

Peter Grübl,
Helmut Weigler, Sieghart Karl

Beton

Arten, Herstellung und Eigenschaften

Inhaltsverzeichnis

Geleitwort	V
Vorwort zur 2. Auflage	VII
Vorwort zur 1. Auflage	VIII
Zu den neuen Betonnormen	IX
1 Beton – Definition und Einteilung	1
1.1 Betonarten	1
1.1.1 Betongefüge	2
1.1.2 Zuschlag	2
1.1.3 Bindemittel	3
1.1.4 Ort der Herstellung und Verwendung	3
1.1.5 Herstellverfahren	4
1.1.6 Bewehrung	6
1.1.7 Rohdichte und Druckfestigkeit	7
1.1.8 Betone mit besonderen Eigenschaften	7
1.1.9 Beton für bestimmte Anwendungsgebiete	9
1.2 Betonklassen	10
1.2.1 Festigkeitsklassen	10
1.2.2 Rohdichteklassen	11
1.3 Betongruppen und Betonkategorien	12
1.4 Betonsorten	13
1.5 Betonfamilie	14
2 Ausgangsstoffe	15
2.1 Zement	15
2.1.1 Begriffsbestimmung	15
2.1.1.1 Portlandzement	19
2.1.1.2 Hütten- und Hochofenzemente	20
2.1.1.3 Portlandkompositzemente	21
2.1.1.4 Puzzolanzemente	22
2.1.1.5 Kompositzemente	22
2.1.1.6 Tonerdezement	22
2.1.1.7 Zemente mit besonderen Eigenschaften	22
2.1.1.8 Spezialzemente	24
2.1.1.9 Bauaufsichtlich zugelassene Zemente	24
2.1.1.10 Sonstige als Zement bezeichnete Bindemittel	25
2.1.2 Zementherstellung	25

2.1.3	Reaktion des Zements mit dem Zugabewasser	27
2.1.3.1	Hydratphasen	27
2.1.3.2	Hydratationsprodukte	28
2.1.3.3	Hydratationsverlauf	30
2.1.3.4	Ansteifen und Erstarren	31
2.1.3.5	Aufbau des Zementsteins	32
2.1.4	Bautechnische Eigenschaften des Zementes	36
2.1.4.1	Erhärten und Festigkeit	36
2.1.4.2	Erstarren	42
2.1.4.3	Mahlfeinheit und Partikelgrößenverteilung	44
2.1.4.4	Dichte und Schüttdichte	46
2.1.4.5	Raumbeständigkeit	47
2.1.4.6	Chemische Widerstandsfähigkeit	47
2.1.4.7	Hydratationswärme	48
2.1.4.8	Formänderungen	50
2.1.4.9	Farbe	50
2.1.4.10	Wasserundurchlässigkeit	51
2.2	Zuschlag	52
2.2.1	Einteilung	52
2.2.2	Bezeichnung	53
2.2.3	Anforderungen	55
2.2.3.1	Allgemeine Randbedingungen	55
2.2.3.2	Kornzusammensetzung	56
2.2.3.3	Kornform und Kornoberfläche	64
2.2.3.4	Widerstand gegen rollende und schleifende Einwirkungen	65
2.2.3.5	Festigkeit	67
2.2.3.6	Frostwiderstand	67
2.2.3.7	Schädliche Bestandteile	73
2.2.3.8	Zusätzliche Anforderungen an die Raumbeständigkeit von Hochofenstückschlacke	77
2.2.3.9	Anforderungen an leichte Gesteinskörnung für Mörtel und Beton	77
2.2.3.10	Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnung	81
2.2.4	Gesteinskörnungen – Herstellung und Eigenschaften	82
2.2.4.1	Übersicht	82
2.2.4.2	Normale Gesteinskörnung	83
2.2.4.3	Schwere Gesteinskörnung	88
2.2.4.4	Leichte Gesteinskörnung	88
2.2.4.5	Rezyklierte Gesteinskörnung	95
2.3	Betonzusatzmittel	96
2.3.1	Begriffsbestimmung	96
2.3.2	Wirkungsgruppen	96
2.3.2.1	Übersicht	96
2.3.2.2	Betonverflüssiger (BV) und Fließmittel (FM)	96
2.3.2.3	Luftporenbildner (LP)	102
2.3.2.4	Dichtungsmittel (DM)	103
2.3.2.5	Verzögerer (VZ)	104
2.3.2.6	Beschleuniger (BE)	108
2.3.2.7	Einpreßhilfen (EH) für Einpreßmörtel bei Spannbeton	108
2.3.2.8	Stabilisierer (ST)	109

