

The background of the cover is a scanning electron micrograph (SEM) of cement particles. The image shows a complex, porous structure with various sized spherical and irregular particles, some with distinct surface textures. The color scheme is a gradient of blue, from a deep navy at the top and bottom to a lighter, almost white-blue in the center where the text is located.

Friedrich W. Locher

# Zement

Grundlagen der  
Herstellung und Verwendung



Locher

Zement – Grundlagen der Herstellung und Verwendung



# **Zement**

## Grundlagen der Herstellung und Verwendung

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

---

VLB-Meldung

Locher, Friedrich Wilhelm:

**Zement**

Grundlagen der Herstellung und Verwendung  
unveränderter Nachdruck

Düsseldorf: Verlag Bau+Technik GmbH, 2000

**eISBN 978-3-7640-0700-3**

© by Verlag Bau+Technik GmbH, Düsseldorf  
Gesamtproduktion: Verlag Bau+Technik GmbH,  
Postfach 12 01 10, 40601 Düsseldorf  
**[www.verlagbt.de](http://www.verlagbt.de)**

## Vorwort

Herstellung und Verwendung von Zement sind komplexe Prozesse, bei denen die Wirtschaftlichkeit der Verfahren und zunehmend Maßnahmen zum Schutz der Umwelt eine wesentliche Rolle spielen. Um die dabei auftretenden Probleme zu verstehen und zu lösen, sind Kenntnisse über die stofflichen Vorgänge und Zusammenhänge erforderlich. Damit befasst sich die Zementchemie, deren Aufgabenbereich sich seit den Anfängen des Bauens mit Zement in starkem Maß ausgeweitet hat und schon seit langem auch die Methoden und Erkenntnisse der mineralogisch-kristallographischen und chemisch-physikalischen Forschung einbezieht. Dieses Buch soll einen Überblick über die aus heutiger Sicht wesentlichen Erkenntnisse der Zementchemie geben, die sowohl Zusammensetzung und Eigenschaften der Zemente, die Reaktionen bei ihrer Herstellung und Verwendung als auch die stofflichen Probleme des Umweltschutzes umfasst.

Das Buch richtet sich an alle Chemiker, Physiker, Ingenieure und Techniker in Zementindustrie, Maschinenbau, Bauindustrie, Materialprüfung und Umweltschutz, um ihnen die für ihre Tätigkeit erforderlichen Kenntnisse über die Chemie des Zements zu vermitteln. Außerdem soll es als Lehrbuch für das Studium der Werkstoffwissenschaften an Hochschulen und Universitäten verwendbar sein. Mein Bestreben war es daher, die Zusammenhänge möglichst allgemein verständlich darzustellen, fachsprachliche Bezeichnungen zu erläutern und Messprinzipien zu beschreiben, auf denen die technischen und wissenschaftlichen Untersuchungsverfahren beruhen.

Seit vor etwa 150 Jahren die Produktion von Portlandzement begann, ist die Forschung in den Werkslaboratorien und den Forschungsstätten der Zementindustrie auf die Probleme bei der Herstellung und Verwendung des Zements ausgerichtet. Schwerpunkte waren anfangs die optimale Zusammensetzung des Rohstoffgemisches im Hinblick auf das Brennen des Zementklinkers und auf die Raumbeständigkeit der mit dem Zement hergestellten Mauermörtel. Ein viel diskutiertes Problem war danach die Verwendung latent hydraulischer und puzzolanischer Stoffe als Zementbestandteile, vor allem ihr Einfluss auf die Dauerhaftigkeit der aus solchen Zementen errichteten Bauwerke. Neue Aufgaben ergaben sich mit der verstärkten Einführung der Energie sparenden Brennverfahren und mit dem Wechsel der Brennstoffart von Öl auf Kohle als Folge der sprunghaften Verteuerung des Erdöls. Auch die schnelle Verbreitung des Transportbetons, mit der sich die Anforderungen an die Verarbeitungseigenschaften des Zements grundlegend geändert haben, erforderte eine intensive Forschungstätigkeit, insbesondere über das optimale Verzögern des Erstarrens. Schon seit längerer Zeit hat sich die Zementindustrie mehr und mehr mit dem Umweltschutz und mit der umweltverträglichen Nutzung heizwertreicher Abfälle in den Feuerungen der Zementöfen zu befassen. Auch dabei stehen in zunehmendem Maß

chemische Fragen im Vordergrund, wie z. B. die Minderung der Emission umwelt-relevanter Bestandteile von Gasen und Aerosolen.

Grundlage dieses Buches sind die Vorlesungen, die ich an der Technischen Universität Clausthal von 1959 bis 1999 gehalten habe. Mein besonderer Dank für vielseitiges Interesse und Förderung gilt den Mitgliedern des Vereins Deutscher Zementwerke e.V., seines Vorstands und seiner Geschäftsführung. Eine wesentliche Hilfe bei der Ausarbeitung des Manuskripts war es, dass mir in der Bibliothek des Forschungsinstituts der Zementindustrie in Düsseldorf die umfangreiche internationale Fachliteratur zur Verfügung stand. Dankbar erinnere ich mich der bereitwilligen Unterstützung durch meine Kolleginnen und Kollegen des Düsseldorfer Instituts, des Instituts für Nichtmetallische Werkstoffe der TU Clausthal, der Hochschulinstitute in Weimar und Berlin und anderer Forschungsinstitutionen. Auch möchte ich den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Verlag Bau+Technik GmbH für ihre Mitwirkung und viele Anregungen sowie für die Edition meines Buches danken.

