




Röhling

Betonbau

Band 2

Hydratation – junger Beton – Festbeton

Fraunhofer IRB  Verlag

Stefan Röhling

Betonbau

Band 2

Hydratation – junger Beton – Festbeton

Stefan Röhling

Betonbau

Band 2

Hydratation – junger Beton – Festbeton

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 (E-Book): 978-3-8167-8645-0

ISBN (Print): 978-3-8167-8762-4

Herstellung: Dietmar Zimmermann

Layout: Daniela Heinemann

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach

Druck: DZA Druckerei zu Altenburg GmbH, Altenburg

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) 9 70-25 00
Telefax (0711) 9 70-25 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 Vorzüge 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 Strukturgrößen 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 verkennen 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 Neuerscheinungen einordnen zu können.

Trotz umfangreicher Erfahrungen im Umgang mit dem Baustoff Beton können Mängel und Schäden während der Baudurchführung und an fertig gestellten 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 Bauplanung 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.

Die Autoren

Vorwort zum Band 2

Im vorliegenden zweiten Band der Reihe sind wesentliche Zusammenhänge zum Verständnis der Entwicklung der Eigenschaften und der Dauerhaftigkeit des Betons sowie maßgebende Grundlagen für die Bemessung und Rissicherung von Betonkonstruktionen aufgenommen worden. Alle vorteilhaften und nachteiligen Eigenschaften des Betons haben ihre Ursache in der Entstehung und der Struktur des Zementsteines. Aus diesem Grund werden die Vorgänge bei der Hydratation und der Bildung der Hydrate, der Einfluss der Erhärtingsbedingungen und der Einwirkungen der Umgebungs- und Nutzungsbedingungen ausführlich dargestellt. International sind große Fortschritte bei der Verfolgung der Vorgänge in der Mikrostruktur sowie den Beziehungen zwischen den Strukturkenngößen und den makroskopischen Eigenschaften des Betons erreicht worden, die eine entsprechende Berücksichtigung finden. Dabei wird dem Einfluss der Erhärtings- und Nutzungsbedingungen auf die Bildung und Veränderungen der Hydrate besondere Aufmerksamkeit gewidmet.

Seit längerer Zeit wird versucht, direkte Beziehungen zwischen den Strukturkenngößen und den makroskopischen Eigenschaften des Betons herzustellen. Die komplizierten Zusammenhänge werden dabei 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. Darauf wird ebenfalls eingegangen. Nicht zu verkennen ist dabei, dass die mathematische Durchdringung der Vorgänge im Vergleich zur Bemessung im Beton- und Stahlbetonbau erst am Anfang steht.

Bei vielen Bauaufgaben müssen die für Beton charakteristischen Vorgänge bei der Hydratation und Erhärtung besonders berücksichtigt werden. Beispielsweise können durch das Abfließen der Hydrationswärme und die Austrocknung Spannungen entstehen, die durch Rissbildung Schäden verursachen, so dass die Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gegeben sein kann. Deshalb werden diese zusätzlichen Beanspruchungen aus Zwang, Schwinden und Kriechen sowie die verschiedenen Maßnahmen zur Verminderung und Vermeidung nachteiliger Auswirkungen umfassend behandelt und die Ermittlung der notwendigen Mindestbewehrung zur Rissicherung erläutert.

Besondere Aufmerksamkeit verlangt die Frühphase der Erhärtung des Betons, da durch zu schnelles Austrocknen die Gefahr nachteiliger Auswirkungen besteht. Die Schutzmaßnahmen bilden demzufolge eine wesentliche Voraussetzung für das Erreichen der vorgesehenen Eigenschaften sowie rissfreier und dauerhafter Konstruktionen.

Die Darlegungen im Band 2 sind für die Tragwerksplanung, Bauvorbereitung und Bauausführung bestimmt. Neben einem ausreichenden Überblick zu den eigenschaftsbestimmenden Grundlagen des Betons sind die Maßnahmen aufgenommen worden, die diese verschiedenen Arbeitsbereiche anwenden müssen, um nachhaltig nutzbare und gebrauchstaugliche Betonkonstruktionen sicherstellen. Diese Zielsetzung ist und bleibt eine Gemeinschaftsaufgabe, die wechselseitige Kenntnis der Zusammenhänge verlangt.

Stefan Röhling

1	Hydratationsvorgänge und Strukturentwicklung im Beton	15
1.1	Stoffliche Charakteristika der Zemente	17
1.1.1	Chemische und mineralogische Zusammensetzung der Klinkerphasen	17
1.1.2	Chemismus der weiteren Zementbestandteile	19
1.1.3	Physikalische Eigenschaften der Zemente	20
1.2	Mechanismus und Ablauf der Hydratation	23
1.2.1	Hydratationsreaktionen und Morphologie der Hydrate	23
1.2.2	Grundsätzlicher Ablauf des Hydratationsprozesses	35
1.2.3	Einflussfaktoren auf den Hydratationsverlauf und die Hydratbildung	41
1.2.4	Prozesskenngroße Hydratationsgrad	52
1.3	Wasserbindung und Strukturentwicklungen im Zementstein	59
1.3.1	Stöchiometrisch bestimmte chemische Wasserbindungen und Hydratvolumen	60
1.3.2	Experimentelle Ermittlung der chemischen Wasserbindung	61
1.3.3	Physikalisch gebundenes Wasser und Gelvolumen	62
1.3.4	Wasserbindung und Volumen des vollständig hydratisierten Zementes	64
1.3.5	Kapillarwasser und -porosität	66
1.3.6	Volumenentwicklung und Porosität in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad	66
1.3.7	Charakteristik des Porensystems im Zementstein und Beton	70
1.3.8	Strukturanalyse des Zementsteines	74
1.3.9	Porenfeuchte in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen	78
1.4	Beziehungen zwischen Strukturkenngroßen und Eigenschaften	82
1.4.1	Übergangszone zwischen Zementstein und Gesteinskörnung	83
1.4.2	Festigkeit des Zementsteines und Betons	86
1.4.3	Durchlässigkeit des Zementsteines und Betons	91
1.4.4	Durchlässigkeit des Betons und Dauerhaftigkeit	97
1.5	Belastungsunabhängige Verformungen während der Erhärtung	99
1.5.1	Arten und Ursachen der belastungsunabhängigen Verformungen	99
1.5.2	Kapillares Schwinden (Frühschwinden) von Frischbeton	102
1.5.3	Mechanismus des Quellens und Schwindens	103
1.5.4	Auswirkungen des Schwindens in der Mikrostruktur des Betons	108
1.6	Verformungen und Spannungen unter Dauerlast	108
1.6.1	Ursachen des viskoelastischen Verhaltens des Zementsteines und Betons	109
1.6.2	Charakterisierung des Kriechverhaltens durch die Kriechzahl	110
1.6.3	Umfang und Verlauf des Kriechens	111
1.7	Rissbildungen im Zementstein- und Betongefüge	113
1.7.1	Rissbildungsprozess	113
1.7.2	Einflüsse auf die Rissbildung	116
1.7.3	Auswirkungen der Mikrorissbildung	118
1.7.4	Selbstheilung von Rissen	119
1.8	Wärmeentwicklung während der Hydratation	123
1.8.1	Hydratationsverhalten des Zementes und Wärmeentwicklung	124
1.8.2	Ermittlung der Hydratationswärme aus der Zusammensetzung des Zementes	130

1.8.3	Experimentelle Bestimmung der Hydratationswärme	132
1.8.3.1	Lösungskalorimeter	133
1.8.3.2	Adiabatische Kalorimeter	133
1.8.3.3	Teiladiabatische Kalorimeter	135
1.8.3.4	Wärmeflusskalorimeter	135
1.8.3.5	Transformation von adiabatisch ermittelten Temperaturverläufen auf isothermische Verhältnisse	137
1.8.4	Beziehungen zwischen Hydratationswärme und Festigkeit	139
1.9	Mathematische Beschreibung des Hydratationsverlaufes als Grundlage der Wärme- und Festigkeitsentwicklung	139
1.9.1	Beschreibung der zeitlichen Entwicklung unter konstanten Erhärtingsbedingungen	140
1.9.2	Reaktionskinetische Formulierung	142
1.9.3	Wirkung der Temperatur auf den Hydratationsvorgang	146
1.9.4	Wirkung der Feuchte im Zementstein auf die Hydratation	151
1.10	Literatur	153

