


A detailed microscopic view of concrete aggregate, showing various sized and colored particles (sand, gravel, and cement paste) embedded in a matrix. The particles are irregular in shape and color, ranging from light beige to dark grey and black. The background is a fine, greyish matrix.

Röhling | Eifert | Jablinski

Betonbau

Band 1

**Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit –
Frischbeton**

Fraunhofer IRB  Verlag

Stefan Röhling, Helmut Eifert, Manfred Jablinski

Betonbau

Band 1

Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton

Stefan Röhling, Helmut Eifert, Manfred Jablinski

Betonbau

Band 1

Zusammensetzung – Dauerhaftigkeit – Frischbeton

Fraunhofer IRB Verlag

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

ISBN: 978-3-8167-8644-3

ISBN (E-Book): 978-3-8167-8761-7

Herstellung: Dietmar Zimmermann

Layout: Daniela Heinemann

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Satz: Mediendesign Späth GmbH, Birenbach

Druck: Gulde-Druck, Tübingen

Für den Druck des Buches wurde chlor- und säurefreies Papier verwendet.

Alle Rechte vorbehalten

Dieses Werk ist einschließlich aller seiner Teile urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung, die über die engen Grenzen des Urheberrechtsgesetzes hinausgeht, ist ohne schriftliche Zustimmung des Fraunhofer IRB Verlages unzulässig und strafbar. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen sowie die Speicherung in elektronischen Systemen.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug genommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtlinien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Redaktionsschluss: 27.01.2012

© by Fraunhofer IRB Verlag, 2012
Fraunhofer-Informationszentrum
Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon (0711) 9 70-25 00
Telefax (0711) 9 70-25 08
E-Mail: irb@irb.fraunhofer.de
<http://www.baufachinformation.de>

Geleitwort für die Reihe »Betonbau«

In einem Zeitraum von nahezu 150 Jahren ist der Beton zu einem der wichtigsten Baustoffe geworden, mit dem heute sehr unterschiedliche und vielfältige Bauaufgaben erfüllt werden können und zu dem bei besonderen Anforderungen keine Alternative besteht.

Die günstige Formbarkeit und nahezu unbegrenzte Gestaltungsmöglichkeit von Betonbauwerken, die hohe Tragfähigkeit bei Druckbeanspruchung, der Verbund mit dem Betonstahl zur Aufnahme der Zugkräfte, der Widerstand bei chemischem Angriff und biogenen Belastungen, der Brandschutz der Stahlbetonkonstruktionen und die Möglichkeit der industriellen Herstellung von Beton und von Betonfertigteilen sowie weitere Vorzüge haben dazu geführt, dass in Verbindung mit dem großen Anwendungsumfang oft von einem Jahrhundertbaustoff gesprochen wird.

In den vergangenen zwei Jahrzehnten war der Betonbau geprägt durch eine Reihe von bedeutsamen Veränderungen und innovativen Entwicklungen. Diese betreffen die Ausgangsstoffe für den Beton, die Betontechnologie, die Eigenschaften und die Regelwerke zur Qualitätssicherung. Besonders faszinierend ist die enorme Steigerung der Festigkeit, die wie bei keinem anderen Baustoff erreicht werden konnte. In wenigen Jahrzehnten nahm die mittlere Druckfestigkeit von 30 N/mm^2 auf etwa 150 N/mm^2 zu und erreichte mit der Ultrahochfestigkeit noch darüber liegende Werte. Damit wurden Spannweiten, Bauhöhen von Gebäuden und eine Feingliedrigkeit der Konstruktionen realisierbar, an die vorher nur im Stahlbau gedacht werden konnte. Weitere Beispiele der Innovation sind die Verbesserung des Zugtragverhaltens durch die Zugabe von Fasern aus verschiedenen Werkstoffen (Stahl, Kunststoff, textile Gewebe), die Vergrößerung des Widerstandes gegen chemische Beanspruchungen und die Belastung durch Frost-Tauwechsel, die Erhöhung der Dichtigkeit gegenüber Wasser und umweltgefährdenden Stoffen sowie die Anwendung als Sichtbeton. Diese Entwicklungen wurden begünstigt durch die Bereitstellung von stark verflüssigenden Zusatzmitteln für die Verbesserung der Verarbeitung des Frischbetons und die Erhärtungsbeschleunigung sowie von neuen Zusatzstoffen, wie Mikro- und Nanosilika, Farbpigmenten und Polymeren. Erwähnenswert ist auch die breitere Anwendung bekannter puzzolanischer und latent-hydraulischer Zusatzstoffe, wie Flugasche und Hüttensand, für die Herstellung von Zementen und des Betons. Die Verwendung von Flugasche und Hüttensand in Zementen hat auch zur Reduzierung des Klinkeranteiles geführt, mit den vorteilhaften Auswirkungen auf den Energieeinsatz zur Zementherstellung und den Klimaschutz durch Verminderung des CO_2 -Ausstoßes.

Bei vielen Bauaufgaben müssen die für Beton charakteristischen Vorgänge bei der Hydratation und Erhärtung besonders berücksichtigt werden. Beispielsweise können durch das Abfließen der Hydratationswärme und die Austrocknung Spannungen entstehen, die durch Rissbildung Schäden verursachen, so dass die Gebrauchstauglichkeit nicht mehr gegeben sein kann. Diese zusätzlichen Beanspruchungen aus Zwang, Schwinden und Kriechen werden durch verschiedene Maßnahmen vermindert und nachteilige Auswirkungen durch eine entsprechende Mindestbewehrung verhindert.

Deutliche Fortschritte sind in der Verfolgung der Vorgänge in der Mikrostruktur des Zementsteines bei der Erhärtung, der Entwicklung der Eigenschaften und den vielfältigen Einwirkungen festzustellen. Aus der Tatsache heraus, dass alle vorteilhaften und nachtei-

ligen Eigenschaften ihre Ursache in der Entstehung und der Struktur des Zementsteines haben, wird mit großer Aufmerksamkeit der Einfluss der Erhärtungs- und Nutzungsbedingungen auf die Bildung und Veränderungen der Hydrate verfolgt. Deshalb ist verständlich, dass seit längerer Zeit versucht wird, direkte Beziehungen zwischen den Strukturgrößen und den makroskopischen Eigenschaften des Betons herzustellen.

Die komplizierten Zusammenhänge werden zunehmend mathematisch erfasst und in Computerprogramme integriert. Dadurch werden Möglichkeiten geschaffen, die bei bestimmten Zusammensetzungen zu erwartenden Eigenschaften sowie das Verhalten des Betons bei Beanspruchungen während der Erhärtung und der Nutzung zu prognostizieren. Nicht zu verkennen ist dabei, dass die mathematische Durchdringung der Vorgänge im Vergleich zur Bemessung im Beton- und Stahlbetonbau erst am Anfang steht.

Die aus Beton bestehenden Bauwerke verkörpern einen gewaltigen finanziellen und materiellen Aufwand. Unter diesem Gesichtspunkt besitzt die Dauerhaftigkeit und langfristige Sicherstellung der Gebrauchstauglichkeit eine herausragende Bedeutung. Im vergangenen Zeitraum wurde der Problematik ständig zunehmend Aufmerksamkeit gewidmet, da sich gezeigt hat, dass außerordentlich selten Baukonstruktionen infolge zu geringer Festigkeit versagen, sondern vergleichsweise häufiger infolge mangelhafter Dauerhaftigkeit und weiterhin, dass hohe Festigkeit nicht gleichbedeutend mit hoher Dauerhaftigkeit ist. Die daraus resultierenden Anforderungen reichen von der beanspruchungsgerechten Planung über die Auswahl der geeigneten Zusammensetzung sowie die sachgemäße Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons bis zur Instandhaltung der Betonbauwerke. Daraus resultiert zwangsläufig die Notwendigkeit eines engen Zusammenwirkens aller Beteiligten in der Bauvorbereitung und Baudurchführung.

Von Auswirkungen auf die Betonbauweise ist auch die Herausbildung der Europäischen Union mit der Harmonisierung der Regelwerke. Eine Vielzahl von Vorschriften wurde nach Einführung in den einzelnen Ländern bereits verbindlich, weitere sind in Vorbereitung oder liegen im Entwurf vor. Die Angleichung der deutschen Normen an ein in Europa neu gestaltetes und erweitertes Vorschriftenwerk ist ein Prozess, der auch zwangsläufig mit Änderungen in den fachlichen Auffassungen und den Gewohnheiten der Planungs- und Betoningenieure sowie der Auftraggeber und bauausführenden Unternehmen verbunden ist. Der große Umfang des Regelwerkes und anderer fachlicher Veröffentlichungen erschwert dem Einzelnen oft, den Überblick zu behalten und Neuerscheinungen einordnen zu können.

Trotz umfangreicher Erfahrungen im Umgang mit dem Baustoff Beton können Mängel und Schäden während der Baudurchführung und an fertiggestellten Bauwerken nicht ausgeschlossen werden. Die Ursachen liegen oft in der Unkenntnis der Regelwerke, mangelhaftem Wissen um die Besonderheiten der Bauweise, falsch verstandener Wirtschaftlichkeit und einer ungenügenden Qualitätskontrolle während der Baudurchführung. Nicht beachtet werden auch die Koordination der am Bau Beteiligten und die Weitergabe von technischen Informationen, beispielsweise aus der Tragwerksplanung an die Bauausführung. Voraussetzung für ein erfolgreiches Zusammenwirken der Partner ist nicht nur eine hinreichende Fachkenntnis des Einzelnen auf seinem eigenen Fachgebiet, sondern auch in den benachbarten Tätigkeitsbereichen, damit Anforderungen richtig formuliert und Probleme aus sich widersprechenden Festlegungen rechtzeitig erkannt werden können.

Der Inhalt der Reihe »Betonbau« mit der Aufteilung in drei Bände wurde unter den vorgenannten Gesichtspunkten ausgewählt und gestaltet. Autoren und Verlag möchten dazu beitragen, dass Architekten und Ingenieure bei auftretenden Fragen in der Bauplanung und Baudurchführung eine Antwort finden und darüber hinaus angeregt werden, sich mit einzelnen Sachverhalten weiter vertiefend zu beschäftigen. Gleichzeitig soll die Ausbildung der zukünftig im Betonbau arbeitenden Ingenieure unterstützt werden.

Vorwort zum Band 1

Im vorliegenden ersten Band der Reihe sind die wesentlichen Grundlagen des Betonbaues von der Planung bis zur Herstellung der Betonbauteile zusammengefasst. Charakteristisch ist, dass dabei Verweise auf ergänzende oder anwendungsorientierte Darstellungen in den beiden anderen Bänden aufgenommen worden sind.

Eine der Grundlagen bildet die Zusammensetzung, die Klassifizierung und die Dauerhaftigkeit des Betons in enger Verbindung mit dem Vorschriftenwerk. Dazu gehören die Ausgangsstoffe des Betons und deren Auswahl zur zielgerichteten Zusammensetzung, um den beanspruchungsbedingten Anforderungen zu entsprechen. Besonderes Augenmerk ist dabei auf die Bedingungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit gelegt worden.

Als eine weitere Grundlage ist der Schalungs- und Bewehrungsbaubau einschließlich der dafür verwendeten Bau- und Werkstoffe enthalten. Der Schwerpunkt liegt dabei nicht auf der Erläuterung der Schalungssysteme und einzelnen besonderen Ergebnissen des Schalungsbaues, sondern in der Darstellung der Wechselwirkungen zwischen Schalhaut- und Betonoberfläche, der Verwendung von Trennmitteln und der Erfassung des Frischbetondruckes. Einen wichtigen Aspekt bildet auch die Ermittlung des Ausschalzeitpunktes. Im gleichen Sinne ist der Bewehrungsbaubau auf die allgemeinen Konstruktionsregeln, den Bewehrungseinbau und die Bewehrungsabnahme konzentriert.

Weiterhin werden ausführlich die Herstellung, der Transport und der Einbau des Frischbetons behandelt und dabei wird besonderer Wert auf die Vorbereitung des Ablaufes der Betonarbeiten gelegt.

Schließlich wird der Inhalt vervollständigt durch die Beschreibung der Maßnahmen zur Qualitätssicherung, die die Nachweisführung der Betonarbeiten, die erforderlichen Prüfungen sowie die Bewertung und Auswertung von Prüfergebnissen umfassen.

Zum jeweiligen Gebiet werden die Vorschriften genannt. Wichtige Teile werden auszugsweise wiedergegeben. Die europäische Normung hat zu einer größeren Anzahl von zu beachtenden Vorschriften geführt, da auf nationale, ergänzende Anwendungsregeln noch nicht verzichtet werden kann. Die Literaturangaben ermöglichen, genannte Sachverhalte zu vertiefen und damit den Kenntnisstand zu erweitern. Dabei wurde darauf geachtet, die maßgebende internationale Fachliteratur einzubeziehen.

Die Darlegungen im Band 1 sind zwar vorrangig für die Bauvorbereitung und Bauausführung bestimmt, sollen aber darüber hinaus der Tragwerkplanung einen ausreichenden Überblick zu den Vorgaben für den Betonbau und deren Umsetzung in Konstruktion und Ausschreibung vermitteln.

Für die wertvollen Hinweise einer Reihe von Fachkollegen soll an dieser Stelle herzlich gedankt werden. Hervorzuheben ist die wertvolle Mitwirkung von Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Heinecke am Kapitel »Konstruktion und Einsatz von Schalungen« und von Herrn Dipl.-Ing. Wolfgang Bethge für die Arbeit am Kapitel »Qualitätssicherung«.

Die Autoren

1	Ausgangsstoffe für den Beton und Stahlbeton	17
1.1	Zement	17
1.1.1	Zementarten und Zusammensetzung der Zemente	18
1.1.2	Hauptbestandteile der Zemente	20
1.1.2.1	Portlandzementklinker (CEM I-Zemente)	20
1.1.2.2	Weitere Hauptbestandteile des Zements (CEM II bis CEM V-Zemente)	25
1.1.2.2.1	Hüttensand	25
1.1.2.2.2	Puzzolane (P, Q)	26
1.1.2.2.3	Gebrannter Schiefer (T)	26
1.1.2.2.4	Flugaschen (V, W)	26
1.1.2.2.5	Kalkstein (L, LL)	27
1.1.2.2.6	Silikastaub (D)	27
1.1.3	Zementklassen, bautechnische Eigenschaften und Anwendungsbereiche der Zemente	27
1.1.3.1	Normalzemente (Zemente mit Eigenschaften nach DIN EN 197)	27
1.1.3.1.1	Genormete bautechnische Eigenschaften der Zemente	28
1.1.3.1.2	Nicht genormte bautechnische Eigenschaften der Zemente	30
1.1.3.1.3	Anwendungsbereiche der Zemente	31
1.1.3.2	Sonderzemente (Zemente mit Eigenschaften nach DIN EN 197-1, DIN EN 14216 und DIN 1164)	35
1.1.3.3	Spezialzemente (Zemente mit definierten Eigenschaften innerhalb und außerhalb der Zementnormen)	38
1.1.4	Bezeichnung, Bestellung, Lieferung, Lagerung	41
1.1.5	Konformitätskontrolle, Rückstellproben	41
1.2	Gesteinskörnungen	42
1.2.1	Begriffe, Arten der Gesteinskörnungen, allgemeine Anforderungen	42
1.2.1.1	Normen für Gesteinskörnungen	43
1.2.1.2	Allgemeine Anforderungen	44
1.2.1.3	Arten von Gesteinskörnungen und deren Eignung für den Beton	44
1.2.1.3.1	Normale Gesteinskörnungen	44
1.2.1.3.2	Leichte Gesteinskörnungen	46
1.2.1.3.3	Schwere Gesteinskörnung und Gesteinskörnung für den Strahlenschutz	46
1.2.1.3.4	Rezyklierte Gesteinskörnung	46
1.2.2	Eigenschaften und Anforderungen an normale Gesteinskörnungen	46
1.2.2.1	Allgemeine Eigenschaften normaler Gesteinskörnungen	46
1.2.2.2	Geometrische Anforderungen	49
1.2.2.3	Wasseranspruch und Sieblinien der Gesteinskörnungen	57
1.2.2.3.1	Wasseranspruch	57
1.2.2.3.2	Lieferkörnungen	58
1.2.2.3.3	Sieblinien von Korngruppengemischen für Beton (Regelsieblinien)	59
1.2.2.3.4	Größtkorn	62
1.2.2.3.5	Mehlkorn	62
1.2.2.4	Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von Gesteinskörnungen	62
1.2.2.4.1	Frost- und Frost-Tausalzwerstand	63

1.2.2.4.2	Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen	65
1.2.2.4.3	Maßnahmen bei Einsatz von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen	68
1.2.2.5	Physikalische Anforderungen	70
1.2.2.6	Chemische Anforderungen	71
1.2.2.7	Übersicht der Anforderungskategorien und der Regelanforderungen	75
1.2.2.8	Der Einfluss der Gesteinskörnung auf den E-Modul und die Wärmedehnung	80
1.2.2.9	Konformitätsnachweis, CE-Kennzeichnung, Sortenverzeichnis, Lieferschein	80
1.2.3	Leichte Gesteinskörnungen	82
1.2.3.1	Arten von leichten Gesteinskörnungen	82
1.2.3.2	Beschreibung und Eigenschaften der wichtigsten leichten Gesteinskörnungen	84
1.2.3.3	Anforderungen an leichte Gesteinskörnungen	85
1.2.3.3.1	Physikalische Anforderungen an leichte Gesteinskörnungen	85
1.2.3.3.2	Anforderungen an die Dauerhaftigkeit von leichten Gesteinskörnungen	86
1.2.3.3.3	Regelanforderungen für leichte Gesteinskörnungen nach DIN EN 13055-1	86
1.2.3.3.4	Gesteinsabhängige Bedingungen für den Einsatz von leichten Gesteinskörnungen	88
1.2.3.4	Konformitätsnachweis, CE-Kennzeichnung, Sortenverzeichnis	88
1.2.4	Rezyklierte Gesteinskörnungen	90
1.2.4.1	Arten und Bestandteile von rezyklierten Gesteinskörnungen und Anforderungen an die Zusammensetzung	91
1.2.4.2	Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen	93
1.2.4.3	Bedingungen für den Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen im Beton	96
1.2.5	Restbetongesteinskörnung	98
1.2.6	Künstlich hergestellte Gesteinskörnungen	98
1.3	Betonzusatzstoffe	99
1.3.1	Arten und Wirkungsweise der Betonzusatzstoffe	99
1.3.2	Gesteinsmehle	100
1.3.3	Pigmente (Farbstoffe)	100
1.3.4	Latent-hydraulische Betonzusatzstoffe	101
1.3.5	Puzzolanische Zusatzstoffe	101
1.3.6	Mikrosilika (Silikastaub)	105
1.3.7	Wirksamkeit und Anrechenbarkeit von Zusatzstoffen	107
1.3.8	Fasern	108
1.3.9	Organische Zusatzstoffe (Polymere)	108
1.4	Betonzusatzmittel	110
1.4.1	Arten und Bedingungen für den Einsatz von Betonzusatzmitteln	110
1.4.2	Erstarrungsverzögerer (VZ) und Erstarrungsbeschleuniger (BE)	117
1.4.3	Fließmittel (FM) und Betonverflüssiger (BV)	120
1.4.4	Luftporenbildner (LP) und Einsatz von Mikrohohlkugeln (MHK)	122
1.4.5	Stabilisierer (ST) und Sedimentationsreduzierer (SR)	126
1.4.6	Einpresshilfen (EH)	126

1.4.7	Betondichtungsmittel (DM)	127
1.4.8	Chromatreduzierer (CR)	127
1.4.9	Recyclinghilfen (RH)	127
1.4.10	Schwindreduzierer und Quellmittel	127
1.4.11	Korrosionsinhibitoren	128
1.4.12	Multifunktionale Zusatzmittel	128
1.5	Zugabewasser	129
1.5.1	Allgemeine Anforderungen (Trinkwasser, Verwendung von in der Natur vorkommenden Wässern)	129
1.5.2	Restwasser	132
1.6	Bewehrungsstahl	135
1.6.1	Betonstahlsorten und -bezeichnungen	135
1.6.2	Kennwerte für die Bemessung	147
1.7	Literatur	160

2**Klassifizierung und Zusammensetzung des Betons****163**

2.1	Begriffe, Symbole, Bezeichnungen	163
2.2	Klassifizierung der Betone	165
2.2.1	Druckfestigkeitsklassen für Normal- und Schwerbeton	165
2.2.2	Druckfestigkeitsklassen für Leichtbeton	168
2.2.3	Rohdichteklassen für Leichtbeton	168
2.3	Gewährleistung der Dauerhaftigkeit des Betons und Stahlbetons	170
2.3.1	Einwirkungen auf den Bewehrungsstahl	170
2.3.1.1	Karbonatisierung der Betondeckung (XC)	170
2.3.1.2	Chloride aus Taumitteln und aus Meerwasser	172
2.3.2	Einwirkungen auf den Beton	175
2.3.2.1	Frost- oder Frost-Tausalz-Angriffe (XF)	175
2.3.2.2	Chemische Angriffe (XA)	176
2.3.2.3	Verschleißbeanspruchung (XM)	180
2.3.2.4	Betonkorrosion durch Alkali-Kieselsäure-Reaktion	181
2.3.2.5	Mikrobiologische Betonkorrosion	183
2.4	Zusammensetzung des Betons	183
2.4.1	Randbedingungen für den Entwurf der Betonzusammensetzung	185
2.4.2	Vorberechnung der Betondruckfestigkeit	193
2.4.3	Mischungsentwurf	197
2.4.4	Erst- und Konformitätsprüfung	199
2.5	Literatur	201

3**Herstellung und Verarbeitung des Frischbetons****203**

3.1	Klassifizierung und Prüfung der Eigenschaften	203
3.1.1	Konsistenzklassen des Frischbetons	203

3.1.2	Probenahme zur Prüfung der Eigenschaften	208
3.1.3	Konsistenz	209
3.1.4	Rohdichte	216
3.1.5	Wassergehalt	217
3.1.6	Luftgehalt	217
3.1.7	Temperatur	219
3.2	Herstellen und Liefern des Frischbetons	221
3.2.1	Transportbeton und Baustellenbeton	221
3.2.2	Herstellen von Frischbeton	222
3.2.2.1	Anlieferung der Betonbestandteile	223
3.2.2.2	Abmessen (Dosieren) der Betonbestandteile	223
3.2.2.3	Transportieren, Umschlagen und Lagern der Betonbestandteile	224
3.2.2.4	Mischen des Frischbetons	226
3.2.2.5	Kontrolle und Überwachung der Herstellung und Lieferung von Transportbeton	231
3.2.2.6	Unterlagen der Herstellung und Lieferung von Transportbeton	231
3.2.3	Transport des Frischbetons	233
3.2.4	Bestellung und Abnahme von Transportbeton, Identitätsprüfung	237
3.2.4.1	Bestellung und Betonierplan	238
3.2.4.2	Abnahme von Transportbeton	241
3.2.5	Verwendung von Restbeton	244
3.3	Förderung des Frischbetons zur Einbaustelle	245
3.3.1	Rohrförderung	246
3.3.1.1	Pumpfähigkeit von Frischbeton	246
3.3.1.2	Einflüsse der Betonbestandteile	249
3.3.1.3	Betonpumpen und Verteilermaste	251
3.3.1.4	Rohrsortiment und Zubehör	256
3.3.1.5	Einsatzbedingungen für Autobetonpumpen und Arbeitssicherheit	257
3.3.2	Förderung mit Kran und Kübel	258
3.3.3	Bandförderung	260
3.3.4	Direkteinbau	261
3.3.5	Sonstige Methoden der Frischbetonförderung	261
3.4	Einbringen und Verdichten des Frischbetons	262
3.4.1	Vorbereitung des Betonierens und Betonierplan	262
3.4.2	Einbringen und Verteilen des Frischbetons	267
3.4.3	Verdichten des Frischbetons	268
3.4.3.1	Direktes Eintragen äußerer Kräfte	269
3.4.3.2	Verringerung der inneren Reibung	269
3.4.3.3	Stoffliche Bedingungen für das Verdichten	276
3.4.3.4	Nachverdichten des Betons	278
3.4.4	Oberflächenbearbeitung	278
3.4.5	Vorschriften zum Verdichten von Frischbeton	279
3.5	Literatur	280

4	Schalungs- und Bewehrungsbau	283
4.1	Konstruktion und Einsatz von Schalungen	283
4.1.1	Grundlagen des Schalungsbaues	283
4.1.2	Trennmittel	286
4.1.2.1	Anforderungen an Trennmittel	286
4.1.2.2	Auswahl von Trennmitteln	287
4.1.2.3	Anwendung der Trennmittel	289
4.1.3	Schalungshaut	290
4.1.3.1	Aufgaben und Eigenschaften der Schalungshaut	290
4.1.3.2	Saugverhalten	291
4.1.3.3	Oberflächentextur (Struktur der Oberfläche, Rauigkeit der Schalungshaut)	294
4.1.3.4	Holz als Schalungshaut	295
4.1.3.4.1	Wechselwirkung zwischen Holz und Frischbeton	295
4.1.3.4.2	Holzoberflächen der Schalungshaut	296
4.1.3.4.3	Fugenausbildung bei Brettern und Brettplatten	297
4.1.3.5	Schalungshautplatten	297
4.1.3.5.1	Auswahl der Schalungshautplatten	297
4.1.3.5.2	Grundtypen der Schalungshautplatten	297
4.1.4	Schalungsplanung	300
4.1.5	Belastung und Tragfähigkeit der Schalung	301
4.1.5.1	Begriffe nach DIN 18218	302
4.1.5.2	Ermittlung des Frischbetondruckes für lotrechte Schalungen	302
4.1.5.3	Berechnungsbeispiele zum Frischbetondruck für lotrechte Schalungen	304
4.1.5.4	Hinweise für die Anwendung in der Praxis	308
4.1.5.5	Frischbetondruck auf geneigte Schalungen	309
4.1.5.6	Belastung horizontaler Schalungen (Deckenschalungen)	312
4.1.6	Ausschalen und Ausrüsten	314
4.1.6.1	Anforderungen an das Ausschalen und das Ausrüsten	314
4.1.6.2	Hinweise zum Einsatz von Hilfsstützen	315
4.1.6.3	Beispiele für die Ermittlung des Ausschalzeitpunktes bzw. erforderlicher Unterstützungen	316
4.2	Bewehren von Stahlbetontragwerken	319
4.2.1	Allgemeine Bewehrungs- und -konstruktionsregeln	319
4.2.2	Allgemeine Anforderungen an Bewehrungen auf der Baustelle	321
4.2.3	Biegen, Transport und Lagerung auf der Baustelle	321
4.2.4	Schweißen von Bewehrungen	321
4.2.5	Einbau der Bewehrung	321
4.2.6	Abnahme der Bewehrung	324
4.3	Literatur	325

5**Betone mit besonderen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit der Bauteile****327**

5.1	Korrosionsschutz der Bewehrung	327
5.1.1	Karbonatisierung des Zementsteins	328
5.1.1.1	Mechanismus der chemischen Reaktion	328
5.1.1.2	Karbonatisierungsbedingte Gefügeänderungen	328
5.1.1.3	Entwicklung der Karbonatisierungstiefe	329
5.1.1.4	Karbonatisierung, Depassivierung und Korrosionsgefahr	333
5.1.1.5	Nachweis des Karbonatisierungsfortschrittes	335
5.1.1.6	Sauerstoffkorrosion der Bewehrung	336
5.1.2	Chloride im Beton	338
5.1.2.1	Chlorideintrag in den Beton	338
5.1.2.2	Vordringen der Chloridfront im Bauteil	339
5.1.2.3	Korrosionsauslösende Chloridkonzentrationen	341
5.1.2.4	Chloridkorrosion der Bewehrung	341
5.1.2.5	Maßnahmen zur Überwachung der Korrosionsvorgänge in Stahlbetonbauteilen	342
5.1.3	Betondeckung der Bewehrungsstähe	344
5.1.3.1	Maße der Betondeckung	344
5.1.3.2	Nachweis der Betondeckung am Bauwerk	348
5.2	Betone mit hohem chemischen Widerstand	351
5.2.1	Einwirkungen betonangreifender Stoffe	351
5.2.2	Angriffsgrade auf Beton und Stahlbeton	352
5.2.3	Betontechnische und konstruktive Maßnahmen	352
5.2.4	Maßnahmen bei starkem chemischen Angriff	354
5.2.5	Auswirkungen auf die Umwelt	354
5.3	Betone mit hohem Frost- (FW) und Frost-Tausalz-Widerstand (FTW)	354
5.3.1	Schädigungsmechanismus beim Frost- und Frost-Tausalz-Angriff	356
5.3.1.1	Schadensarten	356
5.3.1.2	Einflüsse auf den Frostwiderstand	358
5.3.1.3	Schädigungsmechanismen	360
5.3.2	Einflussgrößen auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton	362
5.3.2.1	Anforderungen an die Betonbestandteile	363
5.3.2.2	Anforderungen an die Zusammensetzung, Herstellung und Verarbeitung frost- und frost-tausalz-beständiger Betone	368
5.3.2.3	Herstellung frostbeständiger und frost-tausalzbeständiger Betone	370
5.3.2.3.1	Deskriptives Konzept und Performancekonzept	370
5.3.2.3.2	DIN EN 206-1 und DIN 1045 und Expositionsclassen	371
5.3.2.3.3	Beton für Verkehrsbauten (ZTV-Ing)	372
5.3.2.3.4	Beton für Wasserbauten (ZTV-Wasserbau, Leistungsbereich 215 [5.50])	374
5.3.2.3.5	Expositionsclassen für Eisenbahnbrücken	376
5.3.2.3.6	Beton für Fahrbahndecken	376
5.3.2.3.7	Massige Bauteile aus Beton	378
5.3.2.3.8	Betonsteinpflaster und Bordsteine aus Beton	378

5.3.3	Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Widerstandes und des Frost-Taumittel-Widerstandes	378
5.3.3.1	Prüfverfahren der Vornorm DIN CEN/TS 12390-9	379
5.3.3.2	Prüfung der inneren Schädigung	385
5.3.3.3	CIF-Test	386
5.3.3.4	Andere besondere Bestimmungen (Länderregelungen)	386
5.3.3.5	Zuordnung der Expositionsclassen zu den Prüfverfahren [5.69]	391
5.3.3.6	Vergleichbarkeit und Übertragbarkeit der Prüfverfahren	392
5.3.4	Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Sonderbetonen	394
5.3.4.1	Hochfeste Betone	394
5.3.4.2	Betone in der Expositionsclassenklasse XF4 ohne Luftporen	394
5.4	Betone mit hohem Verschleißwiderstand	395
5.4.1	Stoffliche Anforderungen an Betone mit hohem Verschleißwiderstand	395
5.4.2	Technologische Anforderungen	400
5.4.3	Prüfverfahren und Verschleißwiderstandsklassen	401
5.5	Maßnahmen gegen schädigende Reaktionen im Beton	403
5.5.1	Sulfateinwirkungen auf erhärtetem Beton	404
5.5.2	Alkali-Gesteinskörnungs-Reaktion im Beton	405
5.5.2.1	Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton	405
5.5.2.2	Alkali-Carbonat-Reaktion	407
5.6	Literatur	408

6**Qualitätsüberwachung und Konformitätskontrolle****413**

6.1	Normative Regelungen und Einrichtungen für die Überwachung	413
6.1.1	Gesetzliche Regelungen	413
6.1.2	Überwachung der Betonherstellung	415
6.1.2.1	Eigenüberwachung der Betonherstellung	415
6.1.2.2	Anerkannte Überwachungsstelle und Zertifizierungsstelle	415
6.1.3	Überwachung der Betonarbeiten	415
6.1.3.1	Ständige Betonprüfstelle	415
6.1.3.2	Anerkannte Überwachungsstelle	416
6.2	Überwachungsklassen	417
6.3	Überwachungstätigkeiten, Prüfungen im Rahmen der Überwachung	418
6.3.1	Angaben zum Beton	418
6.3.2	Überwachungsklassen 1	419
6.3.3	Überwachungsklassen 2 und 3	419
6.3.4	Überwachung der Bewehrungsarbeiten	420
6.3.4.1	Anforderungen an die Überwachung gemäß DIN 1045-3	420
6.3.4.2	DAfStb-Richtlinie »Qualität der Bewehrung – Ergänzende Festlegungen zur Weiterverarbeitung von Betonstahl und zum Einbau der Bewehrung«	421
6.3.5	Überwachung der Schalarbeiten	422
6.3.6	Überwachung des Vorspannens	422

6.3.7	Überwachung der Verpressarbeiten	422
6.3.8	Überwachung der Spritzbetonarbeiten	423
6.3.9	Eisenbahnspezifische Besonderheiten der Qualitätskontrolle	423
6.4	Nachweis der Einhaltung der Festigkeitskennwerte und statistische Grundlagen der Qualitätssicherung	423
6.5	Kriterien der Qualitätsprüfungen des Betons (Konformitäts- und Identitätsprüfungen)	427
6.5.1	Qualitätsprüfungen des Herstellers, Prüfung der Konformität und Konformitätskriterien	427
6.5.1.1	Konformitätskriterien der Betondruckfestigkeit	428
6.5.1.2	Konformitätskriterien für Betonfamilien	429
6.5.1.3	Konformitätskriterien für die Spaltzugfestigkeit	431
6.5.1.4	Konformitätskriterien für andere Eigenschaften als die Druckfestigkeit	431
6.5.1.5	Konformitätskontrolle für Beton nach Zusammensetzung	432
6.5.2	Qualitätsprüfungen der Baustelle, Identitätsprüfung bzw. Annahmeprüfung und Identitätskriterien	432
6.5.3	Beziehung zwischen dem Konformitätsnachweis und der Identitätsprüfung	433
6.5.4	Sonderregelungen zum Prüfalter	434
6.6	Maßnahmen bei Nichtkonformität des Betons	434
6.7	Literatur	435

7

Zusammenstellung der Normen, Vornormen und Normentwürfe 437

7.1	Normen für die Betonausgangsstoffe	437
7.1.1	Zement	437
7.1.2	Gesteinskörnungen	437
7.1.3	Wasser und Betonzusätze	437
7.1.4	Betonstahl	438
7.2	Normen für Beton, Stahlbeton und Spannbeton	438
7.3	Richtlinien, zusätzliche Vorschriften	439
7.4	Prüfnormen und Prüfvorschriften	440
7.4.1	Zement	440
7.4.2	Gesteinskörnungen	440
7.4.3	Betonzusätze und Betonstahl	442
7.4.4	Frischbeton	442
7.4.5	Festbeton, Faserbeton, Beton in Bauwerken	443
7.5	Sonstige Normen	444

1 Ausgangsstoffe für den Beton und Stahlbeton

Der Baustoff Beton besteht hauptsächlich aus Zement als Bindemittel, Gesteinskörnungen und Anmachwasser, die die Grundstoffe darstellen und das sogenannte Drei-Stoff-System bilden. Zur Verbesserung oder Erzielung bestimmter Eigenschaften des Frisch- bzw. Festbetons können Zusatzmittel und Zusatzstoffe hinzugefügt werden. Daraus entsteht dann die heute oft als Fünf-Stoff-System bezeichnete Zusammensetzung.

Als Ausgangsstoffe für die Betonherstellung dürfen nur solche verwendet werden, deren Eignung nachgewiesen und deren Qualität durch den Hersteller bestätigt worden ist. Die maßgebenden Regelungen sind in DIN 1045, DIN EN 206-1 und den zugehörigen Stoffnormen enthalten. Durch Kontrolle bei der Anlieferung ist sicherzustellen, dass für die Betonbereitung die bestellten Produkte zur Verfügung stehen. Bis zur Verarbeitung sind die Materialien so zu lagern, dass keine Beeinträchtigung der Qualität eintreten kann.

Die Verwendung von Baustoffen, die für den Beton- und Stahlbetonbau vorgesehen sind, aber von den Festlegungen der DIN 1045 und DIN EN 206-1 abweichen, bedarf nach den bauaufsichtlichen Vorschriften der Zustimmung der zuständigen obersten Bauaufsichtsbehörde oder der von ihr beauftragten Behörde, sofern nicht eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung erteilt ist.

Gemeinsam mit dem Betonstahl bildet der Beton den Verbundwerkstoff Stahlbeton, der durch das Zusammenwirken die Aufnahme von Schnittkräften, die zu Zugspannungen im Querschnitt führen, ermöglicht. Sämtliche Stoffe, die für die Herstellung des Stahlbetons verwendet werden, dürfen weder den Verbund zwischen dem Bewehrungsstahl und Beton stören, noch eine Korrosion des Betonstahles hervorrufen oder fördern.

Die Auswahl der Ausgangsstoffe muss unter dem Gesichtspunkt der Beanspruchungen und der Dauerhaftigkeit der Betonbauwerke vorgenommen werden. Bei Einwirkungen von chemischen Stoffen oder der Witterung ist besondere Sorgfalt erforderlich.

1.1 Zement

Zement ist ein hydraulisches Bindemittel, das durch chemische Reaktionen mit dem Anmachwasser erhärtet. Das Gemisch aus Zement und Anmachwasser wird allgemein als Zementleim bezeichnet. Die Reaktion des Zementleims kann dabei sowohl bei Luftlagerung als auch unter Wasser stattfinden. Der entstehende Zementstein ist wasserfest und raumbeständig.

Der gesamte Vorgang der Umsetzung der Zemente und der Bildung des Zementsteins wird als Hydratation bezeichnet und umfasst alle Veränderungen des angemachten Zementleims vom Ansteifen und Erstarren bis zur vollständigen Erhärtung.

Die bautechnischen Eigenschaften der Zemente und die Vorgänge während der Erhärtung bestimmen die Anwendbarkeit, das Verhalten und die Dauerhaftigkeit des Betons in entscheidendem Maße [1.1].

In Betonen dürfen sowohl Normalzemente (Zemente nach DIN EN 197, Teile 1 und 2; auf DIN EN 197 bezogene bauaufsichtlich zugelassene Zemente) oder Sonderzemente mit zusätzlichen bzw. besonderen Eigenschaften, z. B. nach DIN EN 14216 oder DIN 1164, Teile 10-12 verwendet werden.

Neben den Normal- und Sonderzementen gibt es zudem noch Spezialzemente, die für solche Anwendungsgebiete bereitgestellt werden, für die die Normzemente nicht oder weniger geeignet sind.

1.1.1 Zementarten und Zusammensetzung der Zemente

Nach DIN EN 197-1 werden folgende Hauptzementarten unterschieden:

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

In Tabelle 1.1 sind die Zementarten mit ihren Bestandteilen zusammengefasst.

Hauptbestandteile der Zemente nach DIN EN 197-1 sind Portlandzementklinker (K), Hütensand (S), natürliche Puzzolane (P), thermisch behandelte Puzzolane (Q), kieselsäurereiche Flugasche (V), kalkreiche Flugasche (W), gebrannter Schiefer (T), Kalkstein (L, LL) und Silicastaub (D), die bei der Zementherstellung getrennt oder mit dem Klinker zusammen vermahlen werden.

Die hydraulischen Eigenschaften der Bestandteile und damit des daraus hergestellten Zements sind sehr unterschiedlich und bei der Anwendung zu beachten.

Entsprechend der Zugabemenge und Art der Hauptbestandteile werden 27 Zementarten unterschieden, die einschließlich Benennung und Bezeichnung in nachfolgender Tabelle 1.1 zusammengestellt sind.

In der Benennung geben A, B und C unterschiedliche Mengen der Hauptbestandteile an. Sind neben dem Portlandzementklinker mehrere unterschiedliche Hauptbestandteile in der jeweiligen Zementart möglich, werden die konkreten Hauptbestandteile nach einem Bindestrich oder in Klammern durch ihre Kurzbezeichnung angegeben.

Im Zement können bis zu 5 Masse-% Nebenbestandteile enthalten sein. Dazu gehören aufbereitete Füller, das sind anorganische, natürliche oder künstliche mineralische Stoffe, die überwiegend nur physikalisch wirken. Aufgrund der Kornverteilung der Füller werden das Wasserrückhaltevermögen der Zemente und die Verarbeitbarkeit sowie andere Eigenschaften verbessert. Weiterhin können Mahlhilfsmittel verwendet werden.

Die Erstarrung der Zemente wird durch Erstarrungsregler (Kalziumsulfat in Form von Gips, Halbhydrat und/oder Anhydrit) gezielt beeinflusst.

Zementart			Hauptbestandteile neben Portlandzementklinker ³⁾	
Hauptart	Benennung	Kurzzeichen	Art	Anteil [M.-%]
CEM I	Portlandzement	CEM I	–	0
CEM II	Portlandhüttenzement	CEM II/A-S	Hüttsand (S)	6 ... 20
		CEM II/B-S		21 ... 35
	Portlandsilikastaubzement	CEM II/A-D	Silikastaub (D)	6 ... 10
	Portlandpuzzolanazement	CEM II/A-P	natürliches Puzzolan (P)	6 ... 20
		CEM II/B-P		21 ... 35
		CEM II/A-Q	künstliches Puzzolan (Q)	6 ... 20
		CEM II/B-Q		21 ... 35
	Portlandflugaschezement	CEM II/A-V	kieselsäurereiche Flugasche (V)	6 ... 20
		CEM II/B-V		21 ... 35
		CEM II/A-W	kalkreiche 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 ¹⁾²⁾	CEM II/A-M	alle Hauptbestandteile sind möglich, jedoch mindestens 2 (S, D, P, Q, V, W, T, L, LL)	6 ... 20
		CEM II/B-M		21 ... 35
	CEM III	Hochofenzement	CEM III/A	Hüttsand (S)
CEM III/B			66 ... 80	
CEM III/C			81 ... 95	
CEM IV ¹⁾²⁾	Puzzolanazement	CEM IV/A	Puzzolane (D, P, Q, V, W)	11 ... 35
		CEM IV/B		36 ... 55

Tabelle 1.1 Arten, Bezeichnung und Bestandteile der Zemente nach DIN EN 197-1

Zementart			Hauptbestandteile neben Portlandzementklinker ³⁾	
Hauptart	Benennung	Kurzzeichen	Art	Anteil [M.-%]
CEM V ²⁾	Kompositzement	CEM V/A	Hüttensand (S)	18 ... 30
			Puzzolane (P, Q, V)	18 ... 30
		CEM V/B	Portlandzementklinker	20 ... 38
			Hüttensand (S)	31 ... 50
			Puzzolane (P, Q, V)	31 ... 50

¹⁾ der Anteil von Silikastaub ist auf 10 M.-% begrenzt

²⁾ in Portlandkompositzementen, Puzzolanzementen und Kompositzementen müssen alle Hauptbestandteile außer Portlandzementklinker in der Bezeichnung angegeben werden; die Angaben in M.-% gelten für die Summe der Hauptbestandteile außer Portlandzementklinker

³⁾ gilt nicht für CEM V/B

Tabelle 1.1 Arten, Bezeichnung und Bestandteile der Zemente nach DIN EN 197-1

1.1.2 Hauptbestandteile der Zemente

Hauptbestandteile der Zemente können Portlandzementklinker, latent hydraulische, puzzolanische und inerte Bestandteile in unterschiedlichen Kombinationen sein. Normalzemente haben immer einen Anteil an Portlandzementklinker.

1.1.2.1 Portlandzementklinker (CEM I-Zemente)

Grundlage der Herstellung des Portlandzementklinkers ist im Wesentlichen eine Mischung aus Kalkstein und Ton sowie Korrekturstoffen (z. B. Quarzsand, Eisenerz), die im Drehrohfen bis auf etwa 1450 °C erhitzt wird. Aus den oxidischen Bestandteilen der Ausgangsstoffe (Kalziumoxid CaO (C), Siliziumdioxid SiO₂ (S), Aluminiumoxid Al₂O₃ (A) und Eisenoxid Fe₂O₃ (F)) werden dabei durch Sinterung die Klinkerphasen Trikalziumsilikat (C₃S), Dikalziumsilikat (C₂S), Trikalziumaluminat (C₃A) und Kalziumaluminatferrit (C₄AF) sowie eine Restschmelze gebildet. Durch die anschließende schnelle Abkühlung wird die erreichte chemische Zusammensetzung »eingefroren«. Mikroskopische Aufnahmen zeigen, dass die verschiedenen Klinkerphasen miteinander verwachsen sind und die silikatischen Bestandteile C₃S und C₂S in eine Grundmasse aus dem Aluminat, Ferrit und Restschmelze eingebettet sind (siehe dazu Bd. 2 Abschnitt 1.1.1 und Bd. 2 Bild 1.1).

Durch Mahlen des knollenförmigen, stückigen Portlandzementklinkers und Fraktionierung wird der eigentliche Zement mit einem Körnungsband kleiner 100 µm und einer spezifischen Oberfläche von 2500 bis 6000 cm²/g hergestellt (Bd. 2 Abschnitt 1.1.3). Die Mahlfineinheit beeinflusst die Reaktionsgeschwindigkeit des Zements. Je größer die spezifische Oberfläche ist, desto schneller laufen die Hydratation und die Festigkeitsentwicklung ab (Bd. 2 Abschnitt 1.2.3). Frühhochfeste Zemente besitzen deshalb neben einer geeigneten Zusammensetzung eine entsprechend größere Mahlfineinheit.

Um ein frühzeitiges Erstarren des Zementleims zu verhindern, wird während des Mahlvorganges Gips/Anhydrit zugesetzt, dessen Anteil auf 5 % begrenzt ist. Die als Mahlhilfen verwendeten Zusätze dürfen den Anteil von 1 Masse-% nicht überschreiten.

Im technischen Klinker liegen die einzelnen Mineralien in verschiedenen Modifikationen (z. B. α -, β - und γ - C_2S) vor, sind als Mischkristalle (z. B. Reihe $C_2F-C_6A_2F$) vorhanden und enthalten die Nebenbestandteile (z. B. K_2O , Na_2O) in festen Lösungen oder als Sulfat an den Zementkornoberflächen. Stellvertretend für diese tatsächliche Zusammensetzung des Zementklinkers stehen vereinfachend die Klinkerphasen C_3S , C_2S , C_3A und C_4AF , die eine hohe Bildungswahrscheinlichkeit aufweisen. Da es sich nicht um reine Klinkerminerale handelt, werden zur Charakterisierung die Bezeichnungen Alit (für C_3S) und Belit (für C_2S) sowie Aluminat und Aluminatferrit verwendet. Bei der Berechnung des Phasenbestandes des Zementklinkers wird in der Regel von der Stöchiometrie der reinen Klinkerminerale ausgegangen.

Neben den vier Hauptklinkermineralien können noch Freikalk (CaO_{frei}) und Periklas (MgO_{frei}) enthalten sein. Diese Bestandteile treten in Abhängigkeit von der Art und Zusammensetzung der Roh- und Brennstoffe sowie dem Ablauf des Brenn- und Kühlprozesses auf. Freikalk wird auf weniger als 2 Masse-% begrenzt, um das schädliche Kalktreiben zu verhindern und die Raumbeständigkeit sicherzustellen. Periklas entsteht bei MgO -Gehalten größer 2 Masse-% und kann bei MgO -reichen Klinkern unter Bildung von Magnesiumhydroxid zu Treiberscheinungen führen. Deshalb wird der zulässige Anteil auf maximal 5 Masse-%, bezogen auf die Klinkermasse, begrenzt.

Über die Rohstoffe und z.T. durch den Brennprozess gelangen weitere Nebenelemente (Mn, Na, K, S u. a.) in den Zementklinker, die zwar nur einen geringen Anteil besitzen aber das Hydratationsverhalten des Zements deutlich beeinflussen können. Hervorzuheben sind dabei die Alkalien (Anteile im Zement: 0,1 bis 1,0 % K_2O ; 0,1 bis 0,8 % Na_2O), die in die silikatischen Phasen eingebaut werden oder selbstständige Alkalisulfate bilden. Sulfatisch gebundene Alkalien heben die Anfangsfestigkeit etwas an und beeinflussen den Hydratationsverlauf. Bedeutsamer ist aber das Alkalitreiben, das durch alkalireiche Zemente und alkaliempfindliche Gesteinskörnungen hervorgerufen werden kann. Zur Vermeidung sind deshalb Grenzwerte vorgeschrieben (Abschnitt 5.5.2).

Spurenelemente (Pb, Cr, Ni, V, Zn u. a.) verändern die Eigenschaften des Klinkers nur unerheblich, sind aber für den Herstellungsprozess und die Umweltbelastung von Bedeutung. Schwermetalle, wie z. B. Chrom, können für den Menschen gesundheitsgefährdend sein und werden deshalb ständig vermindert oder während der Erhärtung in neutrale Verbindungen umgewandelt. Die Spurenmetalle werden bei der Hydratation in den entstehenden Feststoff eingebunden und sind nur gering auslaugbar.

Die Zusammensetzung des Klinkers beeinflusst die Eigenschaften des Zements sehr wesentlich. Durch geeignete Rohstoffauswahl können die Anteile der Hauptklinkerphasen variiert und die Eigenschaften des Portlandzements zielgerichtet verändert werden. Zur Einstellung der Zusammensetzung der Rohmischung dienen Kalkstandard (KSt), Tonerde-(TM-), Silikat- (SM-) und Sulfat- (MSO_3 -) Module, die die Verhältnisse der Masseanteile der Hauptbestandteile angeben [1.2]. Für die Herstellung von Klinkern für normalen Portlandzement und Portlandzement für bestimmte Anwendungen sind dafür jeweils Richtwerte einzuhalten. Die daraus resultierende chemische und mineralogische Zusammensetzung für einige Zementarten ist in Tabelle 1.2 angegeben. Die Einordnung in das

Rankin-Diagramm (Bild 1.1) gestattet einen anschaulichen Vergleich mit anderen Zementen und Hauptbestandteilen.

Merkmal	Portlandzementklinker			
	normal	frühhochfest	hoher Sulfatwiderstand	weiß
Chemische Zusammensetzung [Masse-%]				
SiO ₂	20,5	19,6	20,5	22,9
Al ₂ O ₃	6,5	6,0	4,8	4,3
Fe ₂ O ₃	3,5	3,3	6,2	0,5
CaO	64,6	64,3	60,6	65,4
CaO _{frei}	1,4	1,8	0,7	1,2
CaO _{effektiv}	62,5	64,3	60,6	65,4
SO ₃	1,0	0,7	0,9	0,2
MgO	3,3	2,1	1,9	1,6
Module				
Silikatmodul	2,05	2,11	1,86	4,77
Tonerdemodul	1,86	1,82	0,77	8,6
Kalkstandard	96,7	100,8	90,4	94,5
Klinkerphasen				
C ₃ S	49,9	67,8	49,7	62,5
C ₂ S	21,2	5,1	21,3	18,5
C ₃ A	11,3	10,3	2,2	10,6
C ₄ AF	10,7	10,0	18,9	1,5

Tabelle 1.2 Chemische und mineralogische Zusammensetzung sowie Moduln verschiedener charakteristischer Zementklinker (nach [1.3])

Hauptträger der Festigkeit des erhärteten Zementsteins sind die silikatischen Klinkerbestandteile (C₃S und C₂S), die etwa 70–80 Masse-% des Klinkers bilden.

Während C₃S eine schnelle Festigkeitsentwicklung und hohe Anfangsfestigkeit aufweist, zeigt C₂S eine langsame, stetige Erhärtung. Die aluminatischen Phasen (C₃A und C₄AF) tragen zur Endfestigkeit nur relativ geringfügig bei (Bild 1.2). Aufgrund der schnellen Hydratation des C₃A werden in Verbindung mit Gips/Anhydrit Neubildungen wirksam, die am Anfang der Erhärtung einen wesentlichen Anteil an der Frühfestigkeit besitzen.

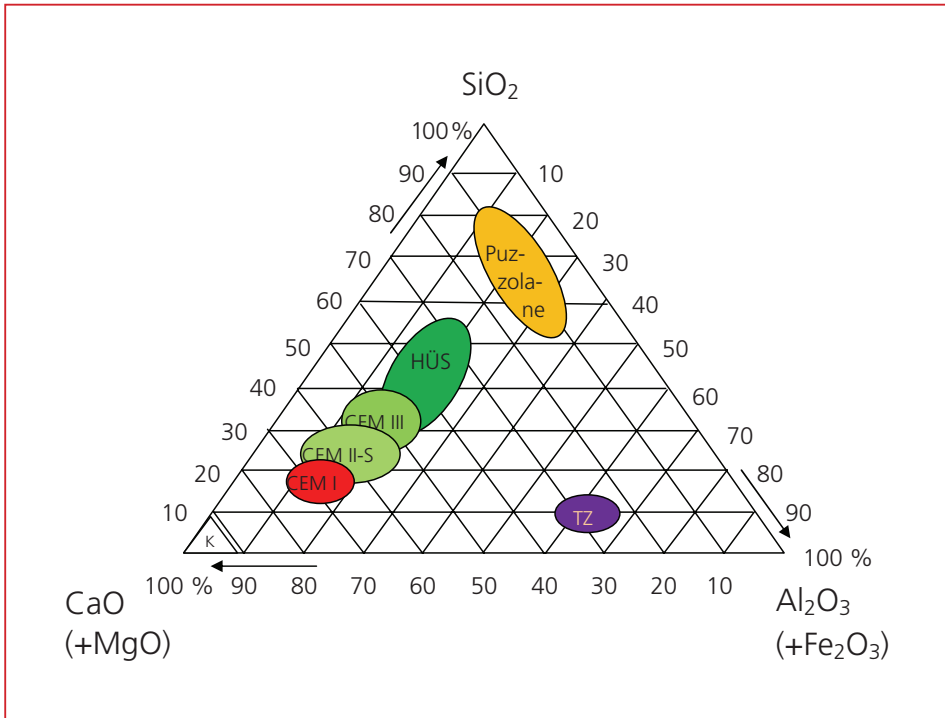


Bild 1.1 RANKIN-Diagramm mit Einordnung der Hauptzementarten und der Hauptbestandteile

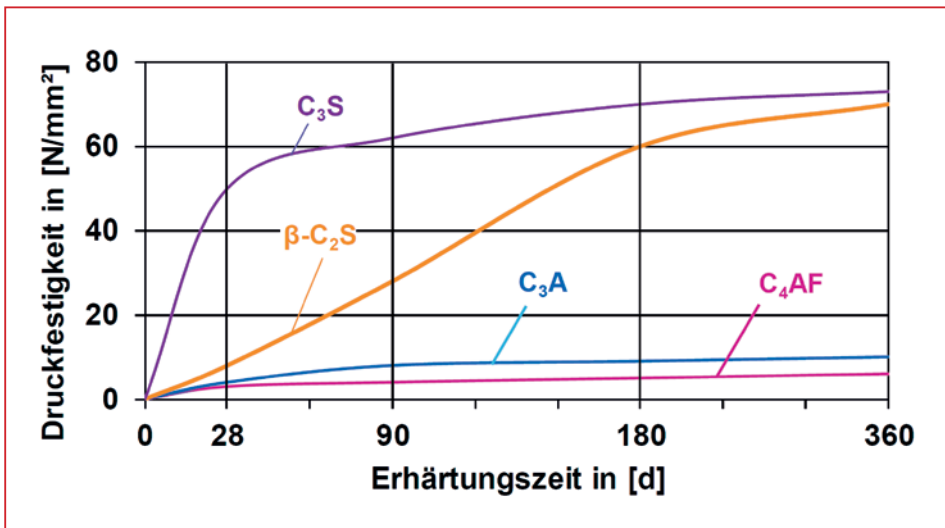


Bild 1.2 Festigkeitsentwicklung der Klinkermineralien (nach BOGUE und LERCH)

Die Klinkerminerale weisen weitere Unterschiede in den Eigenschaften auf. Die Hydratationsgeschwindigkeit und die während der Hydratation freigesetzte Wärmemenge sind bei C_3A am größten, liegen bei C_3S und C_4AF im mittleren Bereich und weisen bei C_2S den niedrigsten Betrag auf (Bild 1.3). Eine Übersicht zur Wärmefreisetzung der Zementbestandteile ist in Bd. 2 Abschnitt 1.8 zu finden.

Der Hydratationsverlauf der Klinkerphasen ist ebenfalls unterschiedlich. Das Reaktionsverhalten der Zemente wird dadurch zwar beeinflusst, aber nicht bestimmt, da die Klinkerminerale entsprechend dem Hydratationsmechanismus gemeinsam und nicht selektiv hydratisieren.

C_3A reagiert mit Sulfaten und verursacht das Sulfattreiben. Insofern wird bei Zementen mit hohem Sulfatwiderstand eine Begrenzung des C_3A -Gehaltes ≤ 3 Masse-% und eine Erhöhung des Anteiles des widerstandsfähigeren C_4AF vorgenommen.

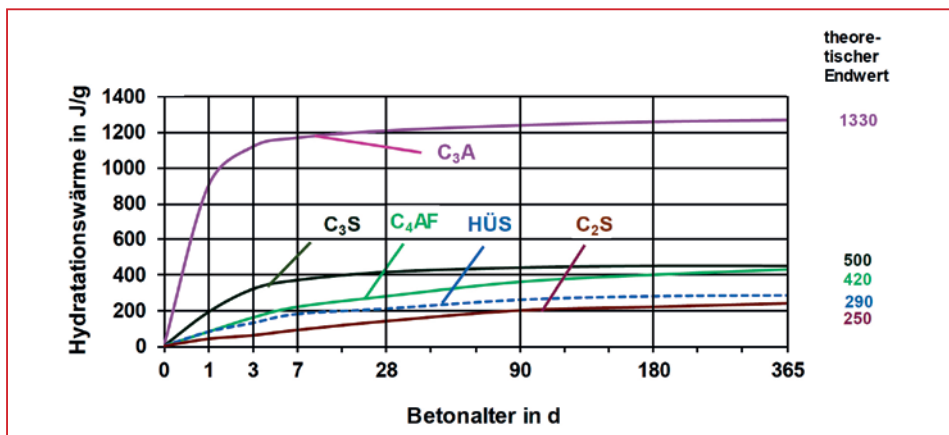


Bild 1.3 Entwicklung der Hydrationswärme der Klinkerminerale und von Hüttensand

Die Reaktionsfähigkeit des Klinkers und der Verlauf der Hydratationsreaktionen wird nicht nur durch die Zusammensetzung und die Mahlfeinheit bestimmt, sondern auch durch die Prozessführung (Brenntemperatur und Klinkerkühlung) und den Einbau von Fremdelementen in die Klinkerphasen. Die dadurch hervorgerufene Morphologie und die Gitterstörungen beeinflussen die hydraulische Aktivität. Damit ist auch die unterschiedliche Hydraulizität von Klinkern gleicher chemischer Zusammensetzung zu erklären.

Für eine Reihe von Fragen der Zementanwendung ist die Kenntnis der Zusammensetzung des Klinkers wichtig. Aus den Anteilen der Klinkerminerale können eine Reihe quantitativer Aussagen zu den Vorgängen bei der Erhärtung des Zementsteins getroffen werden, wie z. B. die insgesamt freigesetzte Hydrationswärme, die Wasserbindung, das Volumen der Hydratstruktur und die Kapillarporosität (Bd. 2 Abschnitt 1). Angaben zum Bestand an den Klinkerphasen können durch chemische Analyse und Berechnung der Mineralbestandteile aus den oxidischen Komponenten, durch Licht- und Rasterelektronenmikroskopie (REM), gekoppelt mit digitalisierter Bildanalyse sowie durch quantitative Röntgendiffraktometrie (QXRD) gewonnen werden.

Die rechnerische Ermittlung der Anteile der Klinkermineralien, die von Bogue eingeführt wurde, beruht auf der Bildung der vier theoretischen Hauptklinkerphasen und einer Reihe vereinfachender Annahmen, die nur mit Einschränkungen zutreffen. Beispielsweise wird der Einbau von Fremdoxiden in den Klinkerphasen nicht berücksichtigt. Dadurch ergeben sich Differenzen zu den Ergebnissen, die aus der Anwendung der physikalischen Verfahren resultieren. Im Allgemeinen wird der Anteil an C_3S unter- und der von C_2S sowie C_3A überschätzt. Eine Verbesserung der rechnerischen Ermittlungen wurde dadurch erreicht, dass von der mittleren Zusammensetzung realer Klinkerphasen ausgegangen und eine Modifizierung der Gleichungen vorgenommen worden ist (vergleiche Bd. 2 Abschnitt 1.1.1). Grundsätzlich gilt, dass die Berechnung der Klinkermineralien aus den in oxidischer Form vorliegenden Elementen der chemischen Analyse nur Anhaltswerte liefern kann, die nicht exakt zutreffen. In vielen Fällen sind diese so erhaltenen Angaben jedoch ausreichend.

Die Weiterentwicklung der physikalischen Messverfahren führt dazu, dass die chemische Analyse durch die direkte Bestimmung der Klinkerphasen verdrängt wird. Dabei treten ebenfalls Unterschiede in den Ergebnissen auf, die durch Probleme der Erkennbarkeit der Bestandteile verursacht werden.

1.1.2.2 Weitere Hauptbestandteile des Zements (CEM II bis CEM V-Zemente)

Alle weiteren Hauptbestandteile werden gemeinsam mit Portlandzementklinker eingesetzt. Die weiteren Hauptbestandteile werden sowohl allein als auch in unterschiedlichen Kombinationen verwendet.

1.1.2.2.1 Hüttensand

Hüttensand ist ein Nebenprodukt der Eisenerzverhüttung. Nach dem Abziehen der Hochofenschlacke und sofortigem Abschrecken mit Wasser liegt eine glasig erstarrte basische Kalk-Tonerde-Silikat-Verbindung vor, die hauptsächlich CaO (etwa 30 bis 50 %) und SiO_2 (etwa 25 bis 40 %) sowie in geringerem Umfang Al_2O_3 (etwa 5 bis 15 %) und MgO (1 bis 10 %) enthält (Bild 1.1). Der Anteil der einzelnen Bestandteile hängt von der Zusammensetzung des Eisenerzes und der weiteren Ausgangsstoffe ab. Der Hüttensand wird gemeinsam oder getrennt mit Portlandzementklinker zu Hochofen-, Portlandhütten- (früher: Eisenportlandzement), Portlandkomposit- oder Kompositzement vermahlen (Tabelle 1.1). Die Bezeichnung richtet sich nach dem Hüttensandanteil sowie dem Anteil weiterer Hauptbestandteile.

Hüttensand gehört zu den latent-hydraulischen Stoffen, die aufgrund des sehr langsamen eigenen Erhärtungsvermögens einen Anreger benötigen, damit im bautechnisch vertretbaren Zeitraum eine hinreichende Festigkeitsentwicklung stattfindet. Die Anregung findet über das bei der Umsetzung des Portlandzementklinkers frei werdende Kalziumhydroxid statt, ist grundsätzlich jedoch auch sulfatisch (Gips), wie beim heute nicht mehr hergestellten Sulfathüttenzement, möglich. Bei der Hydratation entstehen im Wesentlichen die gleichen Hydratationsprodukte wie bei Portlandzement, jedoch mit dem Unterschied, dass die Kalziumsilikathydrate ein geringeres CaO/SiO_2 -Verhältnis besitzen und damit kalkärmer sind. Der Hydratationsvorgang des Hüttensandes setzt vergleichsweise

wenig Hydratationswärme, insbesondere in der Anfangsphase der Erhärtung frei, (Bild 1.2, Tabelle 1.6). Je nach Anteil des Hüttensandes kann dadurch die Wärmeentwicklung des damit hergestellten Zementes herabgesetzt werden (Bd. 2 Bild 1.94).

1.1.2.2.2 Puzzolane (P, Q)

Puzzolane können natürlich entstanden sein oder technisch hergestellt werden.

Natürliche Puzzolane (P) sind kieselsäurehaltige oder kieselsäure- und tonerdehaltige Stoffe vulkanischen Ursprungs (Traß, Phonolith, Lava). Traß ist dabei ein feingemahlener, saurer Tuffstein mit 50 bis 70 % reaktionsfähigen SiO_2 . Lavamehl enthält gegenüber Traß weniger SiO_2 , aber mehr CaO und MgO .

Künstliche Puzzolane (Q) haben durch thermische Prozesse eine entsprechende Reaktivität erhalten. Phonolith besitzt durch Tempern bei ca. 400 °C eine erhöhte Reaktionsfähigkeit im alkalischen Milieu.

Puzzolane haben kein eigenes Abbindevermögen. Sie bedürfen der Anregung und der Anwesenheit von Kalziumhydroxid, damit der Erhärtungsvorgang beginnen kann und festigkeitsbildende Strukturen entstehen. Entscheidend für die Reaktivität ist der Glasgehalt, da nur dieser mit dem Kalziumhydroxid reagieren kann. Der Aufbau wasserunlöslicher Strukturen findet dann statt, wenn bei gemeinsamer Hydratation mit Portlandzementklinker das freigesetzte Kalziumhydroxid im Anmachwasser zur Verfügung steht. Die entstehenden Kalziumsilikathydrate ähneln im Aufbau denen des Portlandzementes, aber mit einem geringeren CaO/SiO_2 -Verhältnis.

1.1.2.2.3 Gebrannter Schiefer (T)

Gebrannter Schiefer, insbesondere gebrannter Ölschiefer, wird bei 800 °C aus natürlichen Schiefervorkommen (z. B. Ölschiefer) hergestellt. Nach der Feinmahlung liegen ausgeprägte hydraulische Eigenschaften ähnlich dem Zement aus Portlandzementklinker vor. Daneben verfügt der gebrannte Schiefer auch über puzzolanische Eigenschaften. Die selbstständige Erhärtungsfähigkeit ist auf den Gehalt an Dikalziumsilikat, Kalziumaluminat und Siliziumdioxid zurückzuführen.

1.1.2.2.4 Flugaschen (V, W)

Flugaschen sind kieselsäurereiche- oder kalkreiche, staubfeine Partikel, die aus Abscheideanlagen für Rauchgase von Kohlekraftwerken mit fein gemahlener Kohle stammen. Flugaschen aus anderen Feuerungsverfahren dürfen nicht verwendet werden. Die Zusammensetzung schwankt sehr stark und ist von der Herkunft der Kohle abhängig. Die Flugaschen bestehen aus überwiegend kugelförmigen, feinkörnigen Partikeln glasiger Struktur. Die Partikelgrößenverteilung entspricht in etwa der des Zements und weist eine große Bandbreite auf. Flugaschen für die Zementherstellung müssen mindestens 2/3 glasige Bestandteile enthalten.

Kieselsäurereiche Flugaschen (V) stammen im Wesentlichen aus mit Steinkohlenstaub betriebenen Kraftwerken und bestehen im Mittel aus ca. 45 bis 55 Masse-% SiO_2 , 25 bis 35 Masse-% Al_2O_3 und 5 bis 15 Masse-% Fe_2O_3 , haben aber einen sehr niedrigen CaO -

Gehalt (1 bis 8 Masse-%, i. M. etwa 5 Masse-%) (Bild 1.1). Flugaschen besitzen puzzolanische Eigenschaften.

Kalkreiche Flugaschen (W) weisen höhere CaO-Gehalte auf (bis 50 Masse-%; Bild 1.1). Sie stammen vorwiegend aus Kraftwerken mit Braunkohlestaubfeuerungen. Es sind feinkörnige Stäube, die sowohl hydraulische als auch puzzolanische Eigenschaften besitzen. Ist der Gehalt an freiem CaO zu hoch, neigen Braunkohleflugaschen beim Abbinden zum Treiben.

1.1.2.2.5 Kalkstein (L, LL)

Gemahlener Kalkstein kann die Korngrößenverteilung des Zements im feinen Bereich verbessern. Er stellt einen inerten Füller dar und hat hinsichtlich der Gehalte an CaCO_3 (mind. 75 Masse-%), Ton und organischem Kohlenstoff besondere Anforderungen zu erfüllen. Kalksteinmehl mit einem organischen Kohlenstoffgehalt $\leq 0,50$ Masse-% wird mit L und $\leq 0,20$ Masse-% mit LL gekennzeichnet. Der Tongehalt darf die Methylenblau-Adsorption von 1,20 Masse-% nicht übersteigen.

Die Eignung ist durch die Verwendung in der Praxis nachgewiesen. Der Frostwiderstand von Mörtel und Beton wird nicht beeinträchtigt.

1.1.2.2.6 Silikastaub (D)

Silikastaub besteht aus sehr feinen amorphen kugeligen Partikeln von Siliziumdioxid. Er entsteht als Filterstaub bei der Herstellung von Silizium oder Siliziumlegierungen bei Temperaturen über 2500 °C. Silikastaub muss mindestens 85 Masse-% SiO_2 enthalten. Silikastaub verbessert die Kornstruktur des Zements im feinsten Bereich und bildet mit dem bei der Hydratation von Portlandzementklinkern entstehenden Kalziumhydroxid festigkeitsbildende Phasen. Die Reaktion des Kalziumhydroxids mit dem Siliziumdioxid begrenzt die maximal mögliche Zugabemenge von Silikastaub um den basischen Charakter des Zementsteins nicht zu gefährden.

1.1.3 Zementklassen, bautechnische Eigenschaften und Anwendungsbereiche der Zemente

Zu den Grundeigenschaften der Zemente gehören ihre Festigkeitsklassen, die bautechnischen Eigenschaften und die Anwendungsbereiche.

1.1.3.1 Normalzemente (Zemente mit Eigenschaften nach DIN EN 197)

Normalzemente besitzen sowohl genormte als auch nicht genormte bautechnische Eigenschaften.

1.1.3.1.1 Genormte bautechnische Eigenschaften der Zemente

■ Normfestigkeit der Zemente

Die Normfestigkeit entspricht der 28 Tage-Druckfestigkeit, die nach DIN EN 196-1 an Zementmörtelprismen, die unter Wasser gelagert wurden, festzustellen ist.

Hinsichtlich der Normfestigkeiten wird zwischen den Festigkeitsklassen 32,5; 42,5 und 52,5 unterschieden (Tabelle 1.3).

Die Bandbreite der Druckfestigkeiten für die einzelnen Festigkeitsklassen ist auf 20N/mm² begrenzt worden. Die angegebenen oberen und unteren Grenzwerte dürfen dabei nicht unter- bzw. überschritten werden. Die unteren Grenzwerte werden durch eine 5 %-Fraktile bestimmt, die oberen stellen die 10 %-Fraktile der Grundgesamtheit dar.

Festigkeitsklasse	Norm	Druckfestigkeit [N/mm ²]			Kennfarbe ¹⁾	Farbe ¹⁾ des Aufdrucks	
		Anfangsfestigkeit		Normfestigkeit			
		2 Tage	7 Tage	28 Tage			
22,5	DIN EN 14216	–	–	≥ 22,5	≤ 42,5	–	–
32,5 L ²⁾	DIN EN 197-1	–	≥ 12	≥ 32,5	≤ 52,5	hellbraun	–
32,5 N		–	≥ 16				schwarz
32,5 R		≥ 10	–				rot
42,5 L ²⁾		–	≥ 16	≥ 42,5	≤ 62,5	grün	–
42,5 N		≥ 10	–				schwarz
42,5 R		≥ 20	–				rot
52,5 L ²⁾		≥ 10	–	≤ 52,5	–	rot	–
52,5 N		≥ 20	–				schwarz
52,5 R		≥ 30	–				rot

¹⁾ nach Normen nicht verbindlich, übliche Praxis in Deutschland

²⁾ die Festigkeitsklasse gilt nur für CEM III-Zemente

Tabelle 1.3 Festigkeitsklassen und Kennfarben von Zement

■ Anfangsfestigkeit und Festigkeitsentwicklung

Unter der Anfangsfestigkeit wird die Druckfestigkeit nach 2 oder 7 Tagen Erhärtung und Prüfung nach DIN EN 196-1 verstanden.

Mit Ausnahme der Festigkeitsklasse 22,5 (nur für Sonderzemente nach DIN EN 14216) werden nach ihrer Anfangsfestigkeit unterschieden (Tabelle 1.3):

- niedrige Anfangsfestigkeit,
(nur für Hochofenzemente nach DIN EN 197-1)
- normale, übliche Anfangsfestigkeit (Kennbuchstabe N = Normal)
- hohe Anfangsfestigkeit (Kennbuchstabe R = Rapid).

Die zugesicherte Eigenschaft bei beschleunigter Festigkeitsentwicklung ist eine höhere Anfangsfestigkeit. Dies wird durch die entsprechende Zusammensetzung des Klinkers und die Mahlfeinheit gesteuert. Damit wird auch der Verlauf der Festigkeitsentwicklung sehr wesentlich bestimmt. Grundsätzlich gilt, dass Zemente und daraus hergestellte Betone mit hoher Frühfestigkeit nur ein geringes Nacherhärtungsvermögen besitzen und umgekehrt (siehe auch Bild 1.4).

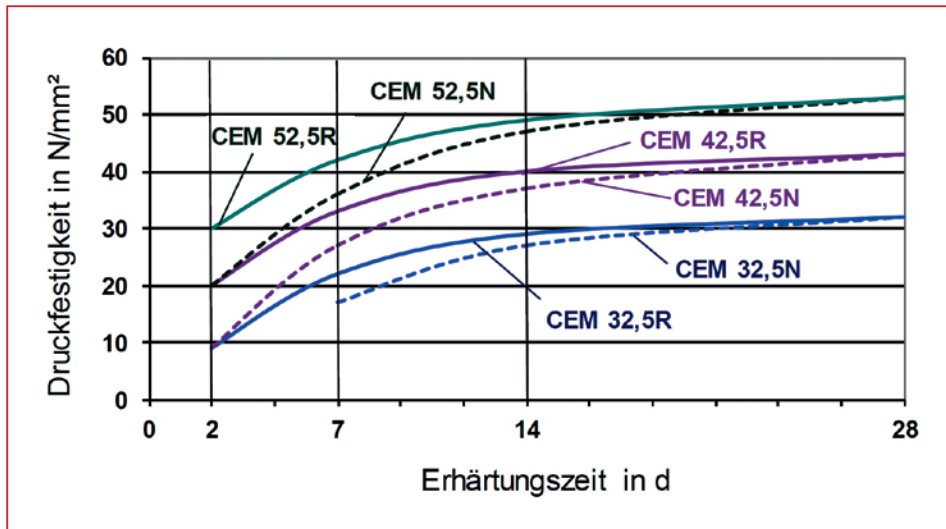


Bild 1.4 Anfangsfestigkeit und Festigkeitsentwicklung der Normzemente nach Festigkeitsklassen

■ Erstarren

Das Erstarren stellt eine Vorstufe der Erhärtung dar und setzt ein, wenn über die neuen Hydratationsprodukte hinreichende Verbindungen zwischen den Bestandteilen des Zementmörtels bestehen. Damit eine ausreichende Zeit für die Verarbeitung von Mörtel und Beton zur Verfügung steht, ist der Erstarrungsbeginn in Abhängigkeit von der Festigkeitsklasse festgelegt worden. Für die Festigkeitsklasse 32,5 muss ein Erstarrungsbeginn von ≥ 75 min, für die Festigkeitsklasse 42,5 ≥ 60 min und für die Festigkeitsklasse 52,5 ≥ 45 min eingehalten werden. Das Erstarrungsende muss einheitlich 12 Stunden nach dem Mischen eingetreten sein. Das Erstarren wird nach DIN EN 196-3 mit dem Nadelgerät nach Vicat am Zementleim bestimmt.

■ Raumbeständigkeit

Die Prüfung des erhärteten Zementes auf Raumbeständigkeit wird durchgeführt, um mögliche Treiberscheinungen aufgrund der Reaktionen von freiem Calciumoxid und/oder freiem Magnesiumoxid erkennen und abschätzen zu können. Im Regelfall erfüllen alle Normzemente die Anforderungen an die Raumbeständigkeit sicher. Der Nachweis wird nach DIN EN 196-3 geführt und erbracht, wenn das mit dem Le-Chatelier-Ring bestimmte Dehnungsmaß ≤ 10 mm beträgt.

1.1.3.1.2 Nicht genormte bautechnische Eigenschaften der Zemente

Nicht genormt, aber von großer Bedeutung für die betontechnologische Praxis sind vor allem Wasserbedarf und Ansteifen der Zemente. Bei besonderen Bauaufgaben kann auch die Helligkeit und Farbe des Zementes von Bedeutung sein. Die Mahlfineinheit der Zemente wirkt sich auf die Reaktionsfähigkeit aus und ist in der Festigkeits- und Wärmeentwicklung der Zemente erfasst.

■ Wasserbedarf und Ansteifen der Zemente

Je niedriger der Wasserbedarf des Zements ist bzw. je langsamer das Ansteifen verläuft, desto günstiger kann die Verarbeitung des Betons werden. Aus diesem Grund sind für die Transportbetonherstellung besonders langsam ansteifende Zemente geeignet, bei denen das Ansteifen nur geringen Schwankungen unterworfen ist.

Der Wasserbedarf der Zemente wird nach EN 196-3 bestimmt. Für das Ansteifen bestehen noch keine Prüfvorschriften. Hinweise für das Verhalten des Frischbetons geben das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 und dessen zeitliche Veränderung an einer Betonmischung.

■ Mahlfineinheit

Je feiner der Zement gemahlen und je geringer die Partikeldurchmesser sind, desto größer sind die Oberfläche und die Reaktionsfähigkeit. Daraus resultierend werden die Hydratation und Wärmeentwicklung beschleunigt und die Festigkeiten zu früheren Zeitpunkten erreicht. Mahlung und Kornfraktionierung des Zements sind die wesentlichen Mittel, um bei einem Klinker mit festgestellten Eigenschaften die normgemäße Festigkeitsentwicklung mit der vorgeschriebenen Sicherheit zu erreichen. Die Unterschiede in der Erhärtungsgeschwindigkeit sind bei den einzelnen Korngruppen des Körnungsbandes des Zementes sehr groß. Während Klinkerkörner der Gruppe 25/50 μm nach einem Tag eine kaum feststellbare Festigkeit zeigen, erreichen Partikel der Korngruppe 0/3 μm bereits Festigkeiten um 50 N/mm².

Die Korngröße beeinflusst die Eigenschaften der Zemente wesentlich. Zu fein gemahlener Zement hat einen höheren Wasserbedarf, der die Festigkeit herabsetzen kann; die Frühfestigkeit ist jedoch hoch.

Zu grober Zement zeigt eine gute Nacherhärtung und eine höhere Endfestigkeit.

Die Mahlfineinheit wird durch die spezifische Oberfläche des Zements in cm²/g beschrieben, die nach DIN EN 196-6 aus der Luftdurchlässigkeit einer verdichteten Probe, der Dichte des Zementes und der Viskosität der Luft ermittelt wird (Verfahren nach Blaine).

Im Allgemeinen ist eine Mahlfineinheit von mindestens $2000\text{ cm}^2/\text{g}$ erforderlich. Die obere Grenze variiert je nach Zementart. Die spezifische Oberfläche beträgt bei CEM I 32,5R etwa $2300\text{--}4000\text{ cm}^2/\text{g}$, bei CEM I 52,5R etwa $3800\text{--}6000\text{ cm}^2/\text{g}$; andere Zemente bewegen sich innerhalb dieser Werte.

■ **Helligkeit und Farbe des Zementes**

Bei der Herstellung von Sichtbetonbauwerken können Farbe und Helligkeit des Zementes von Bedeutung sein.

Die Farbe hängt von den verwendeten Rohstoffen und dem Herstellungsverfahren ab und zeigt damit für die einzelnen Zementarten merkliche Abweichungen im zementtypischen Grauton. Für Zemente einer bestimmten Festigkeitsklasse aus einem Herstellerwerk sind die farblichen Schwankungen geringer und werden in der praktischen Anwendung durch die Einflüsse aus der Verarbeitung, der Schalung und Nachbehandlung überdeckt. Die Helligkeit des Zementes wird durch die Mahlfineinheit beeinflusst. Feingemahlene Zemente sind im Allgemeinen heller.

■ **Schwinden**

Die einzelnen Zementarten wirken sich auf das Schwinden des Betons nur unwesentlich aus. Entscheidenden Einfluss haben demgegenüber die Zusammensetzung des Mörtels und Betons (Wassergehalt, Zementleimenge), der Mehlkorngelhalt und die Nachbehandlung.

■ **Dichte und Schüttdichte**

Die Reindichte der einzelnen Zementarten liegt zwischen $2,90\text{ kg}/\text{dm}^3$ (Portlandpuzzolanzement) und $3,10\text{ kg}/\text{dm}^3$ (Portlandzement). Durchschnittswerte sind in Tabelle 2.22 angegeben. Von diesen Durchschnittswerten sind Abweichungen möglich. Liegen keine gesondert ermittelten Werte für einen bestimmten Zement vor, sind bei der Stoffraumrechnung (Abschnitt 2.4) die Durchschnittswerte zu verwenden.

Die Schüttdichte kann einheitlich mit $0,9\text{--}1,2\text{ kg}/\text{dm}^3$ (lose eingelaufen) bzw. $1,6\text{--}1,9\text{ kg}/\text{dm}^3$ (eingerüttelt) angenommen werden.

1.1.3.1.3 Anwendungsbereiche der Zemente

Die Anwendungsbereiche der Zemente nach DIN EN 197-1 und DIN 1164 gemäß DIN 1045-2 sind in Tabelle 1.4 und Tabelle 1.5 zusammengestellt. Nicht gesondert hingewiesen ist auf den VLH-Zement nach DIN EN 14216, der bei massigen Bauteilen zweckmäßig oder unabdingbar sein kann.

Für Einpressmörtel bei Spannbeton werden zusätzliche Anforderungen an den zu verwendenden Zement gestellt, die in DIN 4227, Teil 5, eingearbeitet worden sind.

Unabhängig von den Angaben in Tabelle 1.4 und Tabelle 1.5 dürfen bauaufsichtlich zugelassene Zemente für die im Zulassungsbescheid genannten Anwendungsbereiche eingesetzt werden.

Zement x = gültiger Anwendungsbereich 0 = Anwendung ausgeschlossen bzw. nur durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung möglich	Expositionsklassen		Bewehrungskorrosion						Frostangriff			aggressive chemische Umgebung	Ver- schleiß	Spann- stahl- verträglichkeit		
	kein Korrosions- oder Angriffs- risiko X0	durch Karbona- tisierung verursachte Korrosion XC1 XC2 XC3, XC4	durch Chloride verursachte Korrosion			Chloride aus Meerwasser			XF1	XF2	XF3				XF4	
			andere Chloride als Meerwasser XD1 XD2 XD3	XC1	XC2	XC3	XC4	XS1								XS2
CEM I	A/B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	XM1, XM2, XM3	X	
	S	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	D	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
CEM II	A/B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	XM1, XM2, XM3	X	
	P/Q	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	A/B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	V ²⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	W ²⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	W ²⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	A/B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	A	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
CEM III	B	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	XM1, XM2, XM3	X	
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	L	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
CEM IV	A ²⁾³⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	XM1, XM2, XM3	X	
	B ²⁾³⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
	A ²⁾³⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X
CEM V	A ²⁾³⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	XM1, XM2, XM3	X	
	B ²⁾³⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X			X

1) Bei chemischem Angriff durch Sulfat (ausgenommen bei Meerwasser) muss bei den Expositionsklassen XA2 und XA3 Zement mit hohem Sulfatwiderstand (CEM I-SR 3 oder niedriger, CEM III/B-SR, CEM III/C-SR) verwendet werden. Bei einem Sulfatangriff des angreifenden Wassers von SO4²⁻ ≤ 1500 mg/l darf anstelle von HS-Zement eine Mischung von Zement und Flugasche verwendet werden.

2) Zemente zur Herstellung von Beton nach DIN 1045-2 dürfen nur Flugasche mit bis zu 5 % Glühverlust enthalten

3) Bei bestimmten Kombinationen der Hauptbestandteile erweiterte Anwendungsmöglichkeiten

4) Festigkeitsklasse ≥ 42,5N oder Festigkeitsklasse ≥ 32,5R mit einem Hüttenanteil von ≤ 50 Masse-%

5) CEM III/B darf nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden (auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden):

a) Meerwasserbauteile: $w/z \leq 0,45$; Mindestfestigkeitsklasse des Betons C35/45 und $z \geq 340 \text{ kg/m}^3$

b) Räumlerlaufbahnen: $w/z \leq 0,35$; Mindestfestigkeitsklasse des Betons C40/50 und $z \geq 360 \text{ kg/m}^3$; Beachtung von DIN 19569-1, »Kläranlagen – Baugrundsätze für Bauwerke und technische Ausrüstungen. Allgemeine Grundsätze«.

Tabelle 1.4 Anwendungsbereiche für Zemente nach DIN EN 197-1 und DIN 1164 zur Herstellung von Beton nach DIN 1045-2

Anwendungsbereich X = gültiger Anwendungsbereich 0 = Anwendung aus geschlossen bzw. nur durch allgemeine bauaufsichtliche Zulassung möglich		Expositionsklassen										Spannstahlverträglichkeit	
		kein Korrosions- oder Angriffsrisiko		Bewehrungskorrosion				Betonangriff			Verschleiß		
				durch Karbonatisierung verursachte Korrosion	durch Chloride verursachte Korrosion		aggressive chemische Umgebung	Frostangriff					
X0		XC1, XC2	XC3, XC4	andere Chloride	XD1, XD2, XD3	XF1	XF2	XF3	XF4	XM1	XM2, XM3		
A	S-D; S-T; S-L; D-T; D-L; S-V ⁵⁾ ; T-L; V-T; V ⁵⁾ -LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S-P; D-P; D-V ⁵⁾ ; P-V ⁵⁾ ; P-T; P-LL	X	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X ²⁾	
CEM II	M	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	S-P; D-P; D-V ⁵⁾ ; P-T; P-V ⁵⁾	X	X	X	X	X	0	X	0	X	X	X ²⁾	
CEM IV	B	X	X	0	0	X	0	0	0	0	0	0	
	P ³⁾	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	0	
CEM V	A	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	
	B	X	X	X	X	X	0	0	0	0	0	0	

1) Bei chemischem Angriff durch Sulfat (ausgenommen bei Meerwasser) muss bei den Expositionsklassen XA2 und XA3 Zement mit hohem Sulfatwiderstand (HS-Zement) verwendet werden. Bei einem Sulfatgehalt des angreifenden Wassers von $SO_4^{2-} \leq 1500$ mg/l darf anstelle von HS-Zement (SR-Zement) eine Mischung aus Zement und Flugasche verwendet werden. Sulfatgehalte oberhalb 600 mg/l sind im Rahmen der Festlegung des Betons anzugeben.

2) Zemente, die natürliche Puzzolane (P) enthalten, sind ausgeschlossen.

3) Gilt nur für Trass nach DIN 51043 als Hauptbestandteil bis maximal 40 M.-%

4) Gilt nur für Trass nach DIN 51043 als Hauptbestandteil

5) Zemente mit Flugasche (V) zur Herstellung von Beton nach DIN 1045-2 dürfen nur Flugasche mit bis zu 5 % Glühverlust enthalten

Table 1.5 Erweiterte Anwendungsbereiche für CEM-II-M-, CEM-IV- und CEM-V-Zemente mit zwei bzw. drei Hauptbestandteilen (nach DIN 1045-2)

Festigkeitsklasse	Zementart	Typische Eigenschaften			Typische Anwendungsgebiete
		Anfangsfestigkeit	Hydratationswärmeeentwicklung	Nacherhärtung	
22,5	CEM III nach DIN EN 14216	sehr niedrig	sehr gering	gut	massige Bauteile
32,5 L 32,5 N 42,5 L	CEM III	niedrig	gering	gut	massige Bauteile, übliche Betonarten
32,5 R	CEM I CEM II/A-S CEM II/B-S	normal	normal	normal	für alle Betonarten
42,5 N 52,5 L	CEM III	normal	normal	gut	für alle Betonarten
42,5 R 52,5 N	CEM I CEM II/A-S CEM II/B-S	hoch	ausgeprägt	normal	Hochfester Beton, Spannbeton, Fertigteile, schlanke Bauteile, kurze Ausschallfristen, Betonieren im Winter
52,5 R	CEM I	sehr hoch	sehr ausgeprägt	gering	

Tabelle 1.6 Hinweise für die Verwendung der Zemente nach Festigkeitsklassen (nach [1.6])

Eine allgemeine Übersicht zu den Merkmalen und Eigenschaften der einzelnen Festigkeitsklassen sowie die daraus resultierenden typischen Anwendungsgebiete zeigt Tabelle 1.6.

Im Allgemeinen gilt für die Festigkeitsklassen:

- 32,5L / 32,5 N – Zemente für die allgemeine Anwendung ohne besondere Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung. Geringe Frühfestigkeit und langsame Erhärtung mit der Notwendigkeit einer vergleichsweise längeren Nachbehandlung. Die Nacherhärtung ist gut, wenn dafür die entsprechenden Bedingungen vorhanden sind. Wegen der langsamen Wärmeentwicklung ist der Einsatz im Massenbetonbau zweckmäßig.
- 32,5 R / 42,5 L / 42,5 N – Zemente für die allgemeine Anwendung, aber mit einer erhöhten Anfangsfestigkeit. Normaler Festigkeitsverlauf, mittlere Wärmeentwicklung.
- 42,5 R / 52,5 L – Die schnelle Festigkeitsentwicklung und gleichzeitig höhere Wärmefreisetzung weisen auf die Eignung im Winterbau und für die Herstellung von Betonfertigteilen hin. Aufgrund der hohen Anfangsfestigkeit ist ein frühes Ausschalen möglich.
- 52,5 N / 52,5 R – Zemente mit sehr großer Anfangs- und Normdruckfestigkeit für sehr hohe Betonfestigkeiten und sehr kurze Ausschalltermine. Geeignet auch für das Betonieren bei niedrigen Temperaturen, wenn frühzeitig hohe Lasten aufgenommen werden sollen oder die Gefrierbeständigkeit schnell erreicht werden muss.

1.1.3.2 Sonderzemente (Zemente mit Eigenschaften nach DIN EN 197-1, DIN EN 14216 und DIN 1164)

Sonderzemente sind ebenfalls genormt und besitzen neben den Eigenschaften nach DIN EN 197 besondere Eigenschaften, wie niedrige Hydratationswärme, hoher Sulfatwiderstand, niedriger wirksamer Alkaligehalt, verkürztes Erstarren und erhöhter Anteil an organischen Bestandteilen.

Zement mit niedriger Hydratationswärme (LH)

Zemente mit niedriger Hydratationswärme (LH = »Low Heat«) dürfen in den ersten 7 Tagen der Erhärtung eine Wärmemenge von höchstens 270 J/g Zement freisetzen. Grundlage der Beurteilung ist die Bestimmung der Lösungswärme nach DIN 1164-8 an isotherm gelagerten Proben (Bd. 2 Abschnitt 1.8.3.1).

Die bis zur weitgehenden Hydratation des Zements freigesetzte Wärmemenge ist vom mineralogischen Aufbau des Zementklinkers und von der Zusammensetzung des Zements (Hauptbestandteile) abhängig. Der Verlauf der Wärmeentwicklung wird durch die Kornverteilung des Zements und damit durch die spezifische Oberfläche bestimmt (Bd. 2 Abschnitt 1.8.1). Da die Mahlfineinheit auch maßgebend für die Festigkeitsentwicklung ist, besteht ein Zusammenhang zwischen freigesetzter Hydratationswärme und erreichter Festigkeit (Bd. 2 Abschnitt 1.8.4).

Die Klinkerphasen weisen nach vollständiger Hydratation eine sehr unterschiedliche Enthalpie auf (Tabelle 1.7). Von Bedeutung ist, ob die Klinkerminerale getrennt oder gemeinsam im Zement hydratisieren. Wenn die Zusammensetzung des Zements bekannt ist, kann mit den Angaben der Tabelle 1.7 die Wärmefreisetzung berechnet werden. Ein Beispiel dafür ist in Bd. 2 Abschnitt 3.1.6 zu finden. Die für einzelne Festigkeitsklassen zu erwartenden Wärmemengen sind in Tabelle 1.8 angegeben. Die Reduzierung der freigesetzten Wärmemenge von Hochofenzementen in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt ist in Bd. 2 Bild 1.94 dargestellt. Die mögliche drastische Verringerung wirkt sich vor allem im Massenbetonbau vorteilhaft aus (Bd. 3 Abschnitt 3.1).

Inwieweit diese Reduzierung der Hydratationswärme ausreicht, kritische Spannungszustände infolge der Temperaturentwicklung und kritischer Temperaturdifferenzen im Bauteil im jungen Alter zu verhindern, muss durch Messung oder Berechnung geprüft werden (Bd. 2 Abschnitt 3.1).

LH-Zemente sind C_3A -arme, belitreiche CEM I bzw. CEM II-Zemente oder hüttensandreiche CEM III-Zemente. Sie sind besonders geeignet für die Herstellung massiger Bauteile und wenn hohe Außenlufttemperaturen vorliegen, bedürfen aber einer längeren Nachbehandlung.

Zemente mit sehr niedriger Hydratationswärme (VLH)

Diese Sonderzemente (VLH = »Very Low Heat«) nach DIN EN 14216 dürfen innerhalb der ersten 7 Tage höchstens 220 J/g Hydratationswärme freisetzen. Sie eignen sich besonders für massive Bauwerke mit großem Volumen. Für diese Sonderzemente wurde die Festigkeitsklasse 22,5 eingeführt. Es sind sehr langsam erhärtende Zemente mit einem gesonderten, d. h. größerem Nachbehandlungsbedarf.

Ausgangssubstanz	Hydratationswärme in J/g Ausgangssubstanz	
	bei getrennter Reaktion der einzelnen Phasen	bei gemeinsamer Reaktion im Klinker bzw. Zement
C ₃ S	500	570
β-C ₂ S	260	350
C ₃ A	860	1140
C ₃ A + Gips (Trisulfatbildung)		1350 ¹⁾
C ₃ A + Gips (Monosulfatbildung)		1070 ¹⁾
C ₄ AF	420	180
MgO		1000
Na ₂ O		2170
K ₂ O		2450
CaO _{frei}		1170
Flugasche		35
Hüttensand		290
Silica		810 ²⁾

¹⁾ bezogen auf C₃A

²⁾ bezogen auf Silika

Tabelle 1.7 Hydratationswärme nach der vollständigen Umsetzung der Klinkerminerale bei getrennter Reaktion und bei Hydratation im Phasenbestand des Zements sowie der Gesteinskörnungen

Festigkeitsklasse	Festigkeits- und Wärmeentwicklung	Hydratationswärme [J/g] bei 18–21 °C gemessen im Lösungskalorimeter im Alter von Tagen				
		1	2	3	7	28
22,5	sehr langsam					
32,5 L ¹⁾	langsam	50–130	90–180	120–210	170–270	200–310
32,5 N						
42,5 L ¹⁾						
32,5 R	normal	120–200	170–300	200–330	275–375	300–400
42,5 N						
52,5 L ¹⁾						
42,5 R	schnell	190–275	270–320	290–300	330–390	380–425
52,5 N						
52,5 R	sehr schnell	290–350	390–440	400–470	460–520	500–550

¹⁾ die Festigkeitsklasse gilt nur für CEM III-Zemente

Tabelle 1.8 Hydratationswärmeentwicklung in Abhängigkeit von der Zementfestigkeitsklasse (Richtwerte)

Zement mit hohem Sulfatwiderstand

Zemente mit hohem Sulfatwiderstand können nach DIN EN 197-1 Portland-, Hochofen- oder Puzzolanzemente sein. Die insgesamt sieben Zemente entsprechen für den Portland- und Hochofenzement in ihrer Zusammensetzung den Anforderungen der Tabelle 1.1. Im Falle der Puzzolanzemente ändert sich der Klinkeranteil und als mögliche weitere Hauptbestandteile dürfen nur natürliches Puzzolan (P) und kieselsäurereiche Flugasche (V) eingesetzt werden.

Beim Portlandzement mit hohem Sulfatwiderstand unterscheiden wir

- CEM I-SR 0 (C_3A -Gehalt des Klinkers = 0 %),
- CEM I-SR 3 (C_3A -Gehalt des Klinkers \leq 3 %) und
- CEM I-SR 5 (C_3A -Gehalt des Klinkers \leq 5 %).

Beim Hochofenzement mit hohem Sulfatwiderstand (CEM III/B-SR und CEM III/B-SR) werden keine Anforderungen an den C_3A -Gehalt des Klinkers gestellt.

Beim Puzzolanzement (CEM IV/A-SR und CEM IV/B-SR) muss der Klinker einen C_3A -Gehalt \leq 9 % besitzen.

Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA)

Zur Verhinderung der Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei dafür sensitiven Gesteinskörnungen sind Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt einzusetzen. Die Begrenzung wird über eine bewertete Summe der einzelnen Alkalien definiert.

NA-Zemente werden mit unterschiedlicher Zusammensetzung geliefert, und zwar vom CEM I mit 0,6 % Na_2O -Äquivalent bis zum hüttensandreichen CEM III/B mit 2,0 % Na_2O -Äquivalent.

Die Anforderungen an NA-Zemente sind in Tabelle 1.9 zusammengefasst.

Zementart	Benennung	Anforderung	
		Hütten-sandgehalt in Masse-%	Gesamtalkaligehalt in Masse-% als Na_2O -Äquivalent
CEM I bis CEM V	Portlandzement bis Kompositzement NA	–	\leq 0,60
CEM II/B-S	Portlandhüttenzement NA	21 ... 35	\leq 0,70
CEM III/A	Hochofenzement NA	36 ... 49	\leq 0,95
CEM III/A		50 ... 65	\leq 1,10
CEM III/B		66 ... 80	\leq 2,00
CEM III/C		81 ... 95	\leq 2,00

Tabelle 1.9 Normanforderungen an NA-Zemente

Zemente mit frühem Erstarren (FE)

Diese Zemente nach DIN 1164-11 sind durch einen frühen Erstarrungsbeginn gekennzeichnet. Sie ermöglichen bei entsprechend kurzen Misch-, Transport- und Verarbeitungs-

zeiten die Herstellung von Beton, insbesondere für Betonfertigteile. Der Erstarrungsbeginn muss für Zemente CEM I bis CEM V bei Festigkeitsklassen innerhalb des Zeitraumes

- 32,5 N / 32,5 R = 15 ... <75 min
- 42,5 N / 42,4 R = 15 ... <60 min
- 52,5 N / 52,5 R = 15 ... <45 min

liegen.

Zemente mit schnellem Erstarren (SE)

Die SE-Zemente, zur Zeit nur für CEM I zugelassen, besitzen einen Erstarrungsbeginn von weniger als 45 Minuten und sind für Normalbetone nicht geeignet. Ihre Anwendung beschränkt sich auf spezielle Herstellungsverfahren wie z. B. Trockenspritzbeton.

Zemente mit erhöhtem Anteil organischer Bestandteile (HO)

Diese Zemente dürfen bis zu 1 Masse-% organische Bestandteile enthalten. Sie enthalten stark verflüssigend wirkende Zusätze, die die Konsistenz des Zementleims herabsetzen.

1.1.3.3 Spezialzemente (Zemente mit definierten Eigenschaften innerhalb und außerhalb der Zementnormen)

Weiterhin gibt es Zemente für besondere Anwendungsgebiete, die zwar ebenfalls der DIN EN 197 genügen, aber dort nicht gesondert ausgewiesen sind und deshalb auch keine eigene Normbezeichnung besitzen. Die besondere Eignung kann durch Anhang von Kleinbuchstaben oder Ziffern kenntlich gemacht werden. Die gewählten Kleinbuchstaben können jedoch von Zementwerk zu Zementwerk variieren und sind deshalb nur hilfreich bei direkten Bestellungen.

Straßenbauzemente (-st- oder -sd-)

Für die Herstellung von Fahrbahndecken aus Beton ist in der Regel ein Portlandzement CEM I der Festigkeitsklasse 32,5 R oder alternativ 42,5 N zu verwenden. Zementwerke charakterisieren diesen Teil ihres Sortimentes durch den Anhang der Zeichen -st- oder -sd-; z. B. CEM I 32,5 R -st-.

Über die Forderungen der DIN EN 197-1 hinaus gelten für diese Festigkeitsklassen zusätzliche Bedingungen hinsichtlich Mahlfineinheit, Wasseranspruch, 2-Tage-Druckfestigkeit und Erstarrungsbeginn.

In Abstimmung mit dem Bauherren können auch die Festigkeitsklassen 32,5 R oder 42,5 N von

- Portlandhüttenzement CEM II/A-S oder CEM II/B-S,
- Portlandschieferzement CEM II/A-T oder CEM II/B-T oder
- Portlandkalksteinzement CEM II/A-LL sowie
- mindestens die Festigkeitsklasse 42,5N des Hochofenzements CEM III/A

verwendet werden.

Alle Zemente müssen einen geforderten charakteristischen Wert des Alkaligehaltes und des Erstarrungsbeginns nach TL Beton-StB 07 einhalten.

Höhere Festigkeiten sind zweckmäßig, wenn die Betonarbeiten bei kühler Witterung durchgeführt oder Straßenabschnitte schnell dem Verkehr übergeben werden sollen.

Wenn Fahrbahndecken aus frühhochfestem Straßenbeton mit Fließmittel hergestellt werden sollen, ist mindestens eine Festigkeitsklasse 42,5 R erforderlich.

Zement für Betonfertigteile und Betonwaren (-ft- oder -bw-)

Um kurze Ausschaltermine sichern zu können und/oder höchste Betondruckfestigkeit zu erreichen, stehen frühhochfeste Zemente zur Verfügung, die von den Zementwerken mit dem Anhang zur Bezeichnung -ft- bzw. -bw- versehen werden, z. B. CEM I 52,5 R -ft-.

Der Zement dient bevorzugt der Herstellung von Stahlbetonfertigteilen mit den Druckfestigkeitsklassen \geq C30/37, der Ausführung von Spannbetonbauwerken und der Herstellung von Baustellenbeton mit kürzesten Ausschallfristen.

Weißzement (-dw- oder -sw-)

Weißzement ist ein eisenoxidarmer Portlandzement der Festigkeitsklasse 32,5 R und wird aus besonderen Rohstoffen sowie mit speziellen Verfahren hergestellt. Gekennzeichnet sind die Lieferungen durch weiße Säcke mit schwarzem Aufdruck. Weißzement ist eine Voraussetzung für hellen Sichtbeton und optisch wirkenden Einfärbungen. Hinsichtlich der anderen Eigenschaften entspricht er einem Portlandzement gleicher Festigkeitsklasse.

Wasserabstoßende Zemente (-pe-)

Hydrophobe Zemente sind gegen Feuchtigkeit weitgehend unempfindlich und werden in der Festigkeitsklasse 32,5 hergestellt. Eine Reaktion mit dem Anmachwasser findet erst statt, wenn die Oberfläche durch das Mischen des Betons und die dabei auftretende Reibung aufgeschlossen worden ist. Anwendungsgebiete sind beispielsweise die Bodenverfestigung und die Verfestigung frostsicherer Böden.

Tunnelzement (-se-)

Für die Verwendung im Tunnelbau sowie zur Hang- und Grubensicherung im Tiefbau wird ein Zement angeboten, der sich für die Spritzbetonanwendung eignet. Der Einsatz ist dann vorteilhaft, wenn beschleunigende Zusätze nicht gestattet sind.

Spritzbetonzement (-sb-)

Ein hinsichtlich des Erstarrungsverhaltens optimierter Zement, der besonders für Spritzbetonarbeiten geeignet ist.

Nicht genormt sind Tiefbohrzemente (zur Stabilisierung von Bohrlöchern für die Erdgas- und Erdölgewinnung), Quell- und Tonerdezemente. Schnellzemente sind ebenfalls nicht genormt, aber bauaufsichtlich zugelassen worden. Der früher relativ häufig verwendete Sulfathüttenzement (früher DIN 4210) wird nicht mehr hergestellt.

Schnellzement

Charakteristisch ist eine sehr schnelle Festigkeitsentwicklung mit kurzer Erstarrungszeit (darf bereits nach 20 min beginnen) und hoher Anfangsfestigkeit (muss nach 2 Stunden mind. 4 N/mm^2 betragen).

Der zugelassene Schnellzement 32,5 SF wird aus Portland- und Tonerdezement sowie Zusätzen hergestellt. Er darf für das Einsetzen von Dübeln und Ankern und zur Instandsetzung von Beton- und Stahlbetonkonstruktionen verwendet und für Sonderbaumaßnahmen (z. B. im Verkehrswegebau) eingesetzt werden.

Hochleistungs-Schnellzemente weisen eine ausreichend lange Verarbeitungszeit (etwa 30 bis 45 Minuten), hohe Frühfestigkeiten (etwa 20 N/mm^2 bereits nach 2 Stunden, etwa 50 N/mm^2 nach 24 Stunden) und hohe Endfestigkeiten ($50\text{--}100\text{ N/mm}^2$ nach 28 Tagen) auf. Bemerkenswert ist, dass die Biegezugfestigkeit bereits nach einer Erhärtungszeit von 24 Stunden der eines C 30/37 nach 28 Tagen entspricht.

Die Anwendung erfolgt für die Reparatur hoch belasteter Verkehrsflächen (Straßen, Flugplätze) und besonderer Fertigteile, die ohne Warmbehandlung hergestellt werden sollen.

Tonerdezement

Tonerdezemente werden aus Kalkstein und Bauxit erschmolzen und bestehen aus $40\text{--}50\%$ Al_2O_3 und aus $35\text{--}40\%$ CaO . Dieser Zement wird nur für feuerfeste Mörtel und Betone verwendet, ein Einsatz für allgemeine Bauaufgaben ist unzulässig.

Festgestellt wurde, dass die Verwendung von Tonerdezement eine Verbesserung des Säurewiderstandes bei Beton ergeben kann. Die Wirkung besteht in der bevorzugten Bildung von Kalziumaluminathydraten, die stabiler gegenüber saurer Umgebung sind als das Kalziumhydroxid, das bei der Umsetzung der Kalziumsilikate der üblichen Zemente entsteht.

Quellzement

Die Wirkung beruht in der Regel auf der Bildung von Ettringit, der in erhärtetem Betonen zum Treiben führt. Ausgangsstoffe sind entweder Zemente aus hoch C_3A -haltigen Klinskern, Tonerdezement oder Portlandzemente, denen Kalziumsulfat oder Tonerdezement zugegeben wird.

Das durch die Zusammensetzung und vorgeschriebene Verarbeitung gesteuerte Treiben führt zu entsprechenden Dehnungen im Zementstein (bis 15 mm/m) und Beton (bis 2 mm/m). Der Vorteil liegt darin, dass Schwindverkürzungen aufgefangen und nachträgliche Unterfütterungen, beispielsweise von Stützen, durch eine formänderungsschlüssige Lastübertragung vermieden werden (vgl. Bd. 2 Abschnitt 2.2.5)

Mikrofeine Zemente

Zur kraftschlüssigen Verpressung von Rissen in Bauwerken und für die stabilisierende Injektion bei nicht ausreichend tragfähigen Böden werden mikrofeine Zemente eingesetzt, die eine spezifische Oberfläche von etwa $10\,000\text{ cm}^2/\text{g}$ (nach Blaine) besitzen [1.7]. Der Korngrößenanteil $< 16\text{ }\mu\text{m}$ liegt bei mind. 95 Masse-%. Die Kornfraktion $< 2\text{ }\mu\text{m}$ kann bis 40 Masse-% betragen. Ein CEM I 52,5 R besitzt im Vergleich lediglich etwa 60 Masse-% der Partikel bis $16\text{ }\mu\text{m}$. Mit diesen Zementen lassen sich auch die Dichtigkeit und Festigkeit von Beton verbessern. Die Handhabung von Feinstzementsuspensionen ist in [1.8] dargestellt.

1.1.4 Bezeichnung, Bestellung, Lieferung, Lagerung

Die Bezeichnung der Zemente ist in Übereinstimmung mit DIN EN 197-1 bzw. DIN 1164 vorzunehmen. Sie folgt den Vorgaben – Zementart, Normbezeichnung, Festigkeitsklasse, Anfangsfestigkeit, besondere Eigenschaften –, z. B.:

Portlandzement DIN EN 197-1 – CEM I 42,5 R

für einen Portlandzement der Festigkeitsklasse 42,5 N/mm² mit schneller Festigkeitsentwicklung und hoher Anfangsfestigkeit.

Portlandkompositzement EN 197-1 – CEM II/A (S-V-L) 32,5 N

für einen Portlandkompositzement der Festigkeitsklasse 32,5 N/mm² mit normaler Festigkeitsentwicklung und einem Gesamtgehalt an Hüttensand (S), kieselsäurereicher Flugasche (V) und Kalkstein (L) zwischen 12 % und 20 %.

Hochofenzement EN 197-1 – CEM III/B 32,5 N – LH/SR

für einen Hochofenzement der Festigkeitsklasse 32,5 N/mm², normaler Anfangsfestigkeit, niedriger Hydratationswärme und hohem Sulfatwiderstand.

Lieferungen von Zement müssen folgende Kennzeichnung aufweisen: Normbezeichnung (wie vor), Lieferwerk, Kennzeichen der Übereinstimmung; bei Siloware zusätzlich das Lieferdatum. Weiterhin sind Sicherheitshinweise für den Umgang mit Zement vorgeschrieben. Zur Unterscheidung der Zementarten und -sorten dient in Deutschland häufig ein Farbcode (Tabelle 1.3).

Anlieferungsbedingte hohe Zementtemperaturen (70–80 °C) haben auch bei sofortiger Verwendung des Zements zur Frischbetonherstellung keinen schädlichen Einfluss auf die Betonqualität. Festigkeitsverluste treten nicht auf. Wenn die Zementtemperatur um 10 K zunimmt, wird die Frischbetontemperatur lediglich um 1 K gesteigert. Bei kritischen Massenbetonarbeiten kann die Erhöhung der Frischbetontemperatur durch hohe Zementtemperaturen aber unvermeidbar sein.

Zement ist hygroskopisch und nimmt bei ungeschützter Lagerung Feuchtigkeit auf; Klumpen- und Schalenbildung, schlechte Verarbeitbarkeit und Festigkeitsminderungen sind die Folge.

Die Lagerzeit ist in Abhängigkeit von den Lagerbedingungen festzulegen. Angegeben wird, dass bei ordnungsgemäßer Aufbewahrung (geschlossener Raum, Schutz vor direktem Zutritt von Feuchtigkeit) nach 3 Monaten eine Minderung der Festigkeit um etwa 10 % eintreten kann. Bei schnell erhärtenden Zementen hoher Anfangsfestigkeit (Festigkeitsklasse 52,5 N und 52,5 R) sollte eine Lagerzeit von einem Monat, bei den anderen Zementen von zwei Monaten nicht überschritten werden.

1.1.5 Konformitätskontrolle, Rückstellproben

Die Konformität der Zemente mit den Anforderungen nach DIN EN 197 und DIN EN 14216 werden durch das CE-Zeichen und die Übereinstimmung mit DIN 1164 durch das Ü-Zeichen (Übereinstimmungszeichen) bescheinigt. Voraussetzung der Bescheinigung der Kon-

formität durch eine anerkannte Zertifizierungsstelle ist eine werkseigene Produktionskontrolle und die Überwachung, Beurteilung und Anerkennung der werkseigenen Produktionskontrolle durch eine unabhängige Zertifizierungsstelle nach DIN EN 197-2. Die Arbeit der Zertifizierungsstelle schließt eine Fremdüberwachungsprüfung von Proben, die im Zementwerk bzw. Herstellerdepot entnommen werden, ein.

Wird Zement durch einen Zwischenhändler angeboten, ist dieser verpflichtet, die Qualität, Identität und die Konformität des zertifizierten Zements aufrechtzuerhalten. Dazu müssen angemessene Eingangs- und Identitätsprüfungen an den Auslieferungsstellen erfolgen, die ebenfalls durch eine unabhängige Zertifizierungsstelle mit gesonderter Fremdüberwachungsprüfung zu bescheinigen ist.

Die Konformität für Normalzemente nach DIN EN 197-1 wird durch ein CE-Zeichen auf den Lieferdokumenten oder dem Zementsack sowie der Kennnummer der Zertifizierungsstelle und Herstellerangaben, wie z. B. Adresse, Werksname, Norm- und Zementbezeichnung dokumentiert.

Baustellenprüfungen zur Überwachung der Zementeigenschaften müssen normgemäß nicht durchgeführt werden. Da die Beschaffenheit des Zements am Festbeton jedoch nicht mehr exakt festgestellt werden kann, sollte der Verwender von Zement bei jeder Übernahme des Zements eine Probe nehmen und luftdicht verschlossen aufbewahren. In jedem Fall muss eine Probe wenigstens 5 kg betragen. Im Betonstraßenbau sind Rückstellproben der Betonausgangsstoffe durch die TL Beton-StB 07 zwingend vorgeschrieben.

1.2 Gesteinskörnungen

Mit der Einführung der europäischen Normen ist der bisher verwendete Begriff »Zuschlag« durch den Begriff »Gesteinskörnung« abgelöst worden.

Gesteinskörnung ist ein Gemenge aus natürlichen und/oder künstlichen mineralischen Stoffen, deren Körner ungebrochen und/oder gebrochen sind und die ein dichtes (DIN EN 12620) oder poriges (DIN EN 13055-1) Gefüge besitzen. Die Gesteinskörnung stellt mit etwa 65 bis 80 % des Volumens den Hauptbestandteil des Betons dar und bildet in Verbindung mit dem Zementstein das Traggerüst des Betons. In Sonderfällen kann die Gesteinskörnung vollständig oder teilweise durch Metall oder organische Stoffe ersetzt bzw. ergänzt werden.

1.2.1 Begriffe, Arten der Gesteinskörnungen, allgemeine Anforderungen

Die Eigenschaften der Gesteinskörnung haben großen Einfluss auf die Betonqualität. Grundsätzlich darf nur eine Gesteinskörnung für Beton verwendet werden, die eine für den jeweiligen Anwendungsbereich ausreichende Kornfestigkeit besitzt, den Haftverbund zwischen der Oberfläche des Kornes und dem Zementstein gewährleistet, die Erhärtungsprozesse des Zementes nicht nachteilig beeinflusst und den Widerstand des Betons gegenüber äußeren Beanspruchungen nicht beeinträchtigt. Bei Umwelteinwirkungen darf sich die Gesteinskörnung nicht verändern, nicht erweichen und nicht zersetzen. Durch die

Verbindung mit dem Zement dürfen keine nachteiligen chemischen Reaktionen ausgelöst werden und keine schädlichen Verbindungen entstehen.

Die Gesteinskörnung muss deshalb bestimmten Anforderungen genügen und güteüberwacht werden.

1.2.1.1 Normen für Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen werden nicht nur für Beton sondern für viele weitere Anwendungen bereitgestellt und damit unterschiedlich genormt.

Gesteinskörnungen für Beton

Im Zuge der europäischen Normung wurde DIN 4226-1,-2 und -4:1983-03 und folgend die DIN 4226-1:2001-07 und -2:2002-02 durch die DIN EN 12620:2008-03 (Gesteinskörnungen) und DIN EN 13055-1:2002-08 (leichte Gesteinskörnungen) abgelöst und zum 1. Juni 2004 bauaufsichtlich eingeführt.

Für die DIN 12620 liegt die Fassung 2008-07 vor. Diese Normen (DIN EN) definieren die Eigenschaftskennwerte für Gesteinskörnungen, legen Anforderungskategorien fest und enthalten Anforderungen für die Überwachung und Kennzeichnung.

Für die Betonherstellung in Deutschland ist zusätzlich die DIN 1045-2:2008-08, Anhang U, Tabellen U1 und U2 für die Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 und DIN 1045-2:2008-08, Anhang U, Tabelle U3 für leichte Gesteinskörnungen nach DIN EN 13055 zu beachten.

DIN 1045-2:2008-08, Anhang U legt aus den Kategorien der DIN EN 12620 bzw. der DIN EN 13055 Mindestanforderungen als Regelanforderungen sowie zusätzliche Anforderungen entsprechend der DIN EN 206-1/DIN 1045-2 fest. Es müssen also beide Normen beachtet werden.

Die Kategorie einer Regelanforderung muss einer vorhandenen Kategorie der europäischen Norm entsprechen. Die Festlegung einer eigenen Kategorie ist nicht gestattet.

In die DIN EN 12620:2008-07 sind die rezyklierten Gesteinskörnungen aufgenommen. Eine deutsche Anwendungsrichtlinie liegt mit der Richtlinie des DAfStb »Anwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen bei der Herstellung von Beton«:2010-09 vor. Mit dieser Richtlinie wird die DIN 4226-100 abgelöst.

Gesteinskörnungen für andere Anforderungen

Zur Information werden folgend die Normen für andere Anforderungen und Bauweisen aufgeführt. Diese sind je nach geprüfter Eigenschaft auch auf den Lieferscheinen für die Gesteinskörnungen für Beton mit aufgeführt.

- DIN EN 13043:2002-12 – Gesteinskörnungen für Asphalt und Oberflächenbehandlung für Straßen, Flugplätze und Verkehrsflächen
- DIN EN 13139:2004-12 und 1. Berichtigung 2006-6 – Gesteinskörnungen für Mörtel
- DIN EN 13242:2008-03 – Gesteinskörnungen für ungebundene und hydraulisch gebundene Gemische für Ingenieur- und Straßenbau
- DIN EN 13450:2003-06 – Gesteinskörnungen für Gleisschotter

1.2.1.2 Allgemeine Anforderungen

Eine Gesteinskörnung nach DIN EN 12620/DIN 1045-2 muss für den jeweiligen Verwendungszweck und die dabei auftretenden Beanspruchungen des Betons geeignet sein. Für tragende und aussteifende Bauteile aus Beton und Stahlbeton nach DIN EN 206/ DIN1045-2 darf nur Gesteinskörnung mit Konformitätsnachweis verwendet werden. Damit wird belegt, dass die Gesteinskörnungen den Regelanforderungen als Mindestanforderungen entsprechen. Andere Anforderungskategorien, also höhere, können vereinbart werden.

Jedoch sollte zur Schonung der Ressourcen an natürlicher Gesteinskörnung und der weitgehenden Nutzung der vorhandenen Lagerstätten die Auswahl der Gesteinskörnung beanspruchungsgerecