



Röhling | Eifert | Jablinski

Betonbau

Band 1

**Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit –
Frischbeton**

Fraunhofer IRB ■ Verlag

Stefan Röhling, Helmut Eifert, Manfred Jablinski

Betonbau

Band 1

Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton

Stefan Röhling, Helmut Eifert, Manfred Jablinski

Betonbau

Band 1

Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton

Fraunhofer IRB Verlag

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.
ISBN: 978-3-8167-8644-3
ISBN (E-Book): 978-3-8167-8761-7

Herstellung: Dietmar Zimmermann
Layout: Daniela Heinemann
Umschlaggestaltung: Martin Kjer
Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach
Druck: Gulde-Druck, Tübingen
Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen. Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften. Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Redaktionsschluss: 27.01.2012

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2012
Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon (0711) 970-25 00
Telefax (0711) 970-25 08
E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de
<http://www.baufachinformation.de>

Geleitwort für die Reihe »Betonbau«

In einem Zeitraum von nahezu 150 Jahren ist der Beton zu einem der wichtigsten Baustoffe geworden, mit dem heute sehr unterschiedliche und vielfältige Bauaufgaben erfüllt werden können und zu dem bei besonderen Anforderungen keine Alternative besteht.

Die günstige Formbarkeit und nahezu unbegrenzte Gestaltungsmöglichkeit von Betonbauwerken, die hohe Tragfähigkeit bei Druckbeanspruchung, der Verbund mit dem Betonstahl zur Aufnahme der Zugkräfte, der Widerstand bei chemischem Angriff und biogenen Belastungen, der Brandschutz der Stahlbetonkonstruktionen und die Möglichkeit der industriellen Herstellung von Beton und von Betonfertigteilen sowie weitere Vorteile haben dazu geführt, dass in Verbindung mit dem großen Anwendungsumfang oft von einem Jahrhundertbaustoff gesprochen wird.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten war der Betonbau geprägt durch eine Reihe von bedeutsamen Veränderungen und innovativen Entwicklungen. Diese betreffen die Ausgangsstoffe für den Beton, die Betontechnologie, die Eigenschaften und die Regelwerke zur Qualitätssicherung. Besonders faszinierend ist die enorme Steigerung der Festigkeit, die wie bei keinem anderen Baustoff erreicht werden konnte. In wenigen Jahrzehnten nahm die mittlere Druckfestigkeit von 30 N/mm^2 auf etwa 150 N/mm^2 zu und erreichte mit der Ultrahochfestigkeit noch darüber liegende Werte. Damit wurden Spannweiten, Bauhöhen von Gebäuden und eine Feingliedrigkeit der Konstruktionen realisierbar, an die vorher nur im Stahlbau gedacht werden konnte. Weitere Beispiele der Innovation sind die Verbesserung des Zugtragverhaltens durch die Zugabe von Fasern aus verschiedenen Werkstoffen (Stahl, Kunststoff, textile Gewebe), die Vergrößerung des Widerstandes gegen chemische Beanspruchungen und die Belastung durch Frost-Tauwechsel, die Erhöhung der Dichtigkeit gegenüber Wasser und umweltgefährdenden Stoffen sowie die Anwendung als Sichtbeton. Diese Entwicklungen wurden begünstigt durch die Bereitstellung von stark verflüssigenden Zusatzmitteln für die Verbesserung der Verarbeitung des Frischbetons und die Erhärtungsbeschleunigung sowie von neuen Zusatzstoffen, wie Mikro- und Nanosilika, Farbpigmenten und Polymeren. Erwähnenswert ist auch die breitere Anwendung bekannter puzzolanischer und latent-hydraulischer Zusatzstoffe, wie Flugasche und Hüttensand, für die Herstellung von Zementen und des Betons. Die Verwendung von Flugasche und Hüttensand in Zementen hat auch zur Reduzierung des Klinkeranteiles geführt, mit den vorteilhaften Auswirkungen auf den Energieeinsatz zur Zementherstellung und den Klimaschutz durch Verminderung des CO_2 -Ausstoßes.

Bei vielen Bauaufgaben müssen die für Beton charakteristischen Vorgänge bei der Hydratation und Erhärtung besonders berücksichtigt werden. Beispielsweise können durch das Abfließen der Hydratationswärme und die Austrocknung Spannungen entstehen, die durch Rissbildung Schäden verursachen, so dass die Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gegeben sein kann. Diese zusätzlichen Beanspruchungen aus Zwang, Schwinden und Kriechen werden durch verschiedene Maßnahmen vermindert und nachteilige Auswirkungen durch eine entsprechende Mindestbewehrung verhindert.

Deutliche Fortschritte sind in der Verfolgung der Vorgänge in der Mikrostruktur des Zementsteines bei der Erhärtung, der Entwicklung der Eigenschaften und den vielfältigen Einwirkungen festzustellen. Aus der Tatsache heraus, dass alle vorteilhaften und nachtei-

ligen Eigenschaften ihre Ursache in der Entstehung und der Struktur des Zementsteines haben, wird mit großer Aufmerksamkeit der Einfluss der Erhärtungs- und Nutzungsbedingungen auf die Bildung und Veränderungen der Hydrate verfolgt. Deshalb ist verständlich, dass seit längerer Zeit versucht wird, direkte Beziehungen zwischen den Strukturkenngrößen und den makroskopischen Eigenschaften des Betons herzustellen.

Die komplizierten Zusammenhänge werden zunehmend mathematisch erfasst und in Computerprogramme integriert. Dadurch werden Möglichkeiten geschaffen, die bei bestimmten Zusammensetzungen zu erwartenden Eigenschaften sowie das Verhalten des Betons bei Beanspruchungen während der Erhärtung und der Nutzung zu prognostizieren. Nicht zu erkennen ist dabei, dass die mathematische Durchdringung der Vorgänge im Vergleich zur Bemessung im Beton- und Stahlbetonbau erst am Anfang steht.

Die aus Beton bestehenden Bauwerke verkörpern einen gewaltigen finanziellen und materiellen Aufwand. Unter diesem Gesichtspunkt besitzt die Dauerhaftigkeit und langfristige Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit eine herausragende Bedeutung. Im vergangenen Zeitraum wurde der Problematik ständig zunehmend Aufmerksamkeit gewidmet, da sich gezeigt hat, dass außerordentlich selten Baukonstruktionen infolge zu geringer Festigkeit versagen, sondern vergleichsweise häufiger infolge mangelhafter Dauerhaftigkeit und weiterhin, dass hohe Festigkeit nicht gleichbedeutend mit hoher Dauerhaftigkeit ist. Die daraus resultierenden Anforderungen reichen von der beanspruchungsgerechten Planung über die Auswahl der geeigneten Zusammensetzung sowie die sachgemäße Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons bis zur Instandhaltung der Betonbauwerke. Daraus resultiert zwangsläufig die Notwendigkeit eines engen Zusammenwirkens aller Beteiligten in der Bauvorbereitung und Baudurchführung.

Von Auswirkungen auf die Betonbauweise ist auch die Herausbildung der Europäischen Union mit der Harmonisierung der Regelwerke. Eine Vielzahl von Vorschriften wurde nach Einführung in den einzelnen Ländern bereits verbindlich, weitere sind in Vorbereitung oder liegen im Entwurf vor. Die Angleichung der deutschen Normen an ein in Europa neu gestaltetes und erweitertes Vorschriftenwerk ist ein Prozess, der auch zwangsläufig mit Änderungen in den fachlichen Auffassungen und den Gewohnheiten der Planungs- und Betoningenieure sowie der Auftraggeber und bauausführenden Unternehmen verbunden ist. Der große Umfang des Regelwerkes und anderer fachlicher Veröffentlichungen erschwert dem Einzelnen oft, den Überblick zu behalten und Neuerungen einordnen zu können.

Trotz umfangreicher Erfahrungen im Umgang mit dem Baustoff Beton können Mängel und Schäden während der Baudurchführung und an fertiggestellten Bauwerken nicht ausgeschlossen werden. Die Ursachen liegen oft in der Unkenntnis der Regelwerke, mangelhaftem Wissen um die Besonderheiten der Bauweise, falsch verstandener Wirtschaftlichkeit und einer ungenügenden Qualitätskontrolle während der Baudurchführung. Nicht beachtet werden auch die Koordination der am Bau Beteiligten und die Weitergabe von technischen Informationen, beispielsweise aus der Tragwerksplanung an die Bauausführung. Voraussetzung für ein erfolgreiches Zusammenwirken der Partner ist nicht nur eine hinreichende Fachkenntnis des Einzelnen auf seinem eigenen Fachgebiet, sondern auch in den benachbarten Tätigkeitsbereichen, damit Anforderungen richtig formuliert und Probleme aus sich widersprechenden Festlegungen rechtzeitig erkannt werden können.

Der Inhalt der Reihe »Betonbau« mit der Aufteilung in drei Bände wurde unter den vorgenannten Gesichtspunkten ausgewählt und gestaltet. Autoren und Verlag möchten dazu beitragen, dass Architekten und Ingenieure bei auftretenden Fragen in der Bauplanaung und Baudurchführung eine Antwort finden und darüber hinaus angeregt werden, sich mit einzelnen Sachverhalten weiter vertiefend zu beschäftigen. Gleichzeitig soll die Ausbildung der zukünftig im Betonbau arbeitenden Ingenieure unterstützt werden.

Vorwort zum Band 1

Im vorliegenden ersten Band der Reihe sind die wesentlichen Grundlagen des Betonbaus von der Planung bis zur Herstellung der Betonbauteile zusammengefasst. Charakteristisch ist, dass dabei Verweise auf ergänzende oder anwendungsorientierte Darstellungen in den beiden anderen Bänden aufgenommen worden sind.

Eine der Grundlagen bildet die Zusammensetzung, die Klassifizierung und die Dauerhaftigkeit des Betons in enger Verbindung mit dem Vorschriftenwerk. Dazu gehören die Ausgangsstoffe des Betons und deren Auswahl zur zielgerichteten Zusammensetzung, um den beanspruchungsbedingten Anforderungen zu entsprechen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Bedingungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit gelegt worden.

Als eine weitere Grundlage ist der Schalungs- und Bewehrungsbau einschließlich der dafür verwendeten Bau- und Werkstoffe enthalten. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht auf der Erläuterung der Schalungssysteme und einzelnen besonderen Ergebnissen des Schalungsbau, sondern in der Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Schalhaut- und Betonoberfläche, der Verwendung von Trennmitteln und der Erfassung des Frischbetondruckes. Einen wichtigen Aspekt bildet auch die Ermittlung des Ausschalzeitpunktes. Im gleichen Sinne ist der Bewehrungsbau auf die allgemeinen Konstruktionsregeln, den Bewehrungseinbau und die Bewehrungsabnahme konzentriert.

Weiterhin werden ausführlich die Herstellung, der Transport und der Einbau des Frischbetons behandelt und dabei wird besonderer Wert auf die Vorbereitung des Ablaufes der Betonarbeiten gelegt.

Schließlich wird der Inhalt vervollständigt durch die Beschreibung der Maßnahmen zur Qualitätssicherung, die die Nachweisführung der Betonarbeiten, die erforderlichen Prüfungen sowie die Bewertung und Auswertung von Prüfergebnissen umfassen.

Zum jeweiligen Gebiet werden die Vorschriften genannt. Wichtige Teile werden auszugsweise wiedergegeben. Die europäische Normung hat zu einer größeren Anzahl von zu beachtenden Vorschriften geführt, da auf nationale, ergänzende Anwendungsregeln noch nicht verzichtet werden kann. Die Literaturangaben ermöglichen, genannte Sachverhalte zu vertiefen und damit den Kenntnisstand zu erweitern. Dabei wurde darauf geachtet, die maßgebende internationale Fachliteratur einzubeziehen.

Die Darlegungen im Band 1 sind zwar vorrangig für die Bauvorbereitung und Bauausführung bestimmt, sollen aber darüber hinaus der Tragwerkplanung einen ausreichenden Überblick zu den Vorgaben für den Betonbau und deren Umsetzung in Konstruktion und Ausschreibung vermitteln.

Für die wertvollen Hinweise einer Reihe von Fachkollegen soll an dieser Stelle herzlich gedankt werden. Hervorzuheben ist die wertvolle Mitwirkung von Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Heinecke am Kapitel »Konstruktion und Einsatz von Schalungen« und von Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Bethge für die Arbeit am Kapitel »Qualitätssicherung«.

