

Zement

Grundlagen der Herstellung und Verwendung

Prof. Dr. rer. nat. Friedrich W. Locher

VERLAG  BAU+TECHNIK

Inhaltsverzeichnis

1 Einteilung der Zemente	17
1.1 Definition	17
1.2 Europäische und deutsche Normzemente	17
1.2.1 Allgemeines	17
1.2.2 Bestandteile nach der europäischen Zementnorm	18
1. Portlandzementklinker (K)	18
2. Hüttensand (S)	18
3. Puzzolan (P und Q)	18
4. Flugasche (V und W)	19
5. Gebrannter Schiefer (T)	19
6. Kalkstein (L)	19
7. Silicastaub (D)	20
8. Füller (F)	20
9. Calciumsulfat	20
10. Zementzusatzmittel	21
1.2.3 Zementarten der europäischen Zementnorm EN 197-1	21
1.2.4 Zementarten der deutschen Zementnorm DIN 1164-1	21
1.2.5 Anforderungen an die europäischen und deutschen Normzemente	22
1. Festigkeit	22
2. Physikalische und chemische Anforderungen	23
3. Zemente mit Sondereigenschaften	25
1.3 Zemente der ASTM-Normen	25
2 Geschichte des Zements	27
2.1 Stoffliche Grundlagen hydraulischer Bindemittel	27
2.2 Brennen des Zementklinkers	28
2.3 Zerkleinern von Rohstoff und Zement	28
2.4 Umweltschutz	29
2.5 Glasig erstarrte Hochofenschlacke	29
2.6 Zemente mit besonderen Eigenschaften	29
2.7 Zementnormen	30
3 Zementklinker	31
3.1 Zusammensetzung des Zementklinkers	31
3.1.1 Überblick	31
3.1.2 Tricalciumsilicat	33

3. 1. 3	Dicalciumsilicat	34
3. 1. 4	Tricalciumaluminat	36
3. 1. 5	12/7-Calciumaluminat	37
3. 1. 6	Monocalciumaluminat	38
3. 1. 7	Calciumdialuminat	38
3. 1. 8	Calciumaluminatferrit	39
3. 1. 9	Alkalihaltige Klinkerverbindungen	41
3. 1.10	Freies CaO und freies MgO (Periklas)	42
3. 1.11	Glas	44
3. 1.12	Alinit	44
3. 1.13	Calciumaluminatsulfat $3\text{CaO}\cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3\cdot \text{CaSO}_4$	45
3. 1.14	Spurrit	45
3. 2	Herstellen des Zementklinkers	46
3. 2. 1	Einleitung	46
3. 2. 2	Art der Rohstoffe	46
3. 2. 3	Gewinnen und Aufbereiten der Rohstoffe	49
3. 2. 4	Brennstoffe	52
3. 2. 5	Verfahrenstechnik des Brennens und Kühlens von Zementklinker	54
3. 2. 6	Reaktionen beim Brennen und Kühlen des Zementklinkers	61
3. 2. 7	Einflüsse auf die Reaktionen beim Brennen des Zementklinkers	66
	1. Agglomeration des Brennguts	66
	2. Sinterverhalten des Brennguts	66
	3. Einfluss von Zusätzen auf Klinkerbildung und Zementeigenschaften	67
3. 2. 8	Energiebedarf des Brennprozesses	68
	1. Theoretischer Energiebedarf für die Klinkerbildung	68
	2. Energiebedarf zum Verdampfen des Wassers	70
	3. Enthalpiestrom der Ofenabgase	70
	4. Enthalpiestrom der Kühlerabluft	70
	5. Wandverlust von Vorwärmer, Ofen und Kühler	70
	6. Enthalpiestrom des Klinkers beim Verlassen des Kühlers	70
3. 2. 9	Einflüsse auf den Brennstoffenergiebedarf	72
3. 2.10	Einfluss der Klinkerkühlung auf die Qualität des Zementklinkers und des Zements	73
3. 2.11	Einfluss der Ofenatmosphäre auf die Qualität des Zementklinkers und des Zements	75
3. 2.12	Ansatzbildung in Zementofenanlagen	78
3. 3	Beurteilung des Zementklinkers	80
3. 3. 1	Mikroskopische Beurteilung	80
3. 3. 2	Röntgenbeugungsanalytische Bestimmung der Phasenzusammensetzung	82
3. 3. 3	Berechnung der Phasenzusammensetzung	83
3. 3. 4	Kalkstandard	85
3. 3. 5	Silicatmodul	87

3. 3. 6	Tonerdemodul	87
3. 3. 7	Freies CaO, Litergewicht	88
4	Andere Hauptbestandteile des Zements	89
4. 1	Überblick	89
4. 2	Hüttensand	91
4. 3	Gebrannter Schiefer (Ölschiefer)	95
4. 4	Natürliche Puzzolane	96
4. 5	Künstliche Puzzolane	100
4. 5. 1	Flugasche	100
4. 5. 2	Silicastaub	104
4. 5. 3	Reisschalenasche	105
4. 5. 4	Calcinierter Ton	105
4. 6	Füller	106
5	Mahlen des Zements	109
5. 1	Mahlverfahren	109
5. 2	Mahlfeinheit, Korngrößenverteilung	111
5. 3	Mahlbarkeit	115
5. 4	Mahlhilfen	118
6	Umweltschutz bei der Zementherstellung	120
6. 1	Überblick	120
6. 2	Staub	120
6. 2. 1	Staubemission	120
1.	Art und Menge des Staubs	120
2.	Technische Einrichtungen zum Vermindern der Staubemission	122
3.	Messen der Staubemission	126
4.	Begrenzung und Überwachung der Staubemission	127
6. 2. 2	Staubausbreitung, Staubniederschlag	129
6. 2. 3	Staubwirkung	130
6. 3	Verdampfbare Bestandteile, Kreisläufe, Bilanzen, Emission und Immission	131
6. 3. 1	Grundlagen	131
6. 3. 2	Staubkreislauf	135
6. 3. 3	Alkalien	137
6. 3. 4	Schwefel	140
6. 3. 5	Fluorid	142
6. 3. 6	Chlorid, Bromid, Iodid	143
6. 3. 7	Umweltrelevante Spurenelemente	145
1.	Überblick	145

2. Nickel, Chrom, Arsen, Antimon	146
3. Zink, Blei	146
4. Cadmium	149
5. Thallium	151
6. Quecksilber	155
7. Flüchtigkeit der Spurenelemente	157
6. 3. 8 Emission verdampfbarer Bestandteile	158
1. Emissionsbegrenzung	158
2. Messen der Emission	158
3. Emissionsprognose, Vermindern der Emission	160
6. 3. 9 Immission verdampfbarer Bestandteile, Wirkung auf die Umwelt	161
1. Immission und Immissionsbegrenzung	161
2. Wirkung von Thallium auf Pflanzen	162
6. 4 Gase	163
6. 4. 1 Überblick	163
6. 4. 2 Kohlenstoffdioxid	164
6. 4. 3 Kohlenstoffmonoxid	164
6. 4. 4 Organische Verbindungen	165
6. 4. 5 Schwefeldioxid	167
6. 4. 6 Stickstoffoxide	168
1. NO-Bildung	168
2. NO ₂ -Bildung, NO-NO ₂ -Kreislauf, NO _x	168
3. Einflüsse auf die NO _x -Emission von Zementöfen	169
4. Selektive nicht katalytische NO-Reduktion (SNCR-Technologie)	172
5. Begrenzung der NO _x -Emission	173
6. 4. 7 Abscheiden von gasförmigen Bestandteilen	175
7 Zementerhärtung	176
7. 1 Einleitung	176
7. 2 Hydratationsprodukte	176
7. 2. 1 Überblick	176
7. 2. 2 Calciumhydroxid, Magnesiumhydroxid	176
7. 2. 3 Calciumsilicathydrate	177
1. Lösungsgleichgewicht	177
2. Morphologie, Aufbau	180
3. Hydratation von C ₃ S und β-C ₂ S	183
4. Strukturelemente von C-S-H	184
5. Calciumsilicathydrate bei höherer Temperatur	186
7. 2. 4 Calciumaluminathydrate	188
1. Lösungsgleichgewichte, stabile und metastabile Calciumaluminat- hydrate	188
2. C ₄ AH ₁₉ , Kristallstruktur und Entwässerungsverhalten	189
7. 2. 5 Calciumferrithydrate	191
7. 2. 6 Sulfathaltige Hydrate und verwandte Verbindungen	191

1. AFt-Verbindungen	192
2. AFm-Verbindungen	195
3. Syngenit	196
4. AFt- und AFm-Verbindungen im erhärteten Zement	196
7. 2. 7 Hydrogranat	197
7. 2. 8 Gehlenithydrat	198
7. 3 Hydratationsreaktionen	198
7. 3. 1 Wasserbedarf	198
7. 3. 2 Bluten	204
7. 3. 3 Zusammensetzung der wässrigen Lösung	204
7. 3. 4 Ablauf der Hydratation	206
1. Portlandzement	206
2. Portlandölschieferzement	212
3. Hüttensandhaltige Zemente	212
4. Puzzolanhaltige Zemente, flugaschehaltige Zemente	217
5. Zement mit Zusatz von Silicastaub	219
7. 3. 5 Erstarren	219
1. Reaktionen und Ablauf des Erstarrens	219
2. Einflüsse auf die Reaktionsfähigkeit des Tricalciumaluminats $\Delta_{\text{rel}} C_3A$..	227
3. Einflüsse auf das Sulfatangebot	232
7. 3. 6 Erhärten	236
1. Ursache und Verlauf des Erhärtens	236
2. Einfluss der Klinkerzusammensetzung	238
3. Einfluss der Zementzusammensetzung	240
4. Einfluss von Mahlfeinheit und Korngrößenverteilung	243
5. Einfluss des Wasserzementwerts	247
6. Einfluss von Zusätzen	247
7. Einfluss der Temperatur, Wärmebehandlung, verzögerte Ettringit- bildung	250
8. Dampfhärtung	254
7. 3. 7 Hydratationswärme	255
1. Allgemeines	255
2. Lösungskalorimeter	255
3. Adiabatisches Kalorimeter	255
4. Teiladiabatisches Verfahren	255
5. Wärmeflusskalorimeter	256
6. Hydratationswärme der Zemente und ihrer Bestandteile	256
8 Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins	259
8. 1 Wasserbindung	259
8. 2 Massebezogene Oberfläche, Partikelgröße der Hydratationsprodukte	266
8. 3 Gefüge	270
8. 3. 1 Modelle	270
8. 3. 2 Raumausfüllung	271

8. 3. 3	„Äußeres“ und „inneres“ Hydratationsprodukt	279
8. 3. 4	Kontaktzone zwischen Zementstein und Zuschlag	279
8. 4	Porosität	281
8. 4. 1	Überblick	281
8. 4. 2	Messverfahren	282
1.	Pyknometer-Verfahren	282
2.	Sättigung mit einer Flüssigkeit	283
3.	Kapillarkondensation	284
4.	Quecksilber-Druck-Porosimetrie	285
5.	Mikroskopische Messverfahren	285
6.	Weitere Verfahren	286
8. 4. 3	Ergebnisse, Schlussfolgerungen	286
8. 5	Festigkeit	293
8. 5. 1	Allgemeines	293
8. 5. 2	Einfluss der Porosität	293
8. 5. 3	Spezifische Festigkeit des Zementsteins	297
8. 5. 4	Erhärtung, Einfluss des Wasserzementwerts und des Hydratationsgrads ...	297
8. 5. 5	DSP- und MDF-Werkstoffe	300
8. 6	Formänderungen	301
8. 6. 1	Überblick	301
8. 6. 2	Elastizitätsmodul	301
8. 6. 3	Schwinden und Quellen	302
8. 6. 4	Kriechen	303
8. 6. 5	Thermische Verformung	306
8.7	Durchlässigkeit	309
8. 7. 1	Überblick	309
8. 7. 2	Permeation	309
8. 7. 3	Diffusion	310
8. 7. 4	Kapillares Saugen	311
8. 7. 5	Einflüsse auf die Dichtigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton	312
8. 7. 6	Wasserundurchlässiger Beton	316
8. 8	Einwirkung auf Metalle, Korrosionsschutz	317
8. 8. 1	Überblick	317
8. 8. 2	Elektrochemische Reaktionen, Standardpotential	317
8. 8. 3	Korrosionsreaktionen des Eisens	319
8. 8. 4	Carbonatisierung von Zementstein, Mörtel und Beton	324
8. 8. 5	Wirkung des Chlorids	328
1.	Korrosionsmechanismus	328
2.	Chloridbindung, Schwellenwert	329
3.	Eindringen von Chlorid in den Beton	330
4.	Einflüsse auf die chloridinduzierte Korrosion der Stahlbewehrung	332
8. 8. 6	Spannungsrisskorrosion	333
8. 8. 7	Korrosionsschutz der Stahlbewehrung	335

8.8.8	Korrosion und Korrosionsschutz von Nichteisenmetallen	336
8.9	Widerstandsfähigkeit gegenüber chemischen Angriffen	338
8.9.1	Überblick	338
8.9.2	Wirkung betonangreifender Stoffe	338
	1. Lösender Angriff	338
	2. Treibender Angriff	340
	3. Angriff von Meerwasser	342
	4. Angriff von Böden	342
	5. Angriff von Gasen	342
8.9.3	Beurteilung des chemischen Angriffs	343
8.9.4	Vorbeugende bauliche Maßnahmen	345
8.9.5	Verfärbungen, Ausblühungen	346
8.10	Alkali-Zuschlag-Reaktion	347
8.10.1	Überblick	347
8.10.2	Alkaliempfindliche Kieselsäure und Silicate im Zuschlag	348
8.10.3	Mechanismus der Alkali-Kieselsäure-Reaktion	349
	1. Chemische Vorgänge	349
	2. Wirkung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton	350
	3. Einfluss des alkaliempfindlichen Zuschlags, „Pessimum“	352
	4. Alkaligehalt des Zements, Zementart	354
	5. Zusammensetzung des Betons	355
8.10.4	Vorbeugende Maßnahmen gegen betonschädigende Alkali-Kiesel- säure-Reaktion	357
	1. Überblick	357
	2. Prüfung der Alkaliempfindlichkeit kieselsäurehaltiger Zuschläge	357
	3. Umweltbedingungen	359
	4. Betontechnische Maßnahmen	361
8.10.5	Alkali-Carbonat-Reaktion	362
	1. Alkaliempfindliche Carbonat-Gesteine	362
	2. Chemische Reaktionen und Dehnungsmechanismus	362
	3. Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Carbonat-Gesteinen	363
	4. Betontechnische Maßnahmen	364
8.11	Frostwiderstand	364
8.11.1	Mechanismus des Frostangriffs	364
	1. Hydrodynamischer Druck (hydraulischer Druck)	365
	2. Diffusion	365
	3. Wachstumsdruck der Eiskristalle	366
	4. Thermische Dehnung der Eiskristalle	366
8.11.2	Ablauf des Frostangriffs	367
8.11.3	Einflüsse auf den Frostangriff	367
	1. Füllungsgrad der Poren, Sättigungsgrad	367
	2. Taumittel	368
	3. Zuschlag	369

4. Luftporen	370
5. Zusammensetzung des Betons	373
6. Carbonatisierung	374
8.11. 4 Prüfung des Frost- und Frost-Taumittel-Widerstands	375
9 Normzemente mit besonderen Eigenschaften, Spezialzemente	379
9. 1 Überblick	379
9. 2 Zement mit hohem Sulfatwiderstand	380
9. 2. 1 Kennzeichnung	380
9. 2. 2 Schnellprüfverfahren	380
1. Überblick	380
2. Le Chatelier-Anstett-Test	381
3. ASTM C 452 Potentielle Dehnung von Portlandzement-Mörtel bei Sulfatangriff	381
4. Sulfatdehnung von zementärmerem Mörtel	382
5. Kleinprismenverfahren nach Koch-Steinegger	382
6. Flachprismenverfahren nach Wittekindt	382
7. Vergleich Kleinprismen- und Flachprismenverfahren, Untersu- chungen des Vereins Deutscher Zementwerke 1957 bis 1964	383
8. Weitere Schnellverfahren	385
9. 2. 3 Einfluss von Zementzusammensetzung und Zusatzstoffen auf den Sulfatwiderstand	385
1. Portlandzement und Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand	385
2. Betonzusatzstoffe	388
9. 3 Zement mit niedriger Hydratationswärme	389
9. 4 Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt	389
9. 5 Schnellzement	392
9. 6 Quellzement	392
9. 7 Tiefbohrzement	395
9. 8 Hydrophobierter Zement	398
9. 9 Feinstkörnige Bindemittel	398
9. 10 Zement für Spritzbeton	400
9. 11 Putz- und Mauerbinder	400
9. 12 Sulfathüttenzement	401
9. 13 Tonerdezement	402
9. 13. 1 Definition und Bezeichnung	402
9. 13. 2 Herstellung	403
9. 13. 3 Zusammensetzung	404
1. Chemische Zusammensetzung	404
2. Phasenzusammensetzung des Standard-Tonerdezements	404

3. Ermittlung der Phasenzusammensetzung von Standard-Tonerde-	
zementen	405
9. 13. 4 Hydratation	406
9. 13. 5 Gefüge und Eigenschaften des erhärteten Tonerdezements	408
9. 13. 6 Umwandlung der Hydratationsprodukte und ihr Einfluss auf die	
Eigenschaften des erhärteten Tonerdezements	409
9.13. 7 Gemische mit anderen Zementen und Zementbestandteilen	410
9.13. 8 Feuerfester Beton aus Tonerdezement	410
10 Umweltverträglichkeit von Zement und Beton	412
10. 1 Zementstaub	412
10. 2 Alkalische Wirkung	412
10. 3 Wirkung von Chromat	412
10. 4 Einbindung umweltrelevanter Stoffe mit Zement	413
10. 5 Radioaktivität und Beton	414
10. 5. 1 Radioaktive Strahlung	414
10. 5. 2 Halbwertszeit radioaktiver Elemente	415
10. 5. 3 Maßeinheiten der Radioaktivität	415
10. 5. 4 Radioaktive Belastung des Menschen	416
10. 5. 5 Radioaktivität von Baustoffen	418
10. 5. 6 Radon	419
11 Literatur	423
12 Stichwortverzeichnis	499
13 Chemische Formeln	519