Ratingen, im September 2000

Friedrich W. Locher

# Inhaltsverzeichnis

<b>1 Einteilung der Zemente</b> .....	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
<b>2 Geschichte des Zements</b> .....	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
<b>3 Zementklinker</b> .....	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
<b>4</b>	<b>Andere Hauptbestandteile des Zements</b> .....	<b>89</b>
4. 1	Überblick .....	89
4. 2	Hüttensand .....	91
4. 3	Gebannter 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	Calciniertes Ton .....	105
4. 6	Füller .....	106
<b>5</b>	<b>Mahlen des Zements</b> .....	<b>109</b>
5. 1	Mahlverfahren .....	109
5. 2	Mahlfeinheit, Korngrößenverteilung .....	111
5. 3	Mahlbarkeit .....	115
5. 4	Mahlhilfen .....	118
<b>6</b>	<b>Umweltschutz bei der Zementherstellung</b> .....	<b>120</b>
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 <sub>2</sub> -Bildung, NO-NO <sub>2</sub> -Kreislauf, NO <sub>x</sub> .....	168
3. Einflüsse auf die NO <sub>x</sub> -Emission von Zementöfen .....	169
4. Selektive nicht katalytische NO-Reduktion (SNCR-Technologie) .....	172
5. Begrenzung der NO <sub>x</sub> -Emission .....	173
6. 4. 7 Abscheiden von gasförmigen Bestandteilen .....	175
<b>7 Zementerhärtung .....</b>	<b>176</b>
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 <sub>3</sub> S und β-C <sub>2</sub> 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 <sub>4</sub> AH <sub>19</sub> , 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
<b>8</b>	<b>Aufbau und Eigenschaften des Zementsteins .....</b>	<b>259</b>
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	Spannungsrissskorrosion .....	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
<b>9 Normzemente mit besonderen Eigenschaften, Spezialzemente .....</b>	<b>379</b>
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
<b>10 Umweltverträglichkeit von Zement und Beton</b> .....	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
<b>11 Literatur</b> .....	423
<b>12 Stichwortverzeichnis</b> .....	499
<b>13 Chemische Formeln</b> .....	519



# 1 Einteilung der Zemente

## 1.1 Definition

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, d.h. ein anorganischer, nicht metallischer, fein gemahlener Stoff, der nach dem Anmachen mit Wasser infolge chemischer Reaktionen mit dem Anmachwasser selbständig erstarrt und erhärtet und nach dem Erhärten auch unter Wasser fest und raumbeständig bleibt. Wichtigstes Anwendungsgebiet ist daher die Herstellung von Mörtel und Beton, d.h. das Verbinden natürlicher oder künstlicher Zuschläge zu einem festen Baustoff, der üblichen Umwelteinwirkungen gegenüber dauerhaft ist. Maßgebend für die Unterscheidung zwischen Mörtel und Beton ist die Korngröße des Zuschlags, die bei Mörtel höchstens etwa 4 mm und bei Beton in der Regel bis 32 mm beträgt, in speziellen Fällen aber auch kleiner oder größer sein kann.

Die hydraulische Erhärtung beruht im Wesentlichen auf der Bildung von Calciumsilicathydraten. Die Zemente bestehen daher aus solchen Stoffen oder Stoffgemischen, aus denen sich durch Reaktion mit dem Anmachwasser genügend schnell Calciumsilicathydrate in einer für Festigkeit und Dauerhaftigkeit ausreichenden Menge bilden können. An der Erhärtung können jedoch auch andere Verbindungen beteiligt sein, z.B. Calciumaluminat. Im Gegensatz zu solchen silicatischen Zementen bestehen die Tonerdezemente überwiegend aus Calciumaluminaten. Ihre Erhärtung beruht auf der Bildung von Calciumaluminathydraten.

## 1.2 Europäische und deutsche Normzemente

### 1.2.1 Allgemeines

Für Zement als Ausgangsstoff zur Herstellung von Mörtel und Beton bestehen in praktisch allen Ländern Normen. Unterschiede in der wirtschaftlichen und industriellen Entwicklung, in den Rohstoffvorkommen und in den klimatischen Bedingungen haben in den verschiedenen Ländern zur Entwicklung unterschiedlicher Bauweisen und Baustoffe und damit auch zu unterschiedlichen Zementarten geführt. Dementsprechend bestehen auch wesentliche Unterschiede in den nationalen Zementnormen, die u.a. auch die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der aus den Zementen hergestellten Betone betreffen.

Für Europa werden seit 1975 die technischen Grundlagen für eine europäische Zementnorm ausgearbeitet. Im Vordergrund standen zunächst einheitliche Prüfverfahren, die in EN 196 zusammengefasst sind [S 189]. Außerdem wurde eine europaweit einheitliche Bezeichnung der Zementarten, ihrer Zusammensetzung und der Zementfestigkeitsklassen in der Norm EN 197-1 festgelegt. Grundlage sind alle in den mittel- und westeuropäischen Ländern für die allgemeine Verwendung hergestellten Zemente mit calciumsilicatischer Erhärtung [A 19]. Zemente mit zusätzlichen besonderen Eigenschaften (Spezialzemente) und Zemente mit anderen Erhärtungsmechanismen sollen in weiteren Teilen dieser Norm behandelt werden [E 24, S 189]. In die neue deutsche Zementnorm DIN 1164 [D 45] wurden von den Zementen der EN 197-1 nur die in Deutschland erprobten Zemente aufgenommen. Dazu gehören auch einige Zemente mit Sondereigenschaften.

### 1.2.2 Bestandteile der europäischen Normzemente

Zementbestandteile nach der europäischen Vornorm EN 197-1 sind:

1. Portlandzementklinker (K)
2. Hüttensand (granulierte Hochofenschlacke) (S)
3. Puzzolan (P und Q)
4. Flugasche (V und W)
5. Gebrannter Schiefer (T)
6. Kalkstein (L)
7. Silicastaub (D)
8. Füller (F)
9. Calciumsulfat
10. Zementzusatzmittel

Die Bestandteile des Zements werden unterteilt in Haupt- und Nebenbestandteile [E 24, D 45]. Als Hauptbestandteile gelten die unter 1. bis 7. aufgeführten Stoffe, sofern ihr Gehalt im Zement 5 M.-% übersteigt. Nebenbestandteile können alle unter 1. bis 8. genannten Stoffe sein, sofern sie zu höchstens 5 M.-% im Zement enthalten sind. Die Angaben über die Zementzusammensetzung, auch über die Anteile an Calciumsulfat und Zementzusatzmittel, beziehen sich stets auf die Summe aller im Zement enthaltenen Haupt- und Nebenbestandteile ohne Berücksichtigung des Calciumsulfats und der Zementzusatzmittel.