2

Erhärtung und Entwicklung der Eigenschaften des Betons 161

2.1	Grüner und junger Beton	163
2.1.1	Besonderheiten in der Anfangsphase der Erhärtung	164
2.1.2	Sedimentation des Frischbetons	165
2.1.3	Frühschwinden	168
2.1.4	Erstarren des Frischbetons	175
2.1.5	Grünstandfestigkeit (grüner Beton)	181
2.1.6	Besonderheiten des jungen Betons	182
2.2	Spannungsunabhängige Verformungen des erhärteten Betons	183
2.2.1	Chemisches und autogenes Schwinden	183
2.2.1.1	Ursachen des Schwindens	183
2.2.1.2	Auswirkungen des Schwindens	185
2.2.1.3	Einflussfaktoren auf das autogene Schwinden	186
2.2.1.5	Vorhersage der Größe und des Verlaufes des autogenen Schwindens	188
2.2.2	Trocknungsschwinden	191
2.2.2.1	Ursachen	192
2.2.2.2	Auswirkungen	194
2.2.2.3	Vorhersage der Größe und des Verlaufes des Schwindens bei Austrocknung	195
2.2.3	Schwinden des Zementsteines im Gefüge	199
2.2.4	Überlagerung von autogenem und Trocknungsschwinden	201
2.2.5	Verminderung des Schwindens des Betons (Schwindarmer Beton)	205
2.2.5.1	Betontechnologische Optimierung der Zusammensetzung	205
2.2.5.2	Schwindreduzierte Bindemittel	206
2.2.5.3	Schwindreduzierende Zusätze	208

2.2.5.4	Innere Nachbehandlung	209
2.2.5.5	Wertung der Kombination schwindreduzierender Maßnahmen	211
2.2.5.6	Schwindungskompensierte Betone	212
2.2.5.7	Konstruktive Maßnahmen zur Verringerung schwindbedingter Rissbildung	214
2.2.6	Prüfmethode zur Erfassung des Dehnungs- und Rissverhaltens	214
2.2.6.1	Erfassung der chemischen und autogenen Deformationen im jungen Beton	214
2.2.6.2	Ermittlung des Trocknungsschwindens	216
2.2.6.3	Verfolgen der Rissentwicklung infolge frühen Schwindens	216
2.2.7	Karbonatisierungsschwinden	217
2.2.8	Thermisch bedingte Dehnungen	218
2.3	Nachbehandlung und Schutz des erhärtenden Betons	221
2.3.1	Nachbehandlung als Regel der Technik	223
2.3.2	Frühzeitiges Austrocknen	223
2.3.2.1	Verdunsten des Anmachwassers	224
2.3.2.2	Einflüsse auf die Verdunstung und den Wasserhaushalt im Beton	226
2.3.2.3	Auswirkungen der Verdunstung auf die Bauteilfeuchte	228
2.3.2.4	Schutzmaßnahmen gegen vorzeitiges Austrocknen	232
2.3.2.5	Beginn und Dauer der Nachbehandlung	235
2.3.2.6	Überprüfung der Wirksamkeit der Nachbehandlungsmaßnahmen	239
2.3.2.7	Kontrolle der Durchführung der Nachbehandlung	241
2.3.3	Schutz gegen zu schnelle Abkühlung und zu niedrige Temperaturen	243
2.3.4	Schutz des erhärtenden Betons vor Schwingungen und Erschütterung	244
2.3.5	Chemischer Angriff auf jungen Beton	246
2.4	Festigkeit und Festigkeitsentwicklung des Betons	246
2.4.1	Bedeutung der Kenntnis der Festigkeitsentwicklung des Betons	248
2.4.2	Einflüsse auf die Druck- und Zugfestigkeit	249
2.4.3	Druckfestigkeit des Betons und dessen zeitliche Entwicklung	250
2.4.3.1	Kurzzeitdruckfestigkeit des Betons	250
2.4.3.2	Einflussfaktoren auf die Festigkeitsentwicklung	251
2.4.3.3	Richtwerte zur Abschätzung der Festigkeitsentwicklung	255
2.4.3.4	Mathematische Beschreibung der Festigkeitsentwicklung	256
2.4.4	Zugfestigkeit und deren Entwicklung	259
2.4.4.1	Kurzzeitzugfestigkeit des Betons	259
2.4.4.2	Beziehungen zwischen Zug- und Druckfestigkeit des Betons	261
2.4.4.3	Zeitliche Entwicklung der Zugfestigkeit	262
2.4.4.4	Zugfestigkeit im Bauteil und bei Dauerbeanspruchung	264
2.4.5	Auswirkungen der Erhärtungstemperatur auf das Festigkeitsverhalten	265
2.4.6	Festigkeitskenngrößen in Abhängigkeit vom Hydratationsgrad	268
2.5	Formänderungen des Betons unter Einwirkung von Spannungen	271
2.5.1	Spannungs-Dehnungs-Beziehung und Elastizitätsmodul	272
2.5.1.1	Definition und Bestimmung des Elastizitätsmoduls	272
2.5.1.2	Einflussfaktoren auf den Elastizitätsmodul	276
2.5.1.3	Rechenwerte für den Elastizitätsmodul	277

2.5.1.4	Zeitliche Entwicklung des Elastizitätsmoduls	279
2.5.2	Querdehnung	281
2.5.3	Zugbruchdehnung des Betons	281
2.5.4	Kriechen und Relaxation	285
2.5.4.1	Definition des Kriechens und der Relaxation	285
2.5.4.2	Auswirkungen von Kriechen und Relaxation	286
2.5.4.3	Einwirkungen auf den Verlauf und die Größe der viskoelastischen Verformungen	287
2.5.4.4	Anteile und Verlauf des Kriechens	289
2.5.4.5	Vorhersage der Kriechverformung erhärtenden Betons bei konstanter Belastung	289
2.5.4.6	Kriechen bei jungem Beton	292
2.5.4.7	Ermittlung des Spannungsabbaues durch Relaxation	294
2.5.4.8	Kriechen und Relaxation bei veränderlicher Spannung während der Erhärtung	297
2.6	Einschätzung des Zustandes der Festigkeitsbildung im erhärtenden Bauteil	299
2.6.1	Temperaturgesteuerte Erhärtung von Prüfkörpern	300
2.6.2	Physikalische Reifemesser	301
2.6.3	Abschätzung der Festigkeitsentwicklung über die Reife	302
2.6.3.1	Grundlage des Reife-Konzeptes	302
2.6.3.2	Temperatur-Zeit-Beziehungen	305
2.6.3.3	Kalibrierung des Zusammenhanges zwischen Temperatur, Zeit und Festigkeit	310
2.6.3.4	Reife-Computer	311
2.6.4	Einsatz von Prüfverfahren am Bauteil	312
2.7	Frühzeitige Belastungen des erhärtenden Betons und Ausschallfristen	313
2.7.1	Ausrüsten und Ausschalen	313
2.7.2	Zwangsspannungen und Rissbildung während der Erhärtung	317
2.8	Prüfung der Festigkeit des Betons an Bauteilen und am Bauwerk	318
2.8.1	Beurteilung der Bauteilfestigkeit durch Bohrkerne	319
2.8.2	Indirekte (zerstörungsfreie) Prüfverfahren	321
2.8.2.1	Rückprallprüfung	322
2.8.2.2	Kugelschlagprüfung	326
2.8.2.3	Ultraschallmesstechnik	327
2.8.2.4	Impact-Echo-Messtechnik	329
2.8.3	Zerstörungsarme Prüfverfahren	329
2.8.4	Zugfestigkeit von Betonoberflächen (Abreißversuch)	331
2.8.5	Detektion von Gefügestörungen und Hohlstellen	332
2.8.5.1	Einsatz des Georadars	332
2.8.5.2	Anwendung der aktiven Infrarot-Thermografie	332
2.9	Literatur	333

3	Zwangsspannungen und Rissbreitenbeschränkung	345
3.1	Temperaturverlauf und Temperaturverteilung in Betonbauteilen	346
3.1.1	Wärmeentwicklung der Zemente	346
3.1.2	Thermische Kenngrößen und äußere Randbedingungen	349
3.1.3	Adiabatische Temperaturentwicklung im Bauteil	351
3.1.4	Temperaturverlauf im gleichmäßig erwärmten Bauteil	352
3.1.5	Abschätzung der Temperaturdifferenzen zwischen Bauteilrand und -kern	355
3.1.6	Berechnung der Temperaturverteilung und des Temperaturverlaufes in Bauteilquerschnitten	357
3.1.7	Beispiele für den Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur und Temperaturdifferenzen	357
3.1.7.1	Verlauf der mittleren Bauteiltemperatur	357
3.1.7.2	Temperaturdifferenzen	360
3.1.8	Abschätzung von Temperaturverhältnissen in Bauteilen	362
3.1.9	Messung der Temperaturen und Spannungen im Bauteil	363
3.2	Ursachen und Maßnahmen zur Verminderung der Zwangsbeanspruchungen	365
3.2.1	Ursachen der lastunabhängigen Zwangsbeanspruchungen während der Erhärtung	366
3.2.2	Bauteilbezogene Zwangsspannungssituationen	371
3.2.2.1	Deckenkonstruktionen	372
3.2.2.2	Wandkonstruktionen	374
3.2.2.3	Wände und Decken mit Öffnungen	378
3.2.2.4	Verbindung von Bauteilen aus Alt- und Neubeton	379
3.2.2.5	Boden- und Sohlplatten	379
3.2.3	Überschlägige Beurteilung der Zwangsspannungssituation	382
3.2.3.1	Berechnung der Zwangsspannungen in Zeitschritten (Tabellenkalkulation)	382
3.2.3.2	Abschätzung der Zwangsspannungen mit sehr vereinfachenden Annahmen	385
3.2.4	Messung der Verformungen und der Zwangsspannungen während der Baudurchführung	386
3.2.5	Maßnahmen zur Verminderung der Zwangsspannungen	389
3.2.5.1	Steuerung der Temperaturverhältnisse im Bauteil	390
3.2.5.2	Optimierung der Betonzusammensetzung	393
3.2.5.3	Konstruktive Maßnahmen zur Reduzierung der Behinderung der erhärtenden Betonbauteile	397
3.2.6	Kriterien der Rissicherheit	399
3.2.6.1	Deterministische Nachweisführung	399
3.2.6.2	Probabilistisches Nachweiskonzept	401
3.3	Rissbreitenbegrenzung durch Bewehrung	403
3.3.1	Vorgänge bei der Rissbildung im Stahlbetonbauteil	404

3.3.2	Ermittlung der Mindestbewehrung und Nachweis der Rissbreitenbeschränkung	407
3.3.2.1	Bestandteile der Nachweisführung	407
3.3.2.2	Risszustand	412
3.3.2.3	Berechnung der Rissbreite	413
3.3.2.4	Begrenzung der Rissbreite ohne direkte Berechnung (vereinfachter Nachweis nach DIN 1045-1, 11.2.3)	416
3.3.2.5	Rissbreitenbegrenzende Bewehrung bei Eigenspannungen	419
3.3.2.6	Ermittlung der rissbreitenbegrenzenden Bewehrung (direkte Berechnung nach DIN 1045-1, Abschnitt 11.2.4)	420
3.3.2.7	Nachweis der Einhaltung der rechnerischen Rissweite w_k	423
3.3.2.8	Rissbreitenbegrenzung in Elementwänden und -decken	424
3.3.3	Ursachen unverträglicher Rissbreiten	424
3.3.4	Regelungen zur Rissbreite	425
3.3.4.1	Definition der rechnerischen Rissbreite	425
3.3.4.2	Messung von Rissbreiten	428
3.3.4.3	Auswertung der Rissbreiten am Bauwerk	429
3.4	Literatur	431
4	Zusammenstellung von Regelwerken	435
4.1	Normen für Beton, Stahlbeton und Spannbeton	435
4.2	Richtlinien, zusätzliche Vorschriften	435
4.3	Prüfnormen und Prüfvorschriften	436
4.3.1	Zement	436
4.3.2	Frischbeton	436
4.3.3	Festbeton, Faserbeton, Beton in Bauwerken	436
4.4	Sonstige Normen	437