Die Autoren

1	Ausgangsstoffe für den Beton und Stahlbeton	17
1.1	Zement	17
1.1.1	Zementarten und Zusammensetzung der Zemente	18
1.1.2	Hauptbestandteile der Zemente	20
1.1.2.1	Portlandzementklinker (CEM I-Zemente)	20
1.1.2.2	Weitere Hauptbestandteile des Zements (CEM II bis CEM V-Zemente)	25
1.1.2.2.1	Hüttensand	25
1.1.2.2.2	Puzzolane (P, Q)	26
1.1.2.2.3	Gebrannter Schiefer (T)	26
1.1.2.2.4	Flugaschen (V, W)	26
1.1.2.2.5	Kalkstein (L, LL)	27
1.1.2.2.6	Silikastaub (D)	27
1.1.3	Zementklassen, bautechnische Eigenschaften und Anwendungsbereiche der Zemente	27
1.1.3.1	Normalzemente (Zemente mit Eigenschaften nach DIN EN 197)	27
1.1.3.1.1	Genormte bautechnische Eigenschaften der Zemente	28
1.1.3.1.2	Nicht genormte bautechnische Eigenschaften der Zemente	30
1.1.3.1.3	Anwendungsbereiche der Zemente	31
1.1.3.2	Sonderzemente (Zemente mit Eigenschaften nach DIN EN 197-1, DIN EN 14216 und DIN 1164)	35
1.1.3.3	Spezialzemente (Zemente mit definierten Eigenschaften innerhalb und außerhalb der Zementnormen)	38
1.1.4	Bezeichnung, Bestellung, Lieferung, Lagerung	41
1.1.5	Konformitätskontrolle, Rückstellproben	41
1.2	Gesteinskörnungen	42
1.2.1	Begriffe, Arten der Gesteinskörnungen, allgemeine Anforderungen	42
1.2.1.1	Normen für Gesteinskörnungen	43
1.2.1.2	Allgemeine Anforderungen	44
1.2.1.3	Arten von Gesteinskörnungen und deren Eignung für den Beton	44
1.2.1.3.1	Normale Gesteinskörnungen	44
1.2.1.3.2	Leichte Gesteinskörnungen	46
1.2.1.3.3	Schwere Gesteinskörnung und Gesteinskörnung für den Strahlenschutz	46
1.2.1.3.4	Rezyklierte Gesteinskörnung	46
1.2.2	Eigenschaften und Anforderungen an normale Gesteinskörnungen	46
1.2.2.1	Allgemeine Eigenschaften normaler Gesteinskörnungen	46
1.2.2.2	Geometrische Anforderungen	49
1.2.2.3	Wasseranspruch und Sieblinien der Gesteinskörnungen	57
1.2.2.3.1	Wasseranspruch	57
1.2.2.3.2	Lieferkörnungen	58
1.2.2.3.3	Sieblinien von Korngruppengemischen für Beton (Regelsieblinien)	59
1.2.2.3.4	Größtkorn	62
1.2.2.3.5	Mehlkorn	62
1.2.2.4	Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Gesteinskörnungen	62
1.2.2.4.1	Frost- und Frost-Tausalzwiderstand	63

1.2.2.4.2	Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen	65
1.2.2.4.3	Maßnahmen bei Einsatz von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen	68
1.2.2.5	Physikalische Anforderungen	70
1.2.2.6	Chemische Anforderungen	71
1.2.2.7	Übersicht der Anforderungskategorien und der Regelanforderungen	75
1.2.2.8	Der Einfluss der Gesteinskörnung auf den E-Modul und die Wärmedehnung	80
1.2.2.9	Konformitätsnachweis, CE-Kennzeichnung, Sortenverzeichnis, Lieferschein	80
1.2.3	Leichte Gesteinskörnungen	82
1.2.3.1	Arten von leichten Gesteinskörnungen	82
1.2.3.2	Beschreibung und Eigenschaften der wichtigsten leichten Gesteinskörnungen	84
1.2.3.3	Anforderungen an leichte Gesteinskörnungen	85
1.2.3.3.1	Physikalische Anforderungen an leichte Gesteinskörnungen	85
1.2.3.3.2	Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von leichten Gesteinskörnungen	86
1.2.3.3.3	Regelanforderungen für leichte Gesteinskörnungen nach DIN EN 13055-1	86
1.2.3.3.4	Gesteinsabhängige Bedingungen für den Einsatz von leichten Gesteinskörnungen	88
1.2.3.4	Konformitätsnachweis, CE-Kennzeichnung, Sortenverzeichnis	88
1.2.4	Rezyklierte Gesteinskörnungen	90
1.2.4.1	Arten und Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen und Anforderungen an die Zusammensetzung	91
1.2.4.2	Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen	93
1.2.4.3	Bedingungen für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton	96
1.2.5	Restbetongesteinskörnung	98
1.2.6	Künstlich hergestellte Gesteinskörnungen	98
1.3	Betonzusatzstoffe	99
1.3.1	Arten und Wirkungsweise der Betonzusatzstoffe	99
1.3.2	Gesteinsmehle	100
1.3.3	Pigmente (Farbstoffe)	100
1.3.4	Latent-hydraulische Betonzusatzstoffe	101
1.3.5	Puzzolanische Zusatzstoffe	101
1.3.6	Mikrosilika (Silikastaub)	105
1.3.7	Wirksamkeit und Anrechenbarkeit von Zusatzstoffen	107
1.3.8	Fasern	108
1.3.9	Organische Zusatzstoffe (Polymere)	108
1.4	Betonzusatzmittel	110
1.4.1	Arten und Bedingungen für den Einsatz von Betonzusatzmitteln	110
1.4.2	Erstarrungsverzögerer (VZ) und Erstarrungsbeschleuniger (BE)	117
1.4.3	Fließmittel (FM) und Betonverflüssiger (BV)	120
1.4.4	Luftporenbildner (LP) und Einsatz von Mikrohohlkugeln (MHK)	122
1.4.5	Stabilisierer (ST) und Sedimentationsreduzierer (SR)	126
1.4.6	Einpresshilfen (EH)	126

1.4.7	Betondichtungsmittel (DM)	127
1.4.8	Chromatreduzierer (CR)	127
1.4.9	Recyclinghilfen (RH)	127
1.4.10	Schwindreduzierer und Quellmittel	127
1.4.11	Korrosionsinhibitoren	128
1.4.12	Multifunktionale Zusatzmittel	128
1.5	Zugabewasser	129
1.5.1	Allgemeine Anforderungen (Trinkwasser, Verwendung von in der Natur vorkommenden Wässern)	129
1.5.2	Restwasser	132
1.6	Bewehrungsstahl	135
1.6.1	Betonstahlsorten und -bezeichnungen	135
1.6.2	Kennwerte für die Bemessung	147
1.7	Literatur	160
2	Klassifizierung und Zusammensetzung des Betons	163
2.1	Begriffe, Symbole, Bezeichnungen	163
2.2	Klassifizierung der Betone	165
2.2.1	Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton	165
2.2.2	Druckfestigkeitsklassen für Leichtbeton	168
2.2.3	Rohdichteklassen für Leichtbeton	168
2.3	Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Betons und Stahlbetons	170
2.3.1	Einwirkungen auf den Bewehrungsstahl	170
2.3.1.1	Karbonatisierung der Betondeckung (XC)	170
2.3.1.2	Chloride aus Taumitteln und aus Meerwasser	172
2.3.2	Einwirkungen auf den Beton	175
2.3.2.1	Frost- oder Frost-Tausalz-Angriffe (XF)	175
2.3.2.2	Chemische Angriffe (XA)	176
2.3.2.3	Verschleißbeanspruchung (XM)	180
2.3.2.4	Betonkorrosion durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion	181
2.3.2.5	Mikrobiologische Betonkorrosion	183
2.4	Zusammensetzung des Betons	183
2.4.1	Randbedingungen für den Entwurf der Betonzusammensetzung	185
2.4.2	Vorausberechnung der Betondruckfestigkeit	193
2.4.3	Mischungsentwurf	197
2.4.4	Erst- und Konformitätsprüfung	199
2.5	Literatur	201
3	Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons	203
3.1	Klassifizierung und Prüfung der Eigenschaften	203
3.1.1	Konsistenzklassen des Frischbetons	203

3.1.2	Probenahme zur Prüfung der Eigenschaften	208
3.1.3	Konsistenz	209
3.1.4	Rohdichte	216
3.1.5	Wassergehalt	217
3.1.6	Luftgehalt	217
3.1.7	Temperatur	219
3.2	Herstellen und Liefern des Frischbetons	221
3.2.1	Transportbeton und Baustellenbeton	221
3.2.2	Herstellen von Frischbeton	222
3.2.2.1	Anlieferung der Betonbestandteile	223
3.2.2.2	Abmessen (Dosieren) der Betonbestandteile	223
3.2.2.3	Transportieren, Umschlagen und Lagern der Betonbestandteile	224
3.2.2.4	Mischen des Frischbetons	226
3.2.2.5	Kontrolle und Überwachung der Herstellung und Lieferung von Transportbeton	231
3.2.2.6	Unterlagen der Herstellung und Lieferung von Transportbeton	231
3.2.3	Transport des Frischbetons	233
3.2.4	Bestellung und Abnahme von Transportbeton, Identitätsprüfung	237
3.2.4.1	Bestellung und Betonierplan	238
3.2.4.2	Abnahme von Transportbeton	241
3.2.5	Verwendung von Restbeton	244
3.3	Förderung des Frischbetons zur Einbaustelle	245
3.3.1	Rohrförderung	246
3.3.1.1	Pumpfähigkeit von Frischbeton	246
3.3.1.2	Einflüsse der Betonbestandteile	249
3.3.1.3	Betonpumpen und Verteilermaste	251
3.3.1.4	Rohrsortiment und Zubehör	256
3.3.1.5	Einsatzbedingungen für Autobetonpumpen und Arbeitssicherheit	257
3.3.2	Förderung mit Kran und Kübel	258
3.3.3	Bandförderung	260
3.3.4	Direkteinbau	261
3.3.5	Sonstige Methoden der Frischbetonförderung	261
3.4	Einbringen und Verdichten des Frischbetons	262
3.4.1	Vorbereitung des Betonierens und Betonierplan	262
3.4.2	Einbringen und Verteilen des Frischbetons	267
3.4.3	Verdichten des Frischbetons	268
3.4.3.1	Direktes Eintragen äußerer Kräfte	269
3.4.3.2	Verringerung der inneren Reibung	269
3.4.3.3	Stoffliche Bedingungen für das Verdichten	276
3.4.3.4	Nachverdichten des Betons	278
3.4.4	Oberflächenbearbeitung	278
3.4.5	Vorschriften zum Verdichten von Frischbeton	279
3.5	Literatur	280

4**Schalungs- und Bewehrungsbau****283**

4.1	Konstruktion und Einsatz von Schalungen	283
4.1.1	Grundlagen des Schalungsbau	283
4.1.2	Trennmittel	286
4.1.2.1	Anforderungen an Trennmittel	286
4.1.2.2	Auswahl von Trennmitteln	287
4.1.2.3	Anwendung der Trennmittel	289
4.1.3	Schalungshaut	290
4.1.3.1	Aufgaben und Eigenschaften der Schalungshaut	290
4.1.3.2	Saugverhalten	291
4.1.3.3	Oberflächentextur (Struktur der Oberfläche, Rauigkeit der Schalungshaut)	294
4.1.3.4	Holz als Schalungshaut	295
4.1.3.4.1	Wechselwirkung zwischen Holz und Frischbeton	295
4.1.3.4.2	Holzoberflächen der Schalungshaut	296
4.1.3.4.3	Fugenausbildung bei Brettern und Brettplatten	297
4.1.3.5	Schalungshautplatten	297
4.1.3.5.1	Auswahl der Schalungshautplatten	297
4.1.3.5.2	Grundtypen der Schalungshautplatten	297
4.1.4	Schalungsplanung	300
4.1.5	Belastung und Tragfähigkeit der Schalung	301
4.1.5.1	Begriffe nach DIN 18218	302
4.1.5.2	Ermittlung des Frischbetondruckes für lotrechte Schalungen	302
4.1.5.3	Berechnungsbeispiele zum Frischbetondruck für lotrechte Schalungen	304
4.1.5.4	Hinweise für die Anwendung in der Praxis	308
4.1.5.5	Frischbetondruck auf geneigte Schalungen	309
4.1.5.6	Belastung horizontaler Schalungen (Deckenschalungen)	312
4.1.6	Ausschalen und Ausrüsten	314
4.1.6.1	Anforderungen an das Ausschalen und das Ausrüsten	314
4.1.6.2	Hinweise zum Einsatz von Hilfsstützen	315
4.1.6.3	Beispiele für die Ermittlung des Ausschalzeitpunktes bzw. erforderlicher Unterstützungen	316
4.2	Bewehren von Stahlbetontragwerken	319
4.2.1	Allgemeine Bewehrungs- und -konstruktionsregeln	319
4.2.2	Allgemeine Anforderungen an Bewehrungen auf der Baustelle	321
4.2.3	Biegen, Transport und Lagerung auf der Baustelle	321
4.2.4	Schweißen von Bewehrungen	321
4.2.5	Einbau der Bewehrung	321
4.2.6	Abnahme der Bewehrung	324
4.3	Literatur	325

