
Inhaltsverzeichnis

1 Kenngrößen und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Beton	1
1.1 Historische Rolle der Dauerhaftigkeit	1
1.2 Voraussetzungen für die Dauerhaftigkeit	2
1.2.1 Grundsätzliches	3
1.2.2 Wesentliche betontechnische Maßnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit	7
1.2.3 Grenzwerte für die Betonzusammensetzung	16
1.3 Einfluss des Zementsteins	16
Literatur	24
2 Zement	27
2.1 Kurzer historischer Abriss	27
2.2 Portlandzementklinker	28
2.2.1 Chemische Zusammensetzung	28
2.2.2 Mineralogische Zusammensetzung	29
2.2.3 Zementtechnische Eigenschaften der Klinkermineralien	33
2.2.4 Ökologische Aspekte	36
2.3 Sulfatträger	37
2.4 Zumahlstoffe	39
2.4.1 Latent hydraulische Stoffe	40
2.4.2 Puzzolanische Stoffe	41
2.4.3 Inerte Stoffe	46
2.4.4 Wirkung von Zumahlstoffen	46
2.4.5 Zumahlstoffzemente im Beton	48
2.5 Zementmahlung	48
2.6 Hydratation	49
2.6.1 Verfestigungsprozesse	50
2.6.2 Hydratation der silicatischen Phasen C_3S und C_2S	51
2.6.3 Hydratation des C_3A	54
2.6.4 Hydratation des C_4AF	56

2.6.5	Vergleich der Hydratationsprodukte	56
2.6.6	Hydratation von Portlandzement.	56
2.7	Zement nach DIN EN 197-1	83
2.7.1	Normanforderungen an Zemente	89
2.7.2	Zemente mit besonderen Eigenschaften nach DIN EN 197-1, DIN EN 14216 und DIN 1164	90
2.8	Sulfathüttenzement	95
2.9	Feinstzemente	98
	Literatur	100
3	Carbonatisierung von Beton	103
3.1	Kurzer historischer Abriss	103
3.2	Wesen der Carbonatisierung	103
3.3	Phasen der Carbonatisierung	105
3.4	Auswirkungen der Carbonatisierung	108
3.4.1	pH-Wert	109
3.4.2	Korrosion der Bewehrung	112
3.5	Methoden zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe	117
3.6	Berechnung des Carbonatisierungsfortschritts	119
3.7	Carbonatisierungsschwinden	124
3.8	Einflussfaktoren auf die Carbonatisierung	125
3.8.1	CO ₂ -Konzentration	125
3.8.2	Feuchtigkeit	126
3.8.3	w/z-Wert	127
3.8.4	Zementart	129
3.8.5	Nachbehandlung	130
3.8.6	Gesteinskörnungen, Zusatzmittel, Zusatzstoffe	136
3.8.7	Temperatur und thermodynamische Aspekte	137
3.9	Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen gegen stahlbetongefährdende Carbonatisierung	144
3.9.1	Schutzmaßnahmen	144
3.9.2	Instandsetzungsmaßnahmen	146
3.9.3	Beurteilung der Wirksamkeit carbonatisierungsbremsender Beschichtungen	151
3.10	Selbstheilung von Rissen	154
3.10.1	Natürliche Selbstheilung	154
3.10.2	Mikrobiologische Selbstheilung	157
	Literatur	158
4	Sulfatangriff	161
4.1	Kurzer historischer Abriss	161
4.2	Schädigungsmechanismus	162

4.3	Mikrostrukturelle Veränderungen im Zementsteingefüge bei Sulfatangriff	163
4.4	Physikalischer Widerstand von Beton gegen das Eindringen sulfathaltiger Wässer	165
4.5	Chemischer Angriff durch Sulfate	166
4.5.1	Ettringitbildung	166
4.5.2	Gipsbildung	171
4.5.3	Thaumasitbildung	172
4.5.4	Einfluss des Kations auf den Schädigungsverlauf	180
4.6	Sulfatschäden	182
4.6.1	Schäden an Betonkonstruktionen infolge Sulfatangriff durch Oxidation von Sulfiden	182
4.6.2	Mauerwerksschäden durch Zementinjektion in sulfathaltiges Mauerwerk	186
4.6.3	Bodenhebungen nach Bodenverbesserung mit Kalk-Zement-Bindemittel	189
4.7	Normative Regelungen	190
4.7.1	Expositionsklassen	190
4.7.2	Geeignete Zementarten	190
4.7.3	Mineralische Zusatzstoffe zur Verbesserung des Sulfatwiderstands	191
4.8	Prüfverfahren	193
4.8.1	Prüfverfahren für äußeren Angriff	194
4.8.2	Prüfverfahren für inneren Angriff	197
4.8.3	Prüfverfahren in den USA	198
4.8.4	Nachbildung des unter Feldbedingungen ablaufenden Schädigungsablaufs bei Laborbedingungen	199
	Literatur	204
5	Schädigende Ettringitbildung im erhärteten Beton	209
5.1	Kurzer historischer Abriss	209
5.2	Grundlagen	210
5.3	Ettringit im erhärteten Beton	212
5.4	Schädigende Ettringitbildung infolge unsachgemäßer Wärmebehandlung	214
5.4.1	Thermodynamische Berechnungen zur Ettringitbildung	215
5.4.2	Sulfatbindung in Abhängigkeit von der Erhärtungstemperatur ...	220
5.4.3	Einfluss der Betonzusammensetzung auf die späte Ettringitbildung	224
5.4.4	Laborversuche zur Dauerhaftigkeit wärmebehandelter Betone	226
5.4.5	Vorbeugende Maßnahmen	229

5.5	Späte Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen	230
5.5.1	Innere Sulfatquellen und späte Sulfatfreisetzung.....	232
5.5.2	Wechselnde Feuchtebeanspruchung und schadensfördernde Randbedingungen.....	233
5.6	Nachweis von Betonschäden	238
5.6.1	Makroskopisches Schadensbild	238
5.6.2	Kennwerte zur Schadenserfassung.....	238
5.6.3	Nachweis der Schadensbeteiligung von Ettringit.....	242
	Literatur.....	249
6	Säureangriff auf Beton	253
6.1	Kurzer historischer Abriss	253
6.2	Mechanismus des Säureangriffs.....	254
6.2.1	Angriff durch kalkaggressive Kohlensäure	254
6.2.2	Biogene Säurebildung.....	255
6.2.3	Kombinierter Säure-Sulfat-Angriff	257
6.2.4	Säureangriff an Kühltürmen und Wasserbauten	257
6.3	Schutzmaßnahmen gegenüber Säureangriff	257
6.3.1	Grundsätzliche Regelungen.....	257
6.3.2	Säurewiderstandsfähiger Beton	259
6.4	Prüfung von Beton mit hohem Säurewiderstand	260
	Literatur.....	260
7	Einwirkung von Chloriden auf Beton	263
7.1	Kurzer historischer Abriss	263
7.2	Chloride im Beton	263
7.2.1	Betonausgangsstoffe.....	264
7.2.2	Einwirkung von Meerwasser.....	264
7.2.3	Einwirkung von Tausalzen	266
7.2.4	Brandfall.....	267
7.3	Mechanismus des Eindringens von Chloriden	267
7.4	Verteilung von Chloriden im Beton	269
7.5	Beeinflussung der Transportvorgänge von Chloriden im Beton	270
7.6	In welcher Form liegen Chloride im Beton vor?.....	273
7.7	Chlorideinbindung durch Bindemittel.....	274
7.8	Kritischer korrosionsauslösender Grenzwert	275
7.9	Bestimmung des Chloridgehalts	280
7.9.1	Quantitative chemische Analyse.....	280
7.9.2	Bestimmung (Nachweis) freier Chloridionen	281
7.9.3	Nachweis der fest gebundenen Chloridionen.....	283
7.9.4	Probeentnahmestellen	283
7.9.5	Widerstand des Betons gegen Chlorideindringen.....	283

7.10	Chloridangriff auf Stahlbeton	284
7.10.1	Elektrochemische Grundlagen	284
7.10.2	Risse im Beton und Korrosionsfortschritt beim Betonstahl	287
7.11	Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen bei chloridinduzierter Korrosion	289
7.11.1	Schutzmaßnahmen	289
7.11.2	Instandsetzungsmaßnahmen	293
	Literatur	296
8	Alkali-Kieselsäure-Reaktion	299
8.1	Kurzer historischer Abriss	299
8.2	Voraussetzungen für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion	300
8.3	Alkalireaktive Minerale und Gesteinskörnungen	304
8.3.1	Mineralien mit einem Gefährdungspotential für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion	306
8.3.2	Gesteine mit einem Gefährdungspotential für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion	308
8.3.3	Technische Produkte mit einem Gefährdungspotential für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion	314
8.4	Mechanismen einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion	317
8.4.1	Chemische Reaktionen	317
8.4.2	SiO_2 und der Lösungsprozess	318
8.4.3	Quelldrücke und Osmose	323
8.4.4	AKR-Gel	326
8.5	Schadenscharakteristik	329
8.5.1	Makroskopische Merkmale	329
8.5.2	Mikroskopische Merkmale	330
8.6	AKR-beeinflussende Faktoren	334
8.6.1	Alkaligehalt des Zements	335
8.6.2	Zementgehalt des Betons	338
8.6.3	Menge an alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen	339
8.6.4	Temperatur und Feuchtigkeit	340
8.6.5	Permeabilität des Betons	340
8.6.6	Alkalizufuhr von außen	341
8.7	Maßnahmen zur Vorbeugung oder Reduzierung einer betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion	346
8.7.1	Latent hydraulische Stoffe	347
8.7.2	Puzzolanische Stoffe	348
8.7.3	Lithiumverbindungen	354
8.7.4	Das $\text{SiO}_2/\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent-Verhältnis als Kriterium zur Berechnung der Dehnung infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion	356

8.8	Nationale Normen und Richtlinien	357
8.9	Prüfverfahren	362
8.9.1	Internationale Prüfverfahren	363
8.9.2	Nationale Prüfverfahren	368
8.9.3	Beispiele von Untersuchungsergebnissen	381
	Literatur	393
9	Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton	399
9.1	Kurzer historischer Abriss	399
9.2	Gefrieren der Porenlösung im Zementstein	400
9.2.1	Gefrierpunktniedrigung durch Druck	401
9.2.2	Gefrierpunktniedrigung durch gelöste Stoffe	401
9.2.3	Gefrierpunktniedrigung durch Oberflächenkräfte	403
9.2.4	Unterkühlungseffekte	406
9.3	Schädigungsmechanismen	407
9.3.1	Makroskopische Mechanismen	407
9.3.2	Mikroskopische Schadensursachen	410
9.4	Einflussgrößen	417
9.4.1	Einfluss der Betonzusammensetzung	417
9.4.2	Technologische Einflüsse	444
9.4.3	Äußere Einflüsse	446
9.5	Frost- und Frost-Taumittel-Prüfverfahren	448
9.5.1	Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstands mit dem CDF-Verfahren	449
9.5.2	Prüfung des Frostwiderstands mit dem CIF-Verfahren	453
9.5.3	Präzision von CDF- und CIF-Test	457
9.5.4	Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands nach der schwedischen Norm SS 13 72 44 (Slab-Test; Borås-Verfahren) ...	459
9.6	Baupraktische Hinweise	461
9.6.1	Wesentliche Einsatzgebiete für Betone mit hohem FTW bzw. FTSW	461
9.6.2	Hauptschadensbilder Frost- bzw. Frost-Taumittel-geschädigter Betonkonstruktionen	462
9.6.3	Mikroluftporen im Beton (LP-Beton)	462
9.6.4	Betontechnische Voraussetzungen für Betone mit hohem FTW bzw. FTSW	464
9.6.5	Wesentliche betontechnologische Anforderungen zur Sicherung eines sachgerechten LP-Betons	465
9.6.6	Beispiel für die Berechnung des spezifischen Zementgehalts eines LP-Betons	466
	Literatur	468
	Sachwortverzeichnis	473