilwiderstand |
| S | Stahl |
| u | im rechnerischen Bruchzustand |

Statistik und Sicherheitsbeiwerte

| | |
|-----------|--|
| α | Wichtungsfaktor |
| β | Sicherheitsindex |
| γ | Teilsicherheitsbeiwert |
| μ | Mittelwert der Grundgesamtheit |
| ν | Sicherheitsfaktor |
| ν | Variationskoeffizient, Varianz einer Grundgesamtheit |
| n | Umfang einer Stichprobe |
| p_f | Versagenswahrscheinlichkeit |
| σ | Standardabweichung einer Grundgesamtheit |
| S | Standardabweichung einer Stichprobe |
| V | Variationskoeffizient, Varianz einer Stichprobe |
| $x_{f,p}$ | Fraktilwert mit der Wahrscheinlichkeit p |
| $x_{q,p}$ | Quantilwert mit der Wahrscheinlichkeit p |

| | |
|-------------|-----------------------------|
| x_i | Einzelwert einer Stichprobe |
| \bar{x}_n | Mittelwert einer Stichprobe |

Geometrie

| | |
|------------------|--|
| A_b | Querschnittsfläche des Betons |
| A_{eff} | effektiv umschnürte Fläche einer Stütze |
| A_k | Kernfläche einer Stütze |
| a_L | Achsabstand einzelner Streifen des Faserverbundwerkstoffs |
| A_L | Querschnittsfläche des Faserverbundwerkstoffs |
| a_s | Querschnittsfläche der Stahlbewehrung je Längeneinheit |
| A_s | Querschnittsfläche der Stahlbewehrung |
| b | Querschnittsbreite |
| b_0 | minimale Querschnittsbreite |
| b_{eff} | mitwirkende Plattenbreite für einen Plattenbalken |
| b_L | Breite des Faserverbundwerkstoffs |
| c | Betondeckung |
| d | Durchmesser eines Probekörpers |
| d | statisch wirksame Höhe bezogen auf die Stahlbewehrung |
| d_L | statisch wirksame Höhe bezogen auf den Faserverbundwerkstoff |
| d_s | Durchmesser eines Bewehrungsstahls |
| e | Exzentrizität |
| f | Ausmitte |
| h | Gesamthöhe des Bauteils, Höhe eines Probekörpers |
| l | Spannweite |
| l_0 | Abstand der Momentennullpunkte |
| s_r | mittlerer Rissabstand |
| s_{rm} | mittlerer Rissabstand |
| t_L | Dicke des Faserverbundwerkstoffs |
| x | Höhe der Betondruckzone |
| x_u | Höhe der Betondruckzone nach Umlagerung der Schnittgrößen |
| z | innerer Hebelarm |

Werkstoffe

| | |
|-------------------------------|---|
| α_{cc} | Abminderungsfaktor zur Berücksichtigung der Lasteinwirkungsdauer |
| ε_c | Dehnung des Betons |
| $\varepsilon_{\text{Ld,max}}$ | Dehnung einer Kohlefaserlamelle im Grenzzustand der Tragfähigkeit |
| ε_{Lk} | charakteristischer Wert der Bruchdehnung der Kohlefaserlamelle |
| ε_s | Dehnung des Stahls |
| ε_{uk} | charakteristischer Wert der Dehnung bei Höchstlast |
| β_c | Rauigkeitsbeiwert, Haftbeiwert |

| | |
|--------------------|---|
| β_p | Druckfestigkeit eines Betonprismas |
| β_R | Rechenwert der Betondruckfestigkeit |
| $\beta_{W,a}$ | Druckfestigkeit eines Betonwürfels mit der Seitenlänge a |
| β_{WS} | Serienfestigkeit, entspricht dem Mittelwert der Würfeldruckfestigkeit |
| E_b | Elastizitätsmodul des Betons |
| E_{Lk} | charakteristischer Wert des Elastizitätsmoduls einer Kohlefaserlamelle |
| E_{Lm} | Mittelwert des Elastizitätsmoduls einer Kohlefaserlamelle |
| E_s | Elastizitätsmodul des Stahls |
| f_{bd} | Bemessungswert der Verbundspannung |
| $f_{c,is,Bk,a}$ | Druckfestigkeit eines Bohrkerns mit der Seitenlänge a und der Höhe a |
| f_{cc} | Druckfestigkeit des Betons bei behinderter Querdehnung |
| $f_{c,cube,a}$ | Druckfestigkeit eines Betonwürfels mit der Seitenlänge a |
| $f_{c,cube,a,dry}$ | Druckfestigkeit eines Betonwürfels mit der Seitenlänge a , trocken gelagert |
| f_{cd} | Bemessungswert der einaxialen Druckfestigkeit des Betons |
| f_{ck} | charakteristischer Wert der Betondruckfestigkeit |
| $f_{ck,is}$ | charakteristische Druckfestigkeit des Bauwerksbetons |
| f_{cm} | Mittelwert der Betondruckfestigkeit |
| f_{ct} | zentrische Zugfestigkeit des Betons |
| $f_{ctm,surf}$ | Erwartungswert für den Mittelwert der Oberflächenzugfestigkeit |
| f_{cto} | Oberflächenzugfestigkeit des Betons |
| $f_{is,niedrigst}$ | Kleinstwert der Stichprobe |
| f_{Luk} | charakteristischer Wert der Zugfestigkeit einer Kohlefaserlamelle |
| $f_{m(n),is}$ | Mittelwert der Stichprobe |
| f_{yd} | Bemessungswert der Streckgrenze des Betonstahls |
| f_{yk} | charakteristischer Wert der Streckgrenze des Betonstahls |
| k_b | Druckfestigkeit eines Betonprismas |
| μ | Reibungsbeiwert oder bezogenes Biegemoment |
| w | Wasseraufnahmekoeffizient |
| zul σ_b | zulässige Betondruckspannung |
| zul σ_e | zulässige Stahlspannung |

Baustatik und Bemessung

| | |
|-----------|---|
| α | Winkel der Querkraftbewehrung zur Bauteilachse |
| δ | Faktor zur Momentenumlagerung |
| D_b | Betondruckkraft |
| F_{cd} | Bemessungswert der Druckkraft in der Betondruckzone |
| F_{cd} | Bemessungswert der Gurtlängskraft infolge Biegung |
| F_{cdj} | Bemessungswert des über die Fuge zu übertragenden Längskraftanteils |
| F_{Ld} | Bemessungswert der Zugkraft eines Faserverbundwerkstoffs |

| | |
|---------------|---|
| F_{sd} | Bemessungswert der Zugkraft des Betonstahls |
| k_{λ} | Korrekturfaktor zur Berücksichtigung der Schubschlankheit |
| λ | Schlankheit einer Stütze oder Schubschlankheit |
| λ_1 | Beiwert zur Ermittlung der effektiv umschnürten Fläche |
| λ_q | Beiwert zur Ermittlung der effektiv umschnürten Fläche |
| M_{cr} | Rissmoment |
| M_F | Feldmoment |
| M_{St} | Stützmoment |
| M_u | Bruchmoment |
| M_y | Fließmoment |
| N | Normalkraft |
| Q | Querkraft |
| σ_k | Knickspannung |
| σ_n | Normalkraft senkrecht zur Fuge infolge äußerer Last |
| τ_0 | Grundwert der Schubspannung |
| Θ | Neigung der Druckstrebe |
| ν | Querkraft, auf eine Strecke bezogen |
| V | Querkraft |
| Z_L | Zugkraft im Faserverbundwerkstoff |
| Z_s | Zugkraft im Bewehrungsstahl |
| ω | Knickzahl |

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 Feuchteeinwirkung 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

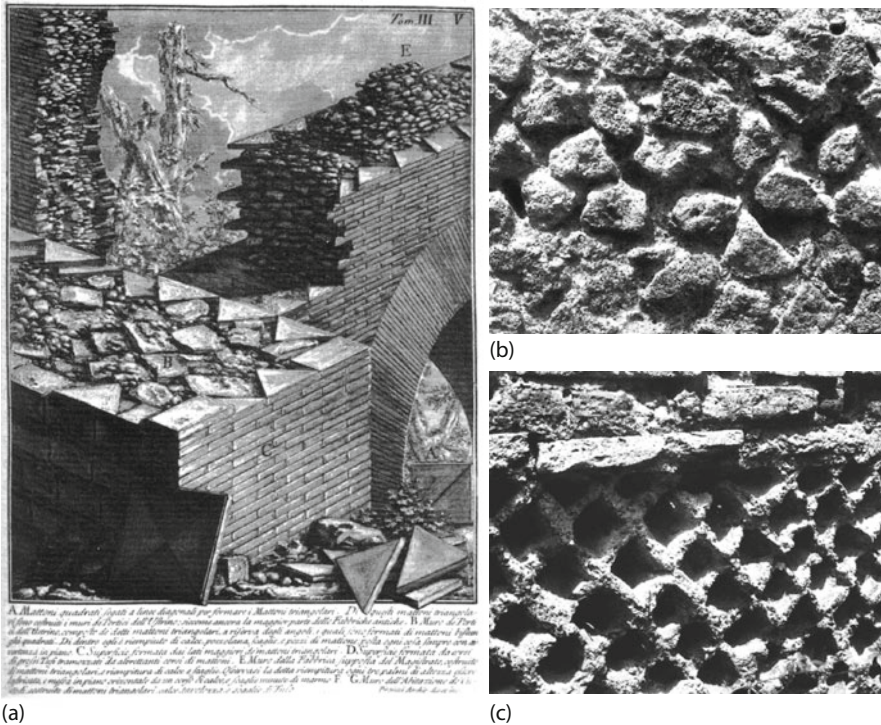


Abb. 1.2 Römische Wandkonstruktionen. (a) Nach Piranesi 1756 aus [3]; (b) *opus incertum* aus [2]; (c) *opus reticulatum* (Außenschale verwittert) aus [2].

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 Fischgrätenmuster 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.

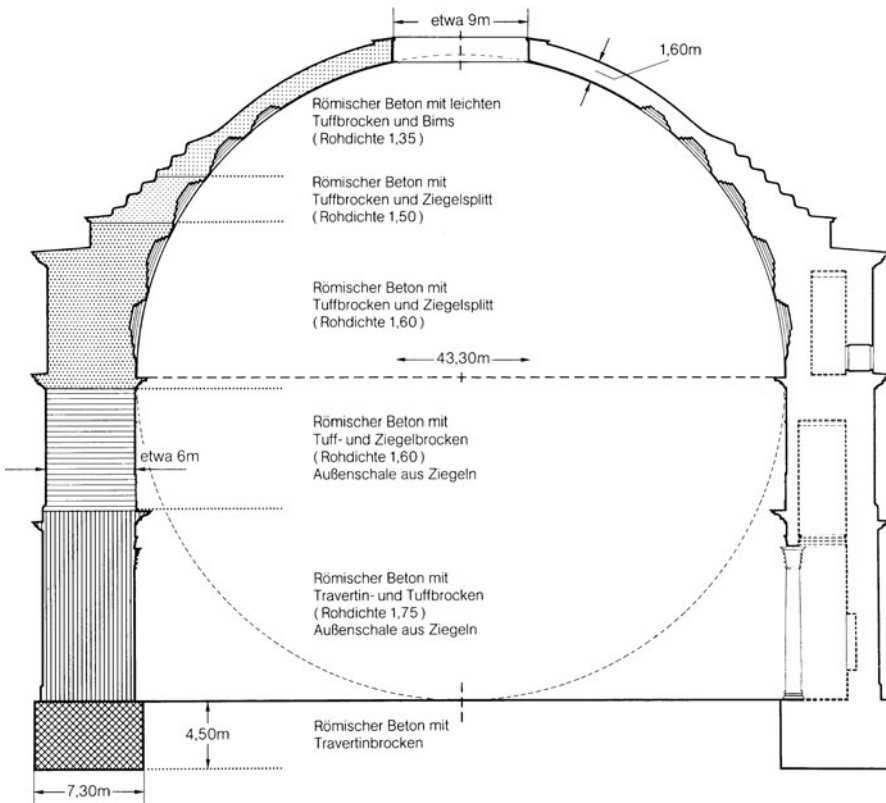


Abb. 1.3 Querschnitt durch das Pantheon (erbaut 2. Jh. n. Chr.) aus [4].

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

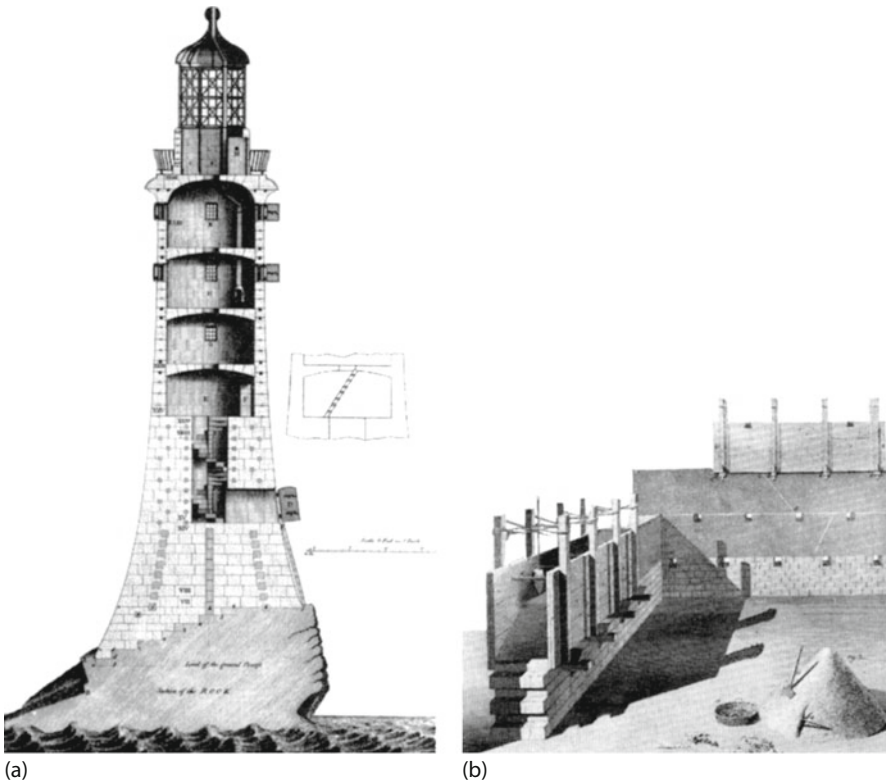


Abb. 1.4 (a) Zeitgenössische Darstellung des Edystone-Leuchtturms, aus [5]; (b) Schalungstechnik des Pisébaus nach Rondelet, aus [5].

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

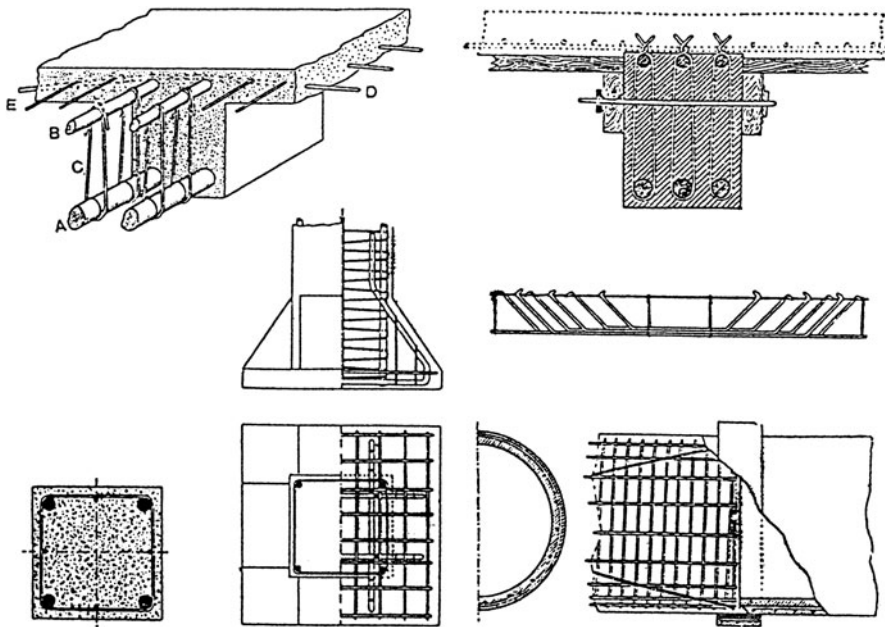


Abb. 1.7 Françoise Coignet, Zeichnung aus seinem Patent zur Bewehrung von Betondecken (1854), aus [4].

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-