5	Betone mit besonderen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Bauteile	327
5.1	Korrosionsschutz der Bewehrung	327
5.1.1	Karbonatisierung des Zementsteins	328
5.1.1.1	Mechanismus der chemischen Reaktion	328
5.1.1.2	Karbonatisierungsbedingte Gefügeänderungen	328
5.1.1.3	Entwicklung der Karbonatisierungstiefe	329
5.1.1.4	Karbonatisierung, Depassivierung und Korrosionsgefahr	333
5.1.1.5	Nachweis des Karbonatisierungsfortschrittes	335
5.1.1.6	Sauerstoffkorrosion der Bewehrung	336
5.1.2	Chloride im Beton	338
5.1.2.1	Chlorideintrag in den Beton	338
5.1.2.2	Vordringen der Chloridfront im Bauteil	339
5.1.2.3	Korrosionsauslösende Chloridkonzentrationen	341
5.1.2.4	Chloridkorrosion der Bewehrung	341
5.1.2.5	Maßnahmen zur Überwachung der Korrosionsvorgänge in Stahlbetonbauteilen	342
5.1.3	Betondeckung der Bewehrungsstäbe	344
5.1.3.1	Maße der Betondeckung	344
5.1.3.2	Nachweis der Betondeckung am Bauwerk	348
5.2	Betone mit hohem chemischen Widerstand	351
5.2.1	Einwirkungen betonangreifender Stoffe	351
5.2.2	Angriffsgrade auf Beton und Stahlbeton	352
5.2.3	Betontechnische und konstruktive Maßnahmen	352
5.2.4	Maßnahmen bei starkem chemischen Angriff	354
5.2.5	Auswirkungen auf die Umwelt	354
5.3	Betone mit hohem Frost- (FW) und Frost-Tausalz-Widerstand (FTW)	354
5.3.1	Schädigungsmechanismus beim Frost- und Frost-Tausalz-Angriff	356
5.3.1.1	Schadensarten	356
5.3.1.2	Einflüsse auf den Frostwiderstand	358
5.3.1.3	Schädigungsmechanismen	360
5.3.2	Einflussgrößen auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton	362
5.3.2.1	Anforderungen an die Betonbestandteile	363
5.3.2.2	Anforderungen an die Zusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung frost- und frost-tausalz-beständiger Betone	368
5.3.2.3	Herstellung frostbeständiger und frost-tausalzbeständiger Betone	370
5.3.2.3.1	Deskriptives Konzept und Performancekonzept	370
5.3.2.3.2	DIN EN 206-1 und DIN 1045 und Expositionsklassen	371
5.3.2.3.3	Beton für Verkehrsbauten (ZTV-Ing)	372
5.3.2.3.4	Beton für Wasserbauten (ZTV-Wasserbau, Leistungsbereich 215 [5.50])	374
5.3.2.3.5	Expositionsklassen für Eisenbahnbrücken	376
5.3.2.3.6	Beton für Fahrbahndecken	376
5.3.2.3.7	Massige Bauteile aus Beton	378
5.3.2.3.8	Betonsteinpflaster und Bordsteine aus Beton	378