2.3.2.9	Chromatreduzierer	109
2.3.2.10	Recyclinghilfe	110
2.3.2.11	Schaumbildner (SB)	110
2.3.3	Anwendungsbereich	112
2.3.4	Anforderungen	112
2.3.4.1	Übersicht	112
2.3.4.2	Gleichmäßigkeit und Haltbarkeit	113
2.3.4.3	Verträglichkeit und Unschädlichkeit	113
2.3.4.4	Wirksamkeit	115
2.3.5	Betonzusatzmittel für Sonderzwecke	117
2.3.5.1	Übersicht	117
2.3.5.2	Gasbildner	117
2.3.5.3	Entschäumer	118
2.3.5.4	Fettalkohole	118
2.3.5.5	Pilz-, keim- und insektentötende Zusatzmittel	118
2.3.5.6	Zusatzmittel zum Korrosionsschutz der Bewehrung	118
2.4	Betonzusatzstoffe	119
2.4.1	Begriffsbestimmung	119
2.4.2	Einteilung	119
2.4.3	Feinkörnige mineralische Zusatzstoffe	120
2.4.3.1	Inerte Stoffe	120
2.4.3.2	Puzzolanische Stoffe	120
2.4.3.3	Latent hydraulische Stoffe	128
2.4.4	Farbstoffe	129
2.5	Zugabewasser	130
2.5.1	Begriffsbestimmung	130
2.5.2	Anforderungen	130
2.5.3	Beurteilung	131
2.5.4	Betontechnologische Vergleichsprüfungen	131
3	Betonzusammensetzung	135
3.1	Kornzusammensetzung des Zuschlags	135
3.1.1	Allgemeines	135
3.1.2	Sieblinien	136
3.1.3	Stetige und unstetige Kornzusammensetzungen	136
3.1.3.1	Gegenüberstellung	136
3.1.3.2	Stetige Sieblinien	137
3.1.3.3	Sieblinien für Ausfallkörnungen	141
3.1.4	Kennwerte für die Kornverteilung und für den Wasseranspruch	142
3.1.5	Zusammenstellung des Zuschlags	146
3.2	Betonaufbau	148
3.2.1	Wasseranspruch	148
3.2.1.1	Kornzusammensetzung	148
3.2.1.2	Kornform und Oberflächenbeschaffenheit des Zuschlags	149
3.2.1.3	Zementgehalt und Zementart	150
3.2.1.4	Betonzusätze	152
3.2.2	Wasserzementwert und Zementgehalt	153
3.2.2.1	Allgemeines	153

3.2.2.2	Beton mit bestimmter Festigkeit	154
3.2.2.3	Bewehrter Beton	157
3.2.2.4	Umgebungsbedingungen	159
3.2.2.5	Grenzwerte für die Betonzusammensetzung und Eigenschaften	159
3.2.2.6	Betone für bestimmte Anwendungsfälle	164
3.2.3	Mehlkorn	166
3.2.4	Verwendung von Zusatzstoffen	168
3.2.4.1	Einführung	168
3.2.4.2	k-Wert-Ansatz	168
3.2.4.3	Anrechenbarkeit von Flugasche	168
3.2.4.4	Anrechenbarkeit von Silikastaub	169
3.2.4.5	Anrechenbarkeit bei gleichzeitiger Verwendung von Flugasche und Silikastaub	170
3.2.4.6	Alkalitätsreserve der Porenlösung	170
3.2.4.7	Anrechenbarkeit von Flugasche bei Unterwasserbeton	171
3.3	Mischungsentwurf	171
3.3.1	Berechnung	171
3.3.2	Erstprüfung	174
3.3.3	Beispiele	175
3.3.3.1	Beton C 20/25, Konsistenzklasse C3	175
3.3.3.2	Beton für Frostangriff mit Taumittel bei hoher Wassersättigung (Expositionsklasse XF4)	177
3.3.3.3	Hochfester Beton C 80/95	179
4	Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung	181
4.1	Herstellung	181
4.1.1	Abmessen der Ausgangsstoffe	181
4.1.2	Frischbetontemperatur	183
4.1.3	Mischen	185
4.1.3.1	Allgemeines	185
4.1.3.2	Mischdauer	185
4.1.3.3	Intensivmischen	186
4.1.3.4	Zementleimvormischung	187
4.1.3.5	Transportbeton	188
4.1.3.6	Mischen mit Dampfzuführung	188
4.1.3.7	Trockenbeton	190
4.2	Verarbeitung	191
4.2.1	Befördern des Betons	191
4.2.2	Fördern auf der Baustelle	192
4.2.2.1	Allgemeines	192
4.2.2.2	Pumpbeton	192
4.2.3	Vorbehandlung der Schalung	197
4.2.3.1	Allgemeines	197
4.2.3.2	Trennmittel	197
4.2.3.3	Schalungseinlagen	201
4.2.4	Einbringen	203
4.2.4.1	Allgemeines	203
4.2.4.2	Fließbeton	203

4.2.4.3	Schüttbeton	203
4.2.5	Verdichten	204
4.2.5.1	Allgemeines	204
4.2.5.2	Verdichtungsarten	204
4.2.5.3	Rüttelverdichtung	207
4.2.5.4	Nachverdichten	214
4.2.5.5	Vakuumbehandlung	215
4.2.6	Arbeitsfugen	218
4.2.6.1	Allgemeines	218
4.2.6.2	Anordnung	219
4.2.6.3	Ausführung	219
4.2.6.4	Scheinfugen	221
4.3	Nachbehandlung und Schutz des Betons	222
4.3.1	Allgemeines	222
4.3.2	Schutz gegen vorzeitiges Austrocknen	223
4.3.2.1	Bedeutung	223
4.3.2.2	Auswirkung	225
4.3.2.3	Maßnahmen	227
4.3.2.4	Verfahren	228
4.3.2.5	Dauer	229
4.3.3	Schutz gegen niedrige Temperaturen	230
4.3.3.1	Allgemeines	230
4.3.3.2	Frischbetontemperatur	230
4.3.3.3	Gefrierbeständigkeit	231
4.3.3.4	Frostschutzmittel	232
4.3.3.5	Schutz gegen schnelle Abkühlung	232
4.3.4	Schwingungen und Erschütterungen	232
4.3.4.1	Beton	232
4.3.4.2	Verbund der Bewehrung	233
4.4	Wärmebehandlung	234
4.4.1	Allgemeines	234
4.4.2	Einfluß der Temperatur, Reife	235
4.4.3	Arten der Wärmebehandlung	239
4.4.4	Zeitlicher Ablauf	240
4.4.4.1	Vorlagern	240
4.4.4.2	Erwärmen	241
4.4.4.3	Höchsttemperatur und Verweildauer	241
4.4.4.4	Nachbehandeln	243
4.4.4.5	Vorspannen	244
4.4.5	Verfahren	244
4.4.5.1	Dampfbehandlung	244
4.4.5.2	Warmluftbehandlung	245
4.4.5.3	Beheizen der Schalung	245
4.4.5.4	Infrarotbestrahlung	245
4.4.5.5	Elektrische Erwärmung	246
4.4.5.6	Mikrowellenbestrahlung	246
4.4.6	Betonzusammensetzung	246
4.4.6.1	Wasserzementwert und Konsistenz	246
4.4.6.2	Zement	247

4.4.6.3	Zuschlag und Zusätze	247
4.4.7	Betoneigenschaften	247
4.4.7.1	Druckfestigkeit	247
4.4.7.2	Zugfestigkeit	248
4.4.7.3	Wassereindringwiderstand	248
4.4.7.4	Verschleißwiderstand	248
4.4.7.5	Frostwiderstand, Frost- und Taumittelwiderstand und Widerstand gegen chemischen Angriff	248
4.4.7.6	Formänderungen	248
4.4.7.7	Verbund Beton – Bewehrung	249
4.5	Dampfhärtung	249
5	Frischbeton	251
5.1	Verarbeitbarkeit und Konsistenz	251
5.1.1	Begriffsbestimmung	251
5.1.2	Anforderungen und Einflüsse	251
5.1.2.1	Allgemeines	251
5.1.2.2	Wassergehalt und Wasserzementwert	252
5.1.2.3	Feinstoffe	252
5.1.2.4	Zuschlag	253
5.1.2.5	Betonzusätze	253
5.1.3	Konsistenzmaße	254
5.1.3.1	Verdichtungsmaß	255
5.1.3.2	Ausbreitmaß	256
5.1.3.3	Setzmaß	256
5.1.3.4	Setzzeit	256
5.1.3.5	Auslaufzeit nach Werse	256
5.1.3.6	Ausbreitfließmaß, Setzfließmaß	257
5.1.4	Konsistenzbereiche	258
5.1.5	Fließbeton	261
5.1.5.1	Konsistenz	261
5.1.5.2	Ausgangsbeton	261
5.1.5.3	Dosierung des Fließmittels	262
5.1.5.4	Einbringen und Verdichten	263
5.1.5.5	Anwendung	263
5.1.6	Konsistenzentwicklung	264
5.2	Rohdichte	264
5.3	Luftgehalt	266
5.3.1	Allgemeines	266
5.3.2	Prüfverfahren	267
5.3.2.1	Druckausgleichsverfahren	269
5.3.2.2	Modifiziertes Druckausgleichsverfahren	270
5.3.2.3	Volumetrisches Verfahren	270
5.3.2.4	Rechnerische Ermittlung	271
5.3.2.5	Luftporenkennwerte am Frischbeton	271
5.4	Grünstandfestigkeit	272
5.5	Schalungsdruck	274

5.6	Wasserabsondern	275
5.7	Frischbetonanalyse	276
5.7.1	Allgemeines	276
5.7.2	Wassergehalt	277
5.7.2.1	Darrversuch	277
5.7.2.2	KELLY-VAIL-Verfahren	277
5.7.2.3	Vakuumdestillation	278
5.7.3	Zementgehalt	278
5.7.3.1	Stoffraumrechnung	278
5.7.3.2	Auswaschversuch	279
5.7.3.3	RAM-Methode	279
5.7.3.4	Flotationsverfahren	280
5.7.4	Wasserzementwert	280
6	Junger Beton	283
6.1	Allgemeines	283
6.2	Verformungen	283
6.2.1	Chemisches Schrumpfen	283
6.2.2	Plastisches Schwinden	284
6.2.3	Autogenes Schwinden	286
6.2.4	Wärmedehnzahl	286
6.3	Temperaturentwicklung infolge Hydratation	287
6.3.1	Adiabatischer Temperaturverlauf	288
6.3.2	Temperaturverlauf im Bauwerk	290
6.4	Festigkeit	294
6.5	Verformungseigenschaften	295
6.5.1	Dehnfähigkeit	295
6.5.2	Arbeitslinie und Elastizitätsmodul	296
6.5.3	Relaxation	296
6.6	Reißneigung	298
6.6.1	Formänderungen der Schalung	299
6.6.2	Temperatureinflüsse	299
6.6.3	Austrocknung	301
7	Festbeton	303
7.1	Eigenschaften und deren Beeinflussung	303
7.2	Rohdichte	303
7.3	Porenraum	304
7.3.1	Allgemeines	304
7.3.2	Ermittlung	304
7.4	Druckfestigkeit des Normal- und Schwerbetons	308
7.4.1	Allgemein	308
7.4.2	Beeinflussung der Druckfestigkeit	309
7.4.2.1	Betonzusammensetzung	309
7.4.2.2	Erhärtingsbedingungen	310

7.4.3	Bestimmung der Kurzzeitfestigkeit	310
7.4.3.1	Prüfkörper	310
7.4.3.2	Prüfeinflüsse	311
7.4.3.3	Feuchte und Temperatur	315
7.4.3.4	Vorbelastung	316
7.4.4	Streuung der Kurzzeitfestigkeit	316
7.4.5	Betonfestigkeitsklassen	318
7.4.5.1	Definition und Anforderungen	318
7.4.5.2	Übereinstimmungsnachweis	319
7.4.5.3	Annahmebedingungen	323
7.4.5.4	Zielfestigkeit für den Mischungsentwurf	325
7.4.6	Festigkeitsentwicklung	325
7.4.6.1	Allgemeines	325
7.4.6.2	Einflußgrößen	326
7.4.6.3	Nacherhärtung	329
7.4.7	Frühfestigkeit	329
7.4.8	Dauerstandfestigkeit	331
7.4.9	Dauerschwing(Druckschwell)festigkeit	332
7.4.9.1	Allgemeines	332
7.4.9.2	Wöhlerlinie	333
7.4.9.3	Druckschwellfestigkeit	334
7.4.9.4	Betriebsfestigkeit	336
7.4.10	Mehrachsiges Festigkeit	338
7.4.10.1	Kurzzeitfestigkeit	338
7.4.10.2	Dauerstand- und Druckschwellfestigkeit	340
7.4.11	Teilflächenbelastung	340
7.4.12	Bauwerksfestigkeit	342
7.4.12.1	Allgemeines	342
7.4.12.2	Größe der Bauwerksfestigkeit	342
7.4.12.3	Beurteilung der Prüfergebnisse	342
7.4.12.4	Anwendungen	343
7.4.12.5	Prüfverfahren	344
7.4.13	Beschleunigte Festigkeitsprüfung	350
7.4.14	Hochleistungsbeton	352
7.4.14.1	Ausgangsstoffe	353
7.4.14.2	Betonzusammensetzung	354
7.4.14.3	Herstellen, Verarbeiten Nachbehandeln	356
7.4.14.4	Festbetoneigenschaften	356
7.4.14.5	Verhalten bei Brand	358
7.5	Zugfestigkeit	359
7.5.1	Allgemeines	359
7.5.2	Beeinflussung der Zugfestigkeit	361
7.5.3	Biegezugfestigkeit	361
7.5.3.1	Bestimmung	361
7.5.3.2	Einflüsse	363
7.5.4	Spaltzugfestigkeit	365
7.5.5	Zentrische Zugfestigkeit	366
7.5.6	Festigkeitsverhältnismwerte	367
7.5.7	Mehrachsiges Zugfestigkeit	371

7.6	Schub-, Scher- und Torsionsfestigkeit	372
7.7	Schlagfestigkeit	372
7.7.1	Betonzusammensetzung und Ausgangsstoffe	372
7.7.2	Stahlfaserzusatz	374
7.7.3	Erhärtingsbedingungen	374
7.8	Verbund Beton – Bewehrung	374
7.8.1	Allgemeines	374
7.8.2	Verbundfestigkeit	375
7.8.3	Auswirkungen	376
7.9	Formänderungen	376
7.9.1	Lastabhängige Formänderungen	376
7.9.2	Elastische Formänderungen	377
7.9.2.1	Arbeitslinie	377
7.9.2.2	Arbeitsvermögen	388
7.9.2.3	Elastizitätsmodul	390
7.9.2.4	Querdehnung und Schubmodul	395
7.9.3	Kriechen und Relaxation	397
7.9.3.1	Allgemeines	398
7.9.3.2	Kriechmaß und Kriechzahl	399
7.9.3.3	Fließen	400
7.9.3.4	Fließzahl	402
7.9.3.5	Verzögert elastische Verformung	405
7.9.3.6	Endkriechzahl	406
7.9.3.7	Einfluß des Belastungsalters	406
7.9.3.8	Einfluß der Temperatur	408
7.9.3.9	Zug-, Torsions- und Schwellbelastung	414
7.9.3.10	Spannungsrelaxation	416
7.9.4	Schwinden	417
7.9.4.1	Allgemeines	417
7.9.4.2	Schwind- und Quellmaß	419
7.9.4.3	Beeinflussung des Schwindmaßes	420
7.9.5	Temperaturverformungen	423
7.9.5.1	Allgemeines	423
7.9.5.2	Wärmedehnzahl	423
7.9.5.3	Gefügespannungen	427
7.10	Dauerhaftigkeit	429
7.10.1	Allgemeine Anforderungen	429
7.10.2	Umgebungsbedingte Einwirkungen	430
7.10.2.1	Definition	430
7.10.2.2	Kein Korrosions- und Angriffsrisiko	431
7.10.2.3	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Karbonatisierung	432
7.10.2.4	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride, ausgenommen Meerwasser	432
7.10.2.5	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chloride aus Meerwasser	432
7.10.2.6	Betonkorrosion durch Frost mit und ohne Taumittel	433
7.10.2.7	Betonkorrosion durch chemischen Angriff	433
7.10.2.8	Betonkorrosion durch Verschleißbeanspruchung	433

7.10.3	Anforderungen an die Betonzusammensetzung	434
7.11	Korrosionsschutz der Bewehrung	435
7.11.1	Voraussetzungen	435
7.11.2	Einleitung der Korrosion	436
7.11.2.1	Karbonatisierung	436
7.11.2.2	Chlorideindringung	442
7.11.3	Ausbreitung der Korrosion	449
7.11.3.1	Allgemeines	449
7.11.3.2	Karbonatisierungskorrosion	450
7.11.3.3	Chloridkorrosion	451
7.11.4	Anforderungen an den Beton	452
7.11.4.1	Allgemeines	452
7.11.4.2	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Karbonatisierung	453
7.11.4.3	Bewehrungskorrosion, verursacht durch Chlorideinwirkung	453
7.11.5	Schutzmaßnahmen	458
7.12	Frostwiderstand und Frost-Taumittelwiderstand	459
7.12.1	Allgemeines	459
7.12.2	Schadensbild	460
7.12.3	Schädigungsmechanismus	460
7.12.4	Chemische Wirkung von Taumitteln	464
7.12.5	Luftporensystem	465
7.12.5.1	Wirkungsweise	465
7.12.5.2	Anforderungen und Kennwerte	465
7.12.5.3	Luftgehalt im Frischbeton	466
7.12.5.4	Erzeugung der Luftporen	467
7.12.6	Prüfung der Widerstandsfähigkeit am Beton	467
7.12.7	Betonzusammensetzung und Eigenschaften	468
7.12.7.1	Allgemeine Anforderungen	468
7.12.7.2	Zuschlag	470
7.12.7.3	Zement	471
7.12.7.4	Zusatzstoffe	472
7.12.7.5	Beton mit sehr steifer Konsistenz	472
7.12.8	Zusätzliche Schutzmaßnahmen	473
7.13	Verschleißwiderstand	474
7.13.1	Allgemeines	474
7.13.2	Angriffsarten	475
7.13.2.1	Schleifende Beanspruchung	475
7.13.2.2	Rollende Beanspruchung	475
7.13.2.3	Prallbeanspruchung durch Schüttgüter und Flüssigkeiten	476
7.13.3	Beeinflussung	476
7.13.3.1	Druckfestigkeit	476
7.13.3.2	Betonzusammensetzung	476
7.13.3.3	Anforderungen an Zusammensetzung und Eigenschaften	478
7.13.3.4	Verarbeitung	479
7.13.3.5	Nachbehandlung	479
7.14	Widerstand bei chemischem Angriff	480
7.14.1	Allgemeines	480
7.14.2	Angreifende Stoffe und ihre Wirkung	480

7.14.2.1	Lösender Angriff	488
7.14.2.2	Treibender Angriff	491
7.14.3	Vorkommen der angreifenden Stoffe	492
7.14.3.1	Wasser	493
7.14.3.2	Böden	494
7.14.3.3	Gase	494
7.14.4	Beurteilung des Angriffsvermögens	494
7.14.4.1	Wasser	495
7.14.4.2	Böden	496
7.14.4.3	Gase	496
7.14.4.4	Angriffsgrade	496
7.14.5	Beton mit hohem Widerstand gegen chemischen Angriff	498
7.14.5.1	Allgemeines	498
7.14.5.2	Betonzusammensetzung und Eigenschaften	499
7.14.6	Schutzmaßnahmen und bauliche Ausbildung	501
7.15	Dichtigkeit gegenüber Flüssigkeiten und Gasen	502
7.15.1	Allgemeines	502
7.15.2	Dichtigkeit gegenüber Wasser	502
7.15.2.1	Einflüsse und Beurteilung	503
7.15.2.2	Prüfung	504
7.15.2.3	Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	504
7.15.3	Dichtigkeit gegen andere Flüssigkeiten	506
7.15.4	Dichtigkeit beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen	506
7.15.4.1	Einführung	506
7.15.4.2	Flüssigkeitsdichter Beton	507
7.15.4.3	Zusätzliche Anforderungen	509
7.15.5	Dichtigkeit gegenüber Gasen	509
7.15.5.1	Einflüsse und Beurteilung	509
7.15.5.2	Gasundurchlässiger Beton	512
7.16	Verhalten bei tiefen und hohen Temperaturen	513
7.16.1	Tiefe Temperaturen	513
7.16.2	Hohe Temperaturen	514
7.16.2.1	Allgemeines	514
7.16.2.2	Beton für Gebrauchstemperaturen bis 250 °C	515
7.17	Widerstand gegen Alkalireaktion	525
7.17.1	Ursache und Wirkung	525
7.17.2	Vorbeugende Maßnahmen	526
7.17.2.1	Einführung	526
7.17.2.2	Umgebungsbedingungen	527
7.17.2.3	Zuschlag	527
7.17.2.4	Zement	529
7.17.2.5	Betonzusätze	529
7.17.2.6	Wasser	530
7.17.2.7	Beton	530
7.18	Wärmeleitfähigkeit	531
7.19	Brandverhalten und Feuerwiderstand	532
7.20	Widerstand gegen radioaktive Strahlung	533

7.21	Beständigkeit anderer Stoffe in Beton	534
7.21.1	Aluminium	534
7.21.2	Blei	535
7.21.3	Kupfer	535
7.21.4	Magnesium	535
7.21.5	Zink	535
7.21.6	Andere Metalle	536
7.21.7	Glas	536
7.21.8	Holz	536
7.21.9	Kunststoffe	536
7.22	Oberflächenschutz	537
7.23	Vorhersage von Kriechen und Schwinden von Beton nach dem Produktansatz	539
7.23.1	Einführung	539
7.23.2	Kriechen	539
7.23.2.1	Kriechzahl	539
7.23.2.2	Grundwert der Kriechzahl	540
7.23.2.3	Zeitlicher Verlauf des Kriechens	541
7.23.2.4	Vorhersage des Kriechens nach DIN 1045-1	543
7.23.3	Schwinden	545
7.23.3.1	Arten des Schwindens	545
7.23.3.2	Grundwerte der Schwindverformung und zeitlicher Verlauf	547
7.23.3.4	Vorhersage des Schwindens nach DIN 1045-1	549
8	Leichtbeton	551
8.1	Übersicht	551
8.2	Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge	551
8.2.1	Allgemeines	551
8.2.2	Trag- und Bruchverhalten	552
8.2.3	Festigkeits- und Rohdichteklassen	555
8.2.4	Betonzusammensetzung	557
8.2.4.1	Mischungsentwurf	557
8.2.4.2	Konsistenz	558
8.2.4.3	Kornzusammensetzung des Zuschlags	558
8.2.4.4	Wasseranspruch	558
8.2.4.5	Zementgehalt	558
8.2.5	Herstellung, Verarbeitung und Nachbehandlung	559
8.2.5.1	Herstellung	559
8.2.5.2	Verarbeitung	560
8.2.5.3	Nachbehandlung	562
8.2.6	Festbetoneigenschaften	562
8.2.6.1	Druckfestigkeit und Rohdichte	562
8.2.6.2	Festigkeitsentwicklung	563
8.2.6.3	Dauerstand- und Druckschwellfestigkeit	564
8.2.6.4	Teilflächenbelastung	564
8.2.6.5	Zugfestigkeit	564
8.2.6.6	Formänderungen	566

8.2.6.7	Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärme und Wärmekapazität	568
8.2.6.8	Dichtigkeit gegen Wasser und Wasserdampf	570
8.2.6.9	Dauerhaftigkeit	571
8.2.6.10	Brandverhalten und Feuerwiderstand	571
8.3	Leichtbeton mit haufwerksporigem Gefüge	572
8.3.1	Allgemeines	572
8.3.2	Betonzusammensetzung	573
8.3.2.1	Mischungsentwurf	573
8.3.2.2	Zuschlag	573
8.3.2.3	Wasseranspruch	573
8.3.2.4	Zementgehalt	573
8.3.2.5	Zusatzmittel	574
8.3.3	Druckfestigkeit und Rohdichte	574
8.3.4	Querdehnzahl	575
8.3.5	Spannungs-Dehnungs-Linie	575
8.3.6	Biegezugfestigkeit	576
8.3.7	Elastizitätsmodul	576
8.3.8	Schwinden	577
8.3.9	Kriechen	577
8.3.10	Verbund zwischen Bewehrung und Beton	578
8.3.11	Dichtigkeit und Korrosionsschutz der Bewehrung	578
8.3.12	Wärmeleitfähigkeit	578
8.3.13	Wasserdampfdurchlässigkeit	579
8.3.14	Frostwiderstand	580
8.4	Schaumstoffbeton	580
8.5	Schaumbeton	581
8.5.1	Einführung	581
8.5.2	Erzeugung der Luftporen	581
8.5.3	Zusammensetzung und Herstellung des Schaumbetons	582
8.5.4	Eigenschaften	583
8.5.4.1	Rohdichte und Druckfestigkeit	583
8.5.4.2	Schwindverhalten	584
8.5.5	Anwendungsgebiete	585
8.6	Dampfgehärteter Porenbeton	585
8.6.1	Einführung	585
8.6.2	Ausgangsstoffe und Herstellung	586
8.6.3	Eigenschaften	587
8.6.3.1	Allgemeines	587
8.6.3.2	Druckfestigkeit und Festigkeitsklassen	588
8.6.3.3	Trockenrohichte und Rohdichteklassen	589
8.6.3.4	Zugfestigkeit	589
8.6.3.5	Elastizitätsmodul und Spannungs-Dehnungs-Linie	590
8.6.3.6	Schwinden	591
8.6.3.7	Kriechen	592
8.6.3.8	Wärmedehnzahl	593
8.6.3.9	Querdehnzahl	593
8.6.3.10	Dampfdiffusionswiderstand	593
8.6.3.11	Wärmeleitfähigkeit	593

8.6.3.12	Dauerhaftigkeit	593
8.6.3.13	Verbund zwischen Bewehrung und Porenbeton	594
9	Spritzbeton	595
9.1	Allgemeines	595
9.2	Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzung	596
9.2.1	Ausgangsstoffe	596
9.2.1.1	Zement	596
9.2.1.2	Zuschlag	597
9.2.1.3	Zusatzmittel	597
9.2.1.4	Zusatzstoffe	601
9.2.2	Betonzusammensetzung	602
9.3	Herstellung und Verarbeitung	603
9.3.1	Spritzarme und Spritzroboter	603
9.3.2	Trockenspritzverfahren	603
9.3.3	Naßspritzverfahren	603
9.3.4	Vergleich der Verfahren	604
9.3.4.1	Handhabung	604
9.3.4.2	Wirbelkammerverfahren	604
9.3.4.3	SEC-Shortcrete (Sand Enveloped with Cement) bzw. Zweiwegeverfahren	605
9.3.4.4	Rollschalung	605
9.3.4.5	Beschaffenheit des Spritzbetons	605
9.3.4.6	Kosten	605
9.3.5	Nachbehandlung	605
9.4	Festbetoneigenschaften	606
9.4.1	Allgemeines	606
9.4.2	Druckfestigkeit	606
9.4.2.1	Festigkeitsentwicklung	607
9.4.2.2	28-Tage-Druckfestigkeit	607
9.4.2.3	Endfestigkeit	608
9.4.3	Verformungsverhalten	608
9.4.3.1	Elastizitätsmodul	608
9.4.3.2	Schwinden und Kriechen	609
9.4.4	Auslaugbarkeit	610
9.4.5	Porenvolumen	610
9.4.6	Frischbetonrohddichte	610
9.4.7	Einfluß der Spritzrichtung auf Druckfestigkeit und E-Modul	611
9.5	Spritzbetonauftrag in mehreren Schichten	611
9.6	Faserspritzbeton	611
9.6.1	Allgemeines	611
9.6.2	Anwendung	611
9.6.3	Faserwerkstoffe	612
9.6.4	Herstellung und Verarbeitung	612
9.6.4.1	Faserzugabe	612
9.6.4.2	Fasergehalt	612
9.6.4.3	Auftrag	612
9.6.5	Eigenschaften	613

10	Faserbeton	615
10.1	Allgemeines	615
10.2	Zusammenwirken von Fasern und Matrix	616
10.2.1	Ungerissener Beton	616
10.2.2	Verhalten nach dem Anriß	616
10.3	Fasern	620
10.3.1	Stahlfasern	620
10.3.2	Glasfasern	622
10.3.3	Kunststofffasern (Polymere)	622
10.3.4	Kohlenstoff- und Zellulosefasern	625
10.4	Zusammensetzung	625
10.4.1	Beton	625
10.4.1.1	Zuschlag	625
10.4.1.2	Wassermenge, Zementgehalt und Betonzusätze	626
10.4.2	Fasern	626
10.4.2.1	Länge und Durchmesser	626
10.4.2.2	Fasergehalt	627
10.5	Herstellung	627
10.6	Eigenschaften	628
10.6.1	Verhalten bei Druckbeanspruchung	628
10.6.2	Verhalten bei Zugbeanspruchung	629
10.6.3	Verhalten bei Biegebeanspruchung	630
10.6.3.1	Einmalige Belastung	630
10.6.3.2	Wiederholte Belastung	632
10.6.3.3	Einfluß hoher Temperaturen	632
10.6.4	Verhalten bei Schlag- und Stoßbeanspruchung	633
10.6.5	Verhalten bei Querkraft- und Torsionsbeanspruchung	634
10.6.6	Kriechen und Schwinden	635
10.6.7	Reißneigung bei behindertem Schwinden	635
10.6.8	Dauerhaftigkeit	636
10.6.8.1	Glasfaserbeton	636
10.6.8.2	Stahlfaserbeton	637
10.6.8.3	Kunststoffbeton	638
10.6.9	Frostwiderstand, Frost- und Taumittelwiderstand	638
10.6.10	Hitzebeständigkeit	639
10.6.11	Verschleißwiderstand	639
10.6.12	Transportvorgänge	639
10.7	Anwendung	640
10.8	Fasermatten- und Gittermattenbeton	641
10.8.1	Fasermatten und Gittermatten aus Stahl	641
10.8.2	Herstellung von Fasermatten- und Gittermattenbeton	642
10.8.3	Eigenschaften	643
10.8.3.1	Druckfestigkeit	643
10.8.3.2	Zugfestigkeit	643
10.8.3.3	Elastizitätsmodul	644
10.8.3.4	Langzeitverformungen	645

10.8.4	Anwendung	645
10.9	Textilbewehrter Beton	645
11	Selbstverdichtender Beton	647
11.1	Überblick	647
11.2	Definition	647
11.3	Frischbetoneigenschaften	647
11.3.1	Fließfähigkeit	647
11.3.2	Viskosität	648
11.3.3	Gefügestabilität	648
11.3.4	Einstellung der Eigenschaften	648
11.4	Mischungsentwurf	649
11.4.1	Anforderungen	649
11.4.2	Ausgangsstoffe	650
11.4.3	Entwurfsmethoden	650
11.5	Prüfverfahren	653
11.5.1	Einführung	653
11.5.2	Prüfungen am Mörtel bzw. Leim	653
11.5.2.1	Ausbreitfließversuch für Mörtel und Leim	653
11.5.2.2	Trichterauslaufzeit-Versuch für Mörtel	654
11.5.3	Prüfungen am Beton	655
11.5.3.1	Fließversuch für Beton	655
11.5.3.2	U-Kasten-Versuch	656
11.5.3.3	Fließschikane-Versuch	656
11.5.3.4	L-Kasten-Versuch	657
11.5.3.5	Trichterauslaufzeit-Versuch für Beton	657
11.5.3.6	Orimet-Versuch	658
11.5.3.7	Acrylglasrohr-Versuch	658
11.5.3.8	J-Ring-Versuch	658
11.5.3.9	Viskosimeter-Versuch	659
11.5.3.10	Entmischungs-Versuch	659
11.5.3.11	Durchfließ-Versuch	660
11.5.3.12	FVB-Versuch	660
11.5.3.13	Luftgehalt-Versuch	663
11.6	Festbetoneigenschaften	663
11.6.1	Überblick	663
11.6.2	Druckfestigkeit	663
11.6.3	Zugfestigkeit	663
11.6.4	Elastizitätsmodul	664
11.6.5	Verbundfestigkeit	664
11.6.6	Schwinden	665
11.6.7	Kriechen	666
11.6.8	Spannungs-Dehnungs-Linie	666
11.6.9	Frost-Taumittel-Widerstand	668
11.7	Ausgeführte Bauwerke	669
11.8	Anforderungen an die Bauausführung	670

12	Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung	671
12.1	Allgemeines	671
12.2	Rezyklierte Gesteinskörnungen	671
12.2.1	Aufbereitung	671
12.2.2	Benennung	672
12.2.3	Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen	672
12.2.3.1	Allgemeines	672
12.2.3.2	Stoffliche Zusammensetzung von rezyklierten Gesteinskörnungen	673
12.2.3.3	Kornrohddichte und Wasseraufnahme	673
12.2.3.4	Feinanteile	674
12.2.3.5	Chloride	674
12.2.3.6	Kornfestigkeit	675
12.2.3.7	Frostwiderstand	675
12.2.3.8	Umweltverträglichkeit rezyklierter Gesteinskörnungen	675
12.2.4	Produktionslenkung	677
12.2.4.1	Randbedingungen	677
12.2.4.2	Eingangskontrolle	677
12.2.4.3	Werkseigene Produktionskontrolle	678
12.2.4.4	Fremdüberwachung	678
12.3	Beton	678
12.3.1	Bemessung	678
12.3.2	Anwendungsbereiche	679
12.3.3	Mischungsentwurf	680
12.3.4	Herstellung und Eigenschaften des Frischbetons	680
12.3.5	Festbetoneigenschaften	681
12.3.5.1	Druckfestigkeit	681
12.3.5.2	Zugfestigkeit	682
12.3.5.3	Elastizitätsmodul	684
12.3.5.4	Spannungs-Dehnungs-Linie	685
12.3.5.5	Kriechen	685
12.3.5.6	Schwinden	686
12.3.5.7	Frost mit und ohne Taumittleinwirkung	687
12.3.5.8	Karbonatisierung	689
12.3.5.9	Wassereindringwiderstand	689
12.4	Ausgeführte Bauwerke	690
13	Betone mit Kunststoffen	691
13.1	Allgemeines	691
13.2	Kunststoffe	692
13.2.1	Arten	692
13.2.2	Kunststoffgruppen	694
13.3	Kunststoffmodifizierter Mörtel und Beton (PCC)	695
13.3.1	Allgemeines	695
13.3.2	Gefügeeinfluß	696
13.3.3	Eigenschaften von frischem PCC	696
13.3.4	Eigenschaften von erhärtetem PCC	696
13.3.5	Temperatureinfluß	699

13.4	Reaktionsharzmörtel und Reaktionsharzbeton (PC)	699
13.4.1	Allgemeines	699
13.4.2	Herstellung von PC	700
13.4.3	Eigenschaften von PC	700
13.4.3.1	Festigkeitsentwicklung	700
13.4.3.2	E-Modul	701
13.4.3.3	Festigkeiten	701
13.4.3.4	Rohdichte	701
13.4.3.5	Korrosionsschutz der Bewehrung	701
13.4.3.6	Wärmeentwicklung	702
13.4.3.7	Kriechen und Schwinden	702
13.4.3.8	Temperaturabhängigkeit	702
13.4.4	Zuschlag	702
Literaturverzeichnis		703
Normen und Richtlinien		745
Stichwortverzeichnis		769