

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Einführung | 1 |
| 1 Kenngrößen und Einflussfaktoren auf die Dauerhaftigkeit von Beton ... | 3 |
| 1.1 Historische Rolle der Dauerhaftigkeit | 3 |
| 1.2 Voraussetzungen für die Dauerhaftigkeit | 4 |
| 1.3 Einfluss des Zementsteins | 14 |
| 1.4 Literatur | 22 |
| 2 Carbonatisierung von Beton | 23 |
| 2.1 Kurzer historischer Abriss | 23 |
| 2.2 Wesen der Carbonatisierung | 23 |
| 2.3 Phasen der Carbonatisierung | 26 |
| 2.4 Auswirkungen der Carbonatisierung | 29 |
| 2.4.1 Der pH-Wert | 30 |
| 2.4.2 Korrosion der Bewehrung | 32 |
| 2.5 Methoden zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe | 38 |
| 2.6 Berechnung des Carbonatisierungsfortschrittes | 41 |
| 2.7 Carbonatisierungsschwinden | 46 |
| 2.8 Einflussfaktoren auf die Carbonatisierung | 47 |
| 2.8.1 CO ₂ -Konzentration | 47 |
| 2.8.2 Feuchtigkeit | 47 |
| 2.8.3 w/z-Wert | 49 |
| 2.8.4 Zementart | 50 |
| 2.8.5 Nachbehandlung | 52 |
| 2.8.6 Zuschläge, Zusatzmittel, Zusatzstoffe | 57 |
| 2.8.7 Temperatur und thermodynamische Aspekte | 57 |
| 2.9 Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen gegen stahlbetongefährdende Carbonatisierung | 65 |
| 2.9.1 Schutzmaßnahmen | 65 |
| 2.9.2 Instandsetzungsmaßnahmen | 67 |
| 2.9.3 Beurteilung der Wirksamkeit carbonatisierungsbremsender Beschichtungen | 70 |

| | |
|--|------------|
| 2.10 Selbstheilung von Rissen | 72 |
| 2.11 Literatur | 77 |
| 3 Neutralisation durch Schwefeldioxid und Stickoxide | 80 |
| 3.1 Mechanismen der SO ₂ - und NO _x -Aufnahme | 80 |
| 3.2 Literatur | 82 |
| 4 Einwirkung von Chloriden auf Beton | 83 |
| 4.1 Kurzer historischer Abriss | 83 |
| 4.2 Chloride im Beton | 83 |
| 4.2.1 Betonausgangsstoffe | 84 |
| 4.2.2 Einwirkung von Meerwasser | 85 |
| 4.2.3 Einwirkung von Tausalzen | 87 |
| 4.2.4 Brandfall | 88 |
| 4.3 Mechanismus des Eindringens von Chloriden | 88 |
| 4.4 Beeinflussung der Transportvorgänge von Chloriden im Beton | 90 |
| 4.5 In welcher Form liegen Chloride im Beton vor? | 93 |
| 4.6 Chlorideinbindung durch Bindemittel | 94 |
| 4.7 Kritischer korrosionsauslösender Grenzwert | 96 |
| 4.8 Bestimmung des Chloridgehaltes | 100 |
| 4.8.1 Quantitative chemische Analyse | 100 |
| 4.8.2 Bestimmung (Nachweis) freier Chloridionen | 101 |
| 4.8.3 Nachweis der fest gebundenen Chloridionen | 103 |
| 4.9 Chloridangriff auf Stahlbeton | 103 |
| 4.9.1 Elektrochemische Grundlagen | 103 |
| 4.9.2 Rolle der Risse auf den Korrosionsfortschritt des Betonstahles | 107 |
| 4.10 Schutz- und Instandsetzungsmaßnahmen bei chloridinduzierter Korrosion | 108 |
| 4.10.1 Schutzmaßnahmen | 108 |
| 4.10.2 Instandsetzungsmaßnahmen | 113 |
| 4.11 Literatur | 115 |
| 5 Sulfatwiderstandsfähigkeit von Beton | 119 |
| 5.1 Kurzer historischer Abriss | 119 |
| 5.2 Schadensmechanismus des Sulfatangriffs auf Beton | 120 |
| 5.3 Ursachen des Sulfattreibens | 120 |
| 5.4 Wirkungen des Sulfatangriffs | 122 |
| 5.5 C ₃ A-Gehalt und Sulfatwiderstand | 126 |
| 5.6 Einfluss von Zusatzstoffen auf den Sulfatwiderstand | 130 |
| 5.7 Einfluss verschiedener Sulfatlösungen auf Zementstein | 132 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 5.8 | Betonangreifende Flüssigkeiten, Böden und Dämpfe | 134 |
| 5.9 | Betonparameter und Sulfatkorrosion | 137 |
| 5.10 | Prüfverfahren | 139 |
| 5.11 | Literatur | 145 |
| 6 | Schädigende Ettringitbildung im erhärteten Beton | 148 |
| 6.1 | Kurzer historischer Abriss | 148 |
| 6.2 | Grundlagen | 149 |
| 6.3 | Ettringit im Frischbeton | 151 |
| 6.4 | Ettringit im erhärteten Beton | 154 |
| 6.5 | Schädigende Ettringitbildung infolge unsachgemäßer Wärmebehandlung | 157 |
| 6.5.1 | Thermodynamische Berechnungen zur Ettringitbildung | 158 |
| 6.5.2 | Sulfatbindung in Abhängigkeit von der Erhärtungstemperatur | 163 |
| 6.5.3 | Einfluss der Betonzusammensetzung auf die späte Ettringit- bildung | 167 |
| 6.5.4 | Laborversuche zur Dauerhaftigkeit wärmebehandelter Betone | 169 |
| 6.5.5 | Vorbeugende Maßnahmen | 172 |
| 6.6 | Späte Ettringitbildung in nicht wärmebehandelten Betonen | 174 |
| 6.6.1 | Innere Sulfatquellen und späte Sulfatfreisetzung | 176 |
| 6.6.2 | Wechselnde Feuchtebelastung und schadensfördernde Rand- bedingungen | 179 |
| 6.7 | Nachweis von Betonschäden | 188 |
| 6.7.1 | Makroskopisches Schadensbild | 188 |
| 6.7.2 | Kennwerte zur Schadenserfassung | 189 |
| 6.7.3 | Nachweis der Schadensbeteiligung von Ettringit | 194 |
| 6.7.3.1 | Mikroskopisches Schadensbild | 194 |
| 6.7.3.2 | Analytische Verfahren zur Bestimmung von Oxid- und Phasenzusammensetzung | 197 |
| 6.8 | Literatur | 202 |
| 7 | Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton | 208 |
| 7.1 | Kurzer historischer Abriss | 208 |
| 7.2 | Gefrieren der Porenlösung im Zementstein | 209 |
| 7.2.1 | Gefrierpunkterniedrigung durch Druck | 209 |
| 7.2.2 | Gefrierpunkterniedrigung durch gelöste Stoffe | 210 |
| 7.2.3 | Gefrierpunkterniedrigung durch Oberflächenkräfte | 212 |
| 7.2.4 | Unterkühlungseffekte | 214 |
| 7.3 | Zerstörungsmechanismen | 216 |
| 7.3.1 | Makroskopische Mechanismen | 216 |
| 7.3.1.1 | Ungleiche Temperaturausdehnungskoeffizienten | 216 |
| 7.3.1.2 | Schichtenweises Gefrieren | 217 |
| 7.3.1.3 | Temperatursturz | 218 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 7.3.2 | Mikroskopische Schadensursachen | 219 |
| 7.3.2.1 | Hydraulischer Druck | 219 |
| 7.3.2.2 | Kapillarer Effekt | 220 |
| 7.3.2.3 | Diffusion und Osmose | 222 |
| 7.3.2.4 | Thermodynamisches Modell | 222 |
| 7.3.2.5 | Kristallisationsdruck | 225 |
| 7.4 | Einflussgrößen | 226 |
| 7.4.1 | Einfluss der Betonzusammensetzung | 226 |
| 7.4.1.1 | Wasserzementwert | 226 |
| 7.4.1.2 | Zuschlag | 229 |
| 7.4.1.3 | Künstliche Luftporen | 232 |
| 7.4.1.4 | Zement | 236 |
| 7.4.2 | Technologische Einflüsse | 253 |
| 7.4.3 | Äußere Einflüsse | 254 |
| 7.5 | Frost- und Frost-Taumittel-Prüfverfahren | 256 |
| 7.5.1 | Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstandes mit dem CDF-Verfahren | 258 |
| 7.5.2 | Prüfung des Frostwiderstandes mit dem CIF-Verfahren | 260 |
| 7.5.3 | Präzision von CDF- und CIF-Test | 264 |
| 7.5.4 | Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes nach der schwedischen Norm SS 13 72 44 (Slab-Test; Borås-Verfahren) | 265 |
| 7.6 | Baupraktische Hinweise | 268 |
| 7.6.1 | Wesentliche Einsatzgebiete für Betone mit hohem FTW bzw. FTSW | 268 |
| 7.6.2 | Hauptschadensbilder frost- und/oder frosttaumittelgeschädigter Betonkonstruktionen | 269 |
| 7.6.3 | Mikroluftporen im Beton (LP-Beton) | 269 |
| 7.6.4 | Betontechnische Voraussetzungen für Betone mit hohem FTW bzw. FTSW | 270 |
| 7.6.5 | Wesentliche betontechnologische Anforderungen zur Sicherung eines sachgerechten LP-Betons | 272 |
| 7.6.6 | Beispiel für die Berechnung des spezifischen Zementgehaltes eines Luftporenbetons (LP-Beton) | 273 |
| 7.7 | Literatur | 275 |
| 8 | Mikrobiologische Betonkorrosion | 279 |
| 8.1 | Korrosion von Beton in Abwasseranlagen | 280 |
| 8.2 | Korrosion von Beton an Hochbauten | 284 |
| 8.3 | Literatur | 286 |
| 9 | Alkali-Kieselsäure-Reaktion | 288 |
| 9.1 | Kurzer historischer Abriss | 288 |
| 9.2 | Mechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion | 289 |

| | | |
|------|---|------------|
| 9.3 | Reaktivität von Zuschlägen | 292 |
| 9.4 | Alkaliempfindliche Zuschläge | 295 |
| 9.5 | Einflussgrößen auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion | 304 |
| 9.6 | Möglichkeiten zur Reduzierung bzw. Verhinderung schädigender Alkali-Kieselsäure-Reaktion | 312 |
| 9.7 | Prüfverfahren | 313 |
| 9.8 | AKR-Schadensmerkmale | 315 |
| 9.9 | Alkali-Richtlinie | 322 |
| 9.10 | Literatur | 328 |
| | Stichwortverzeichnis | 331 |