

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	Prozesskenngröße 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 Strukturkenngrößen 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	Selbsteilung 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 Erhärtungsbedingungen	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	Prüfmethoden 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 Bohrkern	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