5.3.3	Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Widerstandes und des Frost-Taumittel-Widerstandes	378
5.3.3.1	Prüfverfahren der Vornorm DIN CEN/TS 12390-9	379
5.3.3.2	Prüfung der inneren Schädigung	385
5.3.3.3	CIF-Test	386
5.3.3.4	Andere besondere Bestimmungen (Länderregelungen)	386
5.3.3.5	Zuordnung der Expositionsklassen zu den Prüfverfahren [5.69]	391
5.3.3.6	Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Prüfverfahren	392
5.3.4	Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Sonderbetonen	394
5.3.4.1	Hochfeste Betone	394
5.3.4.2	Betone in der Expositionsklasse XF4 ohne Luftporen	394
5.4	Betone mit hohem Verschleißwiderstand	395
5.4.1	Stoffliche Anforderungen an Betone mit hohem Verschleißwiderstand	395
5.4.2	Technologische Anforderungen	400
5.4.3	Prüfverfahren und Verschleißwiderstandsklassen	401
5.5	Maßnahmen gegen schädigende Reaktionen im Beton	403
5.5.1	Sulfateinwirkungen auf erhärtetem Beton	404
5.5.2	Alkali-Gesteinskörnungs-Reaktion im Beton	405
5.5.2.1	Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton	405
5.5.2.2	Alkali-Carbonat-Reaktion	407
5.6	Literatur	408

6**Qualitätsüberwachung und Konformitätskontrolle****413**

6.1	Normative Regelungen und Einrichtungen für die Überwachung	413
6.1.1	Gesetzliche Regelungen	413
6.1.2	Überwachung der Betonherstellung	415
6.1.2.1	Eigenüberwachung der Betonherstellung	415
6.1.2.2	Anerkannte Überwachungsstelle und Zertifizierungsstelle	415
6.1.3	Überwachung der Betonarbeiten	415
6.1.3.1	Ständige Betonprüfstelle	415
6.1.3.2	Anerkannte Überwachungsstelle	416
6.2	Überwachungsklassen	417
6.3	Überwachungstätigkeiten, Prüfungen im Rahmen der Überwachung	418
6.3.1	Angaben zum Beton	418
6.3.2	Überwachungsklasse 1	419
6.3.3	Überwachungsklassen 2 und 3	419
6.3.4	Überwachung der Bewehrungsarbeiten	420
6.3.4.1	Anforderungen an die Überwachung gemäß DIN 1045-3	420
6.3.4.2	DAfStb-Richtlinie »Qualität der Bewehrung – Ergänzende Festlegungen zur Weiterverarbeitung von Betonstahl und zum Einbau der Bewehrung«	421
6.3.5	Überwachung der Schalarbeiten	422
6.3.6	Überwachung des Vorspannens	422

6.3.7	Überwachung der Verpressarbeiten	422
6.3.8	Überwachung der Spritzbetonarbeiten	423
6.3.9	Eisenbahnspezifische Besonderheiten der Qualitätskontrolle	423
6.4	Nachweis der Einhaltung der Festigkeitskennwerte und statistische Grundlagen der Qualitätssicherung	423
6.5	Kriterien der Qualitätsprüfungen des Betons (Konformitäts- und Identitätsprüfungen)	427
6.5.1	Qualitätsprüfungen des Herstellers, Prüfung der Konformität und Konformitätskriterien	427
6.5.1.1	Konformitätskriterien der Betondruckfestigkeit	428
6.5.1.2	Konformitätskriterien für Betonfamilien	429
6.5.1.3	Konformitätskriterien für die Spaltzugfestigkeit	431
6.5.1.4	Konformitätskriterien für andere Eigenschaften als die Druckfestigkeit	431
6.5.1.5	Konformitätskontrolle für Beton nach Zusammensetzung	432
6.5.2	Qualitätsprüfungen der Baustelle, Identitätsprüfung bzw. Annahmeprüfung und Identitätskriterien	432
6.5.3	Beziehung zwischen dem Konformitätsnachweis und der Identitätsprüfung	433
6.5.4	Sonderregelungen zum Prüfalter	434
6.6	Maßnahmen bei Nichtkonformität des Betons	434
6.7	Literatur	435

7**Zusammenstellung der Normen, Vornormen und Normentwürfe 437**

7.1	Normen für die Betonausgangsstoffe	437
7.1.1	Zement	437
7.1.2	Gesteinskörnungen	437
7.1.3	Wasser und Betonzusätze	437
7.1.4	Betonstahl	438
7.2	Normen für Beton, Stahlbeton und Spannbeton	438
7.3	Richtlinien, zusätzliche Vorschriften	439
7.4	Prüfnormen und Prüfvorschriften	440
7.4.1	Zement	440
7.4.2	Gesteinskörnungen	440
7.4.3	Betonzusätze und Betonstahl	442
7.4.4	Frischbeton	442
7.4.5	Festbeton, Faserbeton, Beton in Bauwerken	443
7.5	Sonstige Normen	444