#### 1. Portlandzementklinker (K)

Portlandzementklinker, auch als Zementklinker oder kurz als Klinker bezeichnet, besteht zu mindestens zwei Dritteln aus den beiden CaO-reichsten Calciumsilicaten Tri- und Dicalciumsilicat, die mit dem Anmachwasser ausreichend schnell reagieren und erhärten können. Er ist demnach ein hydraulischer Stoff.

#### 2. Hüttensand (S)

Hüttensand, die deutsche Bezeichnung für granulierte, schnell gekühlte und daher überwiegend glasig erstarrte Hochofenschlacke, ist ein latent hydraulischer Stoff, weil er mit Wasser nur langsam, im Gemisch mit Anregern, z.B. Zementklinker, aber verhältnismäßig schnell unter Bildung von Calciumsilicathydraten reagiert und erhärtet. Er muss nach Masseanteilen zu mindestens zwei Dritteln glasig erstarrt sein und zu mindestens zwei Dritteln aus CaO, MgO und SiO<sub>2</sub> bestehen.

#### 3. Puzzolan (P und Q)

Puzzolane sind natürliche oder industrielle Stoffe, die, fein gemahlen, aufgrund ihres Gehalts an reaktionsfähigem Siliciumdioxid SiO<sub>2</sub> in Gegenwart von Wasser bei üblicher Umgebungstemperatur mit gelöstem Calciumhydroxid reagieren, Calciumsilicathydrate bilden und infolgedessen hydraulisch erhärten können. Maßgebend für die puzzolanische Erhärtung ist demnach reaktionsfähiges Siliciumdioxid, das entweder als freies SiO<sub>2</sub> oder in alumosilicatischer Bindung vorliegt. Infolgedessen bilden sich auch Calciumaluminat-hydrate, die ebenfalls zur Festigkeitsbildung beitragen können. Der Anteil an reaktionsfähigem CaO ist unbedeutend. Der Gehalt an reaktionsfähigem SiO<sub>2</sub> muss mindestens 25 M.-% betragen.

Obwohl Flugasche und Silicastaub puzzolanische Eigenschaften aufweisen, werden sie gesondert in den Abschnitten 4 und 7 behandelt.

*Natürliche* Puzzolane (P) sind im Allgemeinen Stoffe vulkanischen Ursprungs oder Sedimentgestein mit geeigneter chemisch-mineralogischer Zusammensetzung. Dazu gehört auch Trass nach DIN 51043 [D 57].

*Industrielle* Puzzolane (Q) sind thermisch behandelte und aktivierte Tone und Schiefer, luftgekühlte Schlacken der Blei-, Kupfer- und Zinkgewinnung, sofern sie reaktionsfähiges  $\text{SiO}_2$  in ausreichender Konzentration enthalten.

#### 4. Flugasche (V und W)

Flugasche wird durch elektrostatische oder mechanische Abscheidung von staubförmigen Partikeln aus den Abgasen von Feuerungen gewonnen. Sie darf nur dann für die Zementherstellung verwendet werden, wenn sie aus einer mit fein gemahlener Kohle betriebenen Feuerung stammt. Nach der chemischen Bindung des Siliciumdioxids ist sie entweder ein Alumosilicat oder ein Calciumsilicat. Beide Arten haben aufgrund ihres Gehalts an reaktionsfähigem Siliciumdioxid puzzolanische, die calciumsilicatische Flugasche außerdem noch hydraulische Eigenschaften. Um den Gehalt an unvollständig verbrannten Stoffen zu begrenzen, darf der Glühverlust höchstens 5,0 M.-% betragen.

*Siliciumdioxidreiche* Flugasche (V) ist ein feinkörniger Staub aus überwiegend kugelförmigen und glasigen Partikeln, der puzzolanische Eigenschaften besitzt. Sie muss weniger als 5 M.-% reaktionsfähiges CaO und mindestens 25 M.-% reaktionsfähiges  $\text{SiO}_2$  enthalten.

*Calciumoxidreiche* Flugasche (W) ist ein feinkörniger Staub mit hydraulischen und/oder puzzolanischen Eigenschaften. Der Gehalt an reaktionsfähigem CaO darf 5 M.-% nicht unterschreiten. CaO-reiche Flugasche mit Gehalten an reaktionsfähigem CaO zwischen 5 M.-% und 15 M.-% muss über 25 M.-% reaktionsfähiges  $\text{SiO}_2$  enthalten.

#### 5. Gebrannter Schiefer (T)

Besondere Bedeutung als Bestandteil von hydraulischen Bindemitteln hat der gebrannte Ölschiefer. Er fällt in einem speziellen Ofen bei Temperaturen von etwa 800 °C an. Aufgrund des Calciumcarbonat- und Schwefelgehalts im natürlichen Ausgangsmaterial enthält der gebrannte Ölschiefer Klinkerphasen, vor allem Dicalciumsilicat, Monocalciumaluminat sowie geringe Mengen an freiem CaO und Calciumsulfat, außerdem größere Anteile an puzzolanisch reagierenden Stoffen. Dementsprechend weisen solche gebrannten Schiefer in fein gemahlenem Zustand sowohl hydraulische Eigenschaften, wie die z.B. des Portlandzements, als auch puzzolanische Eigenschaften auf.

Fein gemahlener gebrannter Ölschiefer muss bei Prüfung der Festigkeit an Mörtel nach der Zementnorm DIN EN 196 [D 41], jedoch nach Feuchtlagerung anstatt Wasserlagerung [D 45], nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von min. 25,0 N/mm<sup>2</sup> erreichen. Außerdem muss er im Gemisch mit 70 M.-% Portlandzement raumbeständig sein [D 45, D 41].

#### 6. Kalkstein (L)

Kalkstein muss die für Füller (s. Abschnitt 8) geltenden Anforderungen erfüllen. Wenn er Hauptbestandteil des Zements ist, d.h. wenn sein Gehalt 5 M.-% übersteigt, muss er mindestens 75 M.-%  $\text{CaCO}_3$  enthalten, die Methylenblau-Adsorption als Maß für den Ton-

gehalt darf nicht größer als 1,20 g/100 g und der Gehalt an organischen Bestandteilen TOC [C 8] bei LL nicht größer als 0,20 M.-%, bei L nicht größer als 0,50 M.-% sein.

#### 7. Silicastaub (D)

Silicastaub besteht aus sehr feinen kugelförmigen Partikeln mit hohem Gehalt an amorphem Siliciumdioxid  $\text{SiO}_2$ . Wenn er Hauptbestandteil des Zements ist, d.h. wenn sein Gehalt 5 M.-% übersteigt, darf nur Silicastaub verwendet werden, der aus mindestens 85 M.-% amorphem  $\text{SiO}_2$  besteht, einen Glühverlust von höchstens 4 M.-% und eine massebezogene Oberfläche, nach BET gemessen [B 122], von mindestens 15  $\text{m}^2/\text{g}$  aufweist (s. Abschnitt 4.5.2).

#### 8. Füller (F)

Füller sind natürliche oder künstliche anorganische mineralische Stoffe, die nach entsprechender Aufbereitung aufgrund ihrer Korngrößenverteilung die physikalischen Eigenschaften von Zement verbessern, z.B. seine Verarbeitbarkeit oder sein Wasserrückhaltevermögen. Sie können inert sein oder schwach hydraulische, latent hydraulische oder puzzolanische Eigenschaften aufweisen. In dieser Hinsicht werden jedoch keine Anforderungen an sie gestellt. Sie müssen sachgerecht aufbereitet sein, das heißt sie müssen je nach Gewinnungs- oder Anlieferungszustand ausgewählt, homogenisiert, getrocknet und zerkleinert sein. Sie dürfen den Wasserbedarf von Zement nicht wesentlich erhöhen, die Beständigkeit des Betons oder Mörtels nicht beeinträchtigen und den Korrosionsschutz der Bewehrung nicht vermindern.

#### 9. Calciumsulfat

Calciumsulfat wird dem Zement bei seiner Herstellung in geringen Mengen zur Regelung des Erstarrens zugegeben, und zwar als Gips  $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  oder  $\beta$ -Anhydrit,  $\beta\text{-CaSO}_4$ , oder als Gemisch dieser Verbindungen.  $\beta$ -Anhydrit ist die natürlich vorkommende Modifikation des wasserfreien  $\text{CaSO}_4$ , auch als Anhydrit II bezeichnet.  $\alpha$ -Anhydrit (Anhydrit I) ist die Hochtemperaturmodifikation des  $\text{CaSO}_4$ , die nur bei Temperaturen über 1180°C beständig ist. Wird Gips ein Teil seines Wassergehalts entzogen, so bildet sich Halbhydrat  $\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$ , bei vollständigem Entwässern entsteht der „lösliche“  $\gamma$ -Anhydrit,  $\gamma\text{-CaSO}_4$ , auch Anhydrit III genannt. Das Halbhydrat kommt in zwei Formen vor, die als  $\alpha$ - und  $\beta$ -Halbhydrat bezeichnet werden. Sie haben beide das gleiche Kristallgitter, unterscheiden sich nur in ihrer Ausbildung und sind daher keine polymorphen Modifikationen. Das gröber kristalline  $\alpha$ -Halbhydrat mit geringerem Wasseranspruch bildet sich beim Entwässern von Gips im Autoklaven, das  $\beta$ -Halbhydrat mit der wesentlich größeren massebezogenen Oberfläche und höherem Wasseranspruch durch „trockenes“ Entwässern in Drehöfen oder Kochern bei Temperaturen von 120 °C bis 180 °C [B 66, W 55, H 80, H 12, g 1].

Gips und  $\beta$ -Anhydrit kommen natürlich vor. Als Erstarrungsregler sind aber auch die bei verschiedenen industriellen Prozessen anfallenden Calciumsulfate verwendbar. Das betrifft insbesondere den Chemie-Gips, der bei der Gewinnung von Phosphorsäure aus Calciumphosphaten (Phosphat-Gips) oder bei der Gewinnung von Flußsäure aus Flußspat (Fluo-Gips) anfällt, außerdem den REA-Gips, d.h. Gips aus den Rauchgas-Entschwefelungs-Anlagen vor allem der Kraftwerke.

## 10. Zementzusatzmittel

Im Sinne der europäischen und deutschen Zementnorm sind Zementzusatzmittel Bestandteile, die zur Verbesserung der Herstellung oder der Eigenschaften von Zement verwendet werden, z.B. Mahlhilfsmittel. Die Gesamtmenge dieser Zusatzmittel sollte nicht größer als 1 M.-% sein. Sofern dieser Wert überschritten wird, ist der genaue Wert auf der Verpackung und/oder dem Lieferschein anzugeben. Diese Zusatzmittel dürfen nicht die Korrosion der Bewehrung fördern oder die Eigenschaften des Zements oder des mit dem Zement hergestellten Betons oder Mörtels nachteilig beeinflussen.

### 1.2.3 Zementarten der europäischen Zementnorm EN 197-1

Die europäische Zementnorm enthält nur Zemente, die allgemein verwendbar sind, aber keine Zemente mit Sondereigenschaften. Die Norm EN 197-1 [E 24] unterscheidet die folgenden fünf Hauptarten:

- CEM I    Portlandzement
- CEM II   Portlandkompositzement
- CEM III  Hochofenzement
- CEM IV   Puzzolanzement
- CEM V    Kompositzement

Die Unterteilung dieser fünf Hauptarten in insgesamt 27 Zementarten und deren Bezeichnung geht aus Tafel 1.1 hervor.

CEM I ist Portlandzement mit einem Anteil an Portlandzementklinker von mindestens 95 M.-%. Die Hauptart CEM II umfasst Zemente, die außer Klinker einen oder mehrere Hauptbestandteile mit einem Anteil zwischen 6 M.-% und 35 M.-% enthalten (Silicastaub bis höchstens 10 M.-%). Dieser Anteil ist noch einmal unterteilt bei 20 M.-%. Der Zement mit dem geringeren Anteil wird mit A, der Zement mit dem höheren Anteil mit B gekennzeichnet. CEM III ist die Bezeichnung für drei Arten von Hochofenzementen A, B und C mit Hüttensandgehalten zwischen 36 M.-% und 95 M.-% und Unterteilungen bei 65 M.-% und 80 M.-% Hüttensand. Als CEM IV werden zwei Arten (A und B) von Puzzolanzementen mit Puzzolangehalten zwischen 11 M.-% und 55 M.-% bezeichnet mit einer Unterteilung bei 35 M.-% Puzzolan. Diese Zemente müssen die Puzzolanprüfung bestehen (Abschnitt 4.4). CEM V sind Kompositzemente, die außer Zementklinker (K) 36 M.-% bis 80 M.-% Hüttensand (S) und/oder Puzzolan natürlicher (P) und/oder industrieller (Q) Herkunft und/oder siliciumdioxidreiche Flugasche (V) enthalten und bei 60 M.-% in A und B unterteilt sind.

### 1.2.4 Zementarten der deutschen Zementnorm DIN 1164-1

Die neue Fassung der DIN 1164-1 [D 45] enthält wesentliche Regelungen der europäischen Zementnorm EN 197-1 [E 24]. Von den insgesamt 27 Zementen der europäischen Norm wurden jedoch nur zwölf Zemente aufgenommen, die bisher schon in der DIN 1164 genormt oder seit langer Zeit bauaufsichtlich zugelassen waren. Als Grundsatz gilt nach wie vor, dass nur solche Zemente in die DIN 1164 aufgenommen werden können, die während einer längeren Bewährungsphase im Beton alle Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung und an die Dauerhaftigkeit (Frost, Carbonatisierung, Korrosionsschutz) auf gleichem Niveau erfüllt haben [V 48, S 189]. Dementsprechend wurden von den Haupt-

Tafel 1.1: Zementarten und Zusammensetzung nach EN 197-1 (Februar 2000) [E 24, S 189]

Zementart			Hauptbestandteile außer Klinker	
Hauptart	Benennung	Kurzzeichen	Art	Anteil in M -%
CEM I	Portlandzement	CEM I		0
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	Hüttensand (S)	6 ... 20
		CEM II/B-S		21 ... 35
	Portlandsilicastaubzement	CEM II/A-D	Silicastaub (D)	6 ... 10
	Portlandpuzzolanzement	CEM II/A-P	natürliches Puzzolan (P)	6 ... 20
		CEM II/B-P		21 ... 35
		CEM II/A-Q	industrielles Puzzolan (Q)	6 ... 20
	CEM II/B-Q	21 ... 35		
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	siliciumdioxidreiche Flugasche (V)	6 ... 20
		CEM II/B-V		21 ... 35
		CEM II/A-W	calciumoxidreiche Flugasche (W)	6 ... 20
CEM II/B-W	21 ... 35			
Portlandschieferzement	CEM II/A-T	gebrannter Schiefer (T)	6 ... 20	
	CEM II/B-T		21 ... 35	
Portlandkalksteinzement	CEM II/A-L	Kalkstein (L)	6 ... 20	
	CEM II/B-L		21 ... 35	
	CEM II/A-LL	Kalkstein (LL)	6 ... 20	
CEM II/B-LL	21 ... 35			
Portlandkompositzement	CEM II/A-M	alle (S, D, P, Q, V, W, T, L)	6 ... 20	
	CEM II/B-M		21 ... 35	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	Hüttensand (S)	36 ... 65
		CEM III/B		66 ... 80
		CEM III/C		81 ... 95
CEM IV	Puzzolanzement	CEM IV/A	Puzzolane (D, P, Q, V)	11 ... 35
		CEM IV/B		36 ... 55
CEM V	Kompositzement	CEM V/A	Hüttensand (S) und Puzzolane (P, Q, V)	18 ... 30
		CEM V/B		31 ... 50

bestandteilen der Zemente nach der europäischen Norm nicht berücksichtigt  
 Silicastaub (D),  
 industrielles Puzzolan (Q) und  
 calciumoxidreiche Flugasche (W).

Außerdem wurden die Zemente der Hauptarten CEM IV Puzzolanzement und CEM V Kompositzement nicht übernommen und anstelle der Portlandkompositzemente CEM II/A-M und CEM II/B-M der Portlandflugaschehüttenzement CEM II/B-SV aufgenommen. Die zwölf Zemente der neuen DIN 1164-1 sind in Tafel 1.2 zusammengestellt. Darin sind auch noch die Kurzzeichen der Zemente nach der alten DIN 1164 und der bisher bauaufsichtlich zugelassenen Zemente aufgeführt.

### 1.2.5 Anforderungen an die europäischen und deutschen Normzemente

#### 1. Festigkeit

Die in der europäischen Zementnorm festgelegten Festigkeitsklassen wurden ohne Änderung in die DIN 1164-1 übernommen. Die entsprechenden Grenzwerte und die Kennzeichnung der Festigkeitsklassen sind in Tafel 1.3 zusammengestellt.

Nach der Normfestigkeit nach 28 Tagen werden drei Festigkeitsklassen 32,5, 42,5 und 52,5 unterschieden. Die drei Klassen werden nach ihrer Anfangsfestigkeit nochmals unterteilt in üblich erhärtende (ohne Kennbuchstaben) und schnell erhärtende Zemente (Kennbuchstabe R = rapid). In den beiden letzten Spalten der Tafel 1.3 sind die Kennfarben der Zementsäcke und Silozettel nach DIN 1164-1 [D 45] angegeben.

## 2. Physikalische und chemische Anforderungen

Das Erstarren, geprüft nach DIN EN 196-3 [D 41], darf nach der europäischen Norm EN 197-1 [E 24] und nach der deutschen Norm DIN 1164-1 bei Zementen der Festigkeitsklassen 32,5 und 42,5 frühestens nach 60 min, bei Zementen der Festigkeitsklasse 52,5 frühestens nach 45 min beginnen. Festlegungen für das Erstarrungsende sind in der europäischen Norm nicht enthalten. In der deutschen Norm wurde eine obere Grenze von 12 h

Tafel 1.2: Zementarten und Zusammensetzung nach DIN 1164-1 (Oktober 1994) [D 45, S 189]

Zementart				Hauptbestandteile						Nebenbestandteile
Hauptart	Benennung	Kurzzeichen neu	Kurzzeichen alt	PZ-klinker	Hütten-sand	Natürliches Puzzolan	Si-reiche Flugasche	Gebrannter Schiefer	Kalkstein	
CEM I	Portlandzement	CEM I	PZ	95...100	-	-	-	-	-	0...5
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	EPZ	80... 94	6...20	-	-	-	-	0...5
		CEM II/B-S	EPZ	65... 79	21...35	-	-	-	-	0...5
	Portlandpuzzolan-zement	CEM II/A-P	TrZ	80... 94	-	6...20	-	-	-	0...5
		CEM II/B-P	TrZ	65... 79	-	21...35	-	-	-	0...5
	Portlandflugasche-zement	CEM II/A-V	FAZ	80... 94	-	-	6...20	-	-	0...5
	Portlandölschiefer-zement	CEM II/A-T	PÖZ	80... 94	-	-	-	6...20	-	0...5
		CEM II/B-T	PÖZ	65... 79	-	-	-	21...35	-	0...5
	Portlandkalkstein-zement	CEM II/A-L <sup>*)</sup>	PKZ	80... 94	-	-	-	-	6...20	0...5
Portlandflugaschehütten-zement	CEM II/B-SV	FAHZ	65... 79	10...20	-	10...20	-	-	-	
CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	HOZ	35... 64	36...65	-	-	-	-	0...5
		CEM III/B	HOZ	20... 34	66...80	-	-	-	-	0...5

<sup>\*)</sup> Chemische Anforderungen an den Kalkstein wie LL der europäischen Norm EN 197-1

Tafel 1.3: Festigkeitsklassen der Zemente nach ENV 197-1 (1994) und DIN 1164-1 (1994) und Kennfarben nach DIN 1164-1 (1994) [E 24, D 45, S 189].

Festigkeits- klasse	Druckfestigkeit N/mm <sup>2</sup>				Kenn- farbe	Farbe des Aufdrucks
	Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit			
	2 Tage min	7 Tage min	28 Tage min	28 Tage max		
32,5	-	16	32,5	52,5	hellbraun	schwarz
32,5 R	10	-				rot
42,5	10	-	42,5	62,5	grün	schwarz
42,5 R	20	-				rot
52,5	20	-	52,5	-	rot	schwarz
52,5 R	30	-				weiß

festgelegt, auf deren Prüfung jedoch verzichtet werden kann, wenn der Prüfwert für den Erstarrungsbeginn 6 h nicht überschreitet [S 189]. Das Maß für die Raumbeständigkeit ist die Dehnung bei der Le-Chatelier-Prüfung nach DIN EN 196-3 [D 41]; sie darf sowohl nach der europäischen als auch nach der neuen deutschen Zementnorm 10 mm nicht überschreiten.

Die chemischen Anforderungen, die Zemente sowohl nach der europäischen als auch nach der deutschen Norm erfüllen müssen, sind in Tafel 1.4 zusammengestellt. Die Werte beziehen sich auf die Probe im Anlieferungszustand.

Tafel 1.4: Chemische Anforderungen an die Zemente nach DIN 1164-1 (1994) [D 45, S 189]. Die Werte beziehen sich auf die Probe im Anlieferungszustand.

Eigenschaft	Prüfung nach	Zementart	Festigkeitsklasse	Anforderung in M.-%, max
Glühverlust	DIN EN 196-2	CEM I CEM III	alle	5,0
Unlöslicher Rückstand	DIN EN 196-2	CEM I CEM III	alle	5,0
Sulfatgehalt (als SO <sub>3</sub> )	DIN EN 196-2	CEM I CEM II <sup>1)</sup>	32,5 32,5 R 42,5	3,5
			42,5 R 52,5 52,5 R	4,0
		CEM III	alle	
Chloridgehalt	DIN EN 196-21	alle	alle	0,10

<sup>1)</sup> CEM II/B-T darf in allen Festigkeitsklassen bis 4,5 M-% SO<sub>3</sub> enthalten

### 3. Zemente mit Sondereigenschaften

Europäische Normen für Zemente mit Sondereigenschaften liegen noch nicht vor. Für die Neufassung der deutschen Zementnorm wurden daher die bisherigen Regelungen beibehalten. Außerdem wurden die Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt neu aufgenommen, für deren Verwendung bisher in Deutschland regional begrenzt Sonderregelungen bestanden [D 27].

Die DIN 1164-1 (1994) [D 45] enthält demnach folgende Zemente mit Sondereigenschaften:

- NW Zemente mit niedriger Hydratationswärme
- HS Zemente mit hohem Sulfatwiderstand
- NA Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt

Art der Zemente und Anforderungen gehen aus Tafel 1.5 hervor [S 189].

Tafel 1.5: Anforderungen an die Zemente mit Sondereigenschaften nach DIN 1164-1 (1994) [D 45, S 189, F 44]

Kennzeichnung des Zements	Eigenschaft	Zementart	Anforderung		
NW	Niedrige Hydratationswärme	alle	Lösungswärmeverfahren nach 7 Tagen	max	270 J/g
HS	Hoher Sulfatwiderstand	CEM I	C <sub>3</sub> A-Gehalt und Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> -Gehalt	max	3 M.-%
		CEM III/B	Hüttensandgehalt	max	5 M.-%
NA	Niedriger wirksamer Alkaligehalt	alle	Na <sub>2</sub> O-Äquivalent	min	66 M.-%
		CEM II/B-S		max	0,60 M.-%
		CEM III/A <sup>1)</sup>		max	0,70 M.-%
		CEM III/A <sup>2)</sup>		max	0,95 M.-%
		CEM III/B		max	1,10 M.-%
				max	2,00 M.-%

<sup>1)</sup> Bei Hüttensandgehalten bis 49 M.-%

<sup>2)</sup> Bei Hüttensandgehalten von mindestens 50 M.-%

#### 1.3 Zemente der ASTM-Normen

Allgemeine Bedeutung haben auch die ASTM-Normen der Vereinigten Staaten von Nordamerika. Sie enthalten Regelungen für folgende Zemente:

- Portlandzement nach ASTM C 150 [A 46]
- Mischzement mit festgelegter Zusammensetzung nach ASTM C 595M [A 60]
- Mischzement mit festgelegten Leistungsmerkmalen nach ASTM C 1157M [A 66]
- Quellzement nach ASTM C 845 [A 64]

Nach der in ASTM C 219 [A 49] genormten Terminologie in Bezug auf Zement ist Mischzement (englisch: blended hydraulic cement) ein durch gemeinsames Mahlen oder ge-

Tafel 1.6: Portlandzemente und Zemente aus mehreren Hauptbestandteilen nach ASTM C 150 und C 595

Mit Ausnahme der Portlandzemente IV und V können alle Zemente einen LP-Zusatz enthalten, gekennzeichnet durch A (air entrainment)

Es bedeuten RH hohe Anfangsfestigkeit (rapid hardening)  
 MS mittlerer Sulfatwiderstand (moderate sulfate resisting)  
 SR hoher Sulfatwiderstand (high sulfate resisting)  
 MH mittlere Hydratationswärme (moderate heat of hydration)  
 LH niedrige Hydratationswärme (low heat of hydration)

Portlandzement (P) nach ASTM C 150 Portland cement		Sorte	ASTM Type	Eigenschaften	
		P	I	normal	
		P MS	II	mittlerer Sulfatwiderstand	
		P MH	II	mittlere Hydratationswärme	
		P RH	III	hohe Anfangsfestigkeit	
		P LH	IV	niedrige Hydratationswärme	
		P SR	V	hoher Sulfatwiderstand	
Sorte	ASTM Type	Eigenschaften	Sorte	ASTM Type	Eigenschaften
Hüttensandhaltige Zemente nach ASTM C 595					
Portlandhüttenzement (PS) Slag-modified Portland cement			Hochofenzement (BLF) Portland blastfurnace slag cement		
PS	I SM	normal	BLF	I S	normal
PS MS	I SM (MS)	mittl. Sulfatwid.	BLF MS	I S (MS)	mittl. Sulfatwid.
PS MH	I SM (MH)	mittl. Hy. wärme	BLF MH	I S (MH)	mittl. Hy. wärme
Puzzolanhaltige Zemente nach ASTM C 595					
Portlandpuzzolanzement (PZ) Pozzolan-modified Portland cement			Puzzolanzement (POZ) Portland pozzolan cement		
PZ	I PM	normal	POZ	I P	normal
PZ MS	I PM (MS)	mittl. Sulfatwid.	POZ MS	I P (MS)	mittl. Sulfatwid.
PZ MH	I PM (MH)	mittl. Hy. wärme	POZ MH	I P (MH)	mittl. Hy. wärme

trenntes Mahlen und Mischen hergestellter Zement aus zwei oder mehreren anorganischen Stoffen, von denen mindestens einer nicht Portlandzement oder Zementklinker ist. Anstelle von „Mischzement“ ist demnach „Zement aus mehreren Hauptbestandteilen“ die korrekte Bezeichnung. In einer Anmerkung der ASTM C 595M [A 60] wird darauf hingewiesen, dass entsprechende Einrichtungen und Kontrollen erforderlich sind, um Homogenität und Gleichmäßigkeit dieser Zemente sicherzustellen.

Die Portlandzemente nach ASTM C 150 und die Zemente aus mehreren Hauptbestandteilen nach ASTM C 595 sind in Tafel 1.6 zusammengestellt. Mit Ausnahme der Zementarten P LH und P SR, entsprechend ASTM Type IV und V, können alle Zemente auch einen LP-Zusatz enthalten, gekennzeichnet durch A (air entrainment). Der Quellszement nach ASTM C 845 und weitere in den USA hergestellte Zemente werden in Abschnitt 9 beschrieben.

## 2 Geschichte des Zements

### 2.1 Stoffliche Grundlagen hydraulischer Bindemittel

Die Bezeichnung Zement geht auf die Römer zurück, die ein betonartiges Mauerwerk aus Bruchsteinen mit gebranntem Kalk als Bindemittel „opus caementitium“ nannten. Später wurden mit cementum, cimentum, cäment und cement die Zusatzstoffe, vulkanische Asche und Ziegelmehl, bezeichnet, die man dem gebrannten Kalk zusetzte, um ein hydraulisches Bindemittel zu erhalten [Q 1, h 1, d 2, 1 2].

Die Bedeutung des Tongehalts für die hydraulischen Eigenschaften des aus einem natürlichen Gemisch von Kalkstein und Ton hergestellten Wasserkalks wurde von dem Engländer John Smeaton (1724-1792) entdeckt, als er den Bau des Eddystone-Leuchtturms bei Plymouth vorbereitete und nach einem Bindemittel für einen wasserbeständigen Mörtel suchte. Sein Landsmann James Parker nannte 1796 den Romankalk, den er aus den Mergelnieren des Londoner Septarientones brannte, „Romancement“. Der Franzose Louis-Joseph Vicat (1786-1861) und der Deutsche Johann Friedrich John (1782-1847) fanden unabhängig voneinander, dass Gemische aus Kalkstein und 25 M.-% bis 30 M.-% Ton sich am besten zur Herstellung von hydraulischem Kalk eignen. Auch das Bindemittel, das Joseph Aspdin (1778-1855) durch Brennen einer künstlichen Mischung von Kalkstein und Ton herstellte und für das er 1824 unter der Bezeichnung „Portlandzement“ ein Patent erhielt, entsprach in seiner Zusammensetzung und in seinen Eigenschaften zunächst einem Romankalk, da es noch nicht bis zur Sinterung gebrannt war. Die daraus hergestellten künstlichen Steine glichen dem Portlandstein, einem oolithischen Kalkstein, der auf der Halbinsel Portland in der Grafschaft Dorsetshire an der Kanalküste abgebaut wird. Als William Aspdin, der Sohn von Joseph Aspdin, 1843 in einem in Rotherhithe bei London neu gegründeten Werk die Produktion von Portlandzement aufnahm, zeigte sich, insbesondere beim Bau des Parlamentsgebäudes in London, dass dieser dem „Romancement“ weit überlegen war. Das lag vor allem daran, dass ein beträchtlicher Anteil der Mischung beim Brennen gesintert worden war. Die Bedeutung des Sinterns hat anscheinend als erster Isaac Charles Johnson (1811-1911) im Jahr 1844 erkannt [Q 1, d 2, h 1].

Der erste deutsche Portlandzement nach englischem Vorbild wurde 1850 in Buxtehude hergestellt. Die Grundlage für die Herstellung des Portlandzements in Deutschland hat jedoch Hermann Bleibtreu (1824-1881) geschaffen, der auch zwei Zementwerke in Züllchow bei Stettin (1855) und in Oberkassel bei Bonn (1858) errichtete.

In Frankreich begann die Herstellung des Portlandzements um 1850, als man aus den gesinterten Rückständen, die beim Löschen von gebranntem Kalk anfielen, durch Zerkleinern zwischen Mühlsteinen ein langsam erstarrendes Bindemittel gewann.

In den USA wurde gesintertem Zementklinker zuerst von David Saylor um 1870 hergestellt, der zur Homogenisierung das Rohmaterial zerkleinerte und das Mehl zum Brennen zu Ziegeln verformte.

Entscheidenden Einfluss auf die weitere Entwicklung hatte Wilhelm Michaëlis (1840-1911). In seinem 1868 erschienenen Buch mit dem Titel „Die hydraulischen Mörtel“

machte er als erster genaue Angaben über die günstigste Zusammensetzung des Rohstoffgemisches. Informationen über die Kalkgrenze, d.h. über den höchstmöglichen CaO-Gehalt des Rohstoffgemisches, der beim Brennen an  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  und  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  gebunden werden kann, sowie über die Vorgänge beim Brennen und Kühlen des Zementklinkers ergaben erst die Untersuchungen der Brüder S.B. und W.B. Newberry (1897) [N 18] sowie von E. Wetzel (1911/1914) [W 37], E. Spohn (1932) [S 169], F.M. Lea und T.W. Parker (1935) [L 25] und H. Kühl (1936) [K 103].

## **2.2 Brennen des Zementklinkers**

Zum Brennen stand zunächst nur der periodisch arbeitende Schachtofen zur Verfügung. Der erste Schritt zum kontinuierlichen Betrieb war die Einführung des Ringofens nach Hoffmann. Aus dieser Zeit stammt auch die Bezeichnung „Zementklinker“, da das Brenngut für Schacht- und Ringofen zu Ziegeln verformt wurde, die dann ähnlich wie Mauerziegel gebrannt wurden. Der Zementdrehofen geht auf Patente des Engländers Frederick Ransome 1885/86 zurück. In Deutschland begannen die Brennversuche mit dem Drehofen 1897, zwei Jahre später wurde die betriebliche Klinkerproduktion aufgenommen [S 133, S 215]. In Deutschland wurde auch 1929 der erste Rostvorwärmerofen und 1950 der erste Zyklonvorwärmerofen in Betrieb genommen.

## **2.3 Zerkleinern von Rohstoff und Zement**

Zum Vorzerkleinern der harten Rohstoffe und des Klinkers verwendete man Backenbrecher, zum Schrotten Walzwerke und zum Feinmahlen Mahlgänge, die aus zwei aufeinander liegenden Mühlsteinen mit 0,8 m bis 1,5 m Durchmesser bestanden [S 133]. Das Mahlgut, durch ein zentrales Loch im oberen Stein aufgegeben, wurde im Spalt zwischen dem feststehenden oberen und dem über eine zentrale Welle angetriebenen unteren Stein zerkleinert.

Ziel der weiteren Entwicklung war es vor allem, die Mahlfeinheit zu erhöhen und die Durchsatzleistung zu steigern. Um die damals normgerechte Feinheit von max. 20 % R 0,2 mm zu erreichen, musste der Zement abgeseibt werden. Daher wurden die Mahlaggregate mit Siebeinrichtungen kombiniert, deren Nachteile der hohe Verschleiß und die geringe Durchsatzleistung waren. Einen wesentlichen Vorteil brachte daher 1889 die Einführung des Streuwindsichters.

Weitere Mahlaggregate waren u.a. der Kollergang zur Nassaufbereitung des Rohmaterials, verschiedene Bauarten der Wälzmühle und die aus den USA übernommene Fliehkraft-Pendelmühle zum Mahlen von Zement, die so genannte Griffin-Mühle. Der Kopf des Pendels, als Mahlwalze ausgebildet, lief in einem stählernen Mahlring um. Die Zerkleinerungswirkung wurde durch die Fliehkraft des rotierenden Pendels erzeugt [h 1].

Höhere Mahlfeinheiten bei ausreichenden Durchsatzleistungen ergaben sich vor allem durch die Rohrmühle, die 1892 in die deutsche Zementindustrie eingeführt wurde. Die ersten Rohrmühlen waren Einkammernmühlen mit 1,2 m Durchmesser und 5 m bis 6 m Länge. Sie leisteten etwa 3 t Zement je Stunde bei einer Feinheit von 15 % R 0,09 mm und einem spezifischen Arbeitsbedarf von 20 kWh/t. Bis 1920 hatte die Rohrmühle in ihren verschiedenen Varianten die anderen Mühlenbauarten sowohl auf der Rohstoff- als auch auf der Zementseite weitgehend verdrängt [S 133].