

---

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Kenngrößen und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Beton . . . . .</b>	<b>1</b>
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
<b>2 Zement . . . . .</b>	<b>27</b>
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 <sub>3</sub> S und C <sub>2</sub> S . . . . .	51
2.6.3 Hydratation des C <sub>3</sub> A . . . . .	54
2.6.4 Hydratation des C <sub>4</sub> AF . . . . .	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
<b>3</b>	<b>Carbonatisierung von Beton .....</b>	<b>103</b>
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 <sub>2</sub> -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
<b>4</b>	<b>Sulfatangriff .....</b>	<b>161</b>
4.1	Kurzer historischer Abriss .....	161
4.2	Schädigungsmechanismus .....	162

4.3	Mikrostrukturelle Veränderungen im Zementstein eingefüge 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 Beton .....	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	<b>Säureangriff auf Beton .....</b>	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	<b>Einwirkung von Chloriden auf Beton .....</b>	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
<b>8</b>	<b>Alkali-Kieselsäure-Reaktion .....</b>	<b>299</b>
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 <sub>2</sub> 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 SiO <sub>2</sub> /Na <sub>2</sub> 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
<b>9</b>	<b>Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton.....</b>	<b>399</b>
9.1	Kurzer historischer Abriss .....	399
9.2	Gefrieren der Porenlösung im Zementstein .....	400
9.2.1	Gefrierpunkterniedrigung durch Druck .....	401
9.2.2	Gefrierpunkterniedrigung durch gelöste Stoffe .....	401
9.2.3	Gefrierpunkterniedrigung 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
	<b>Sachwortverzeichnis.....</b>	<b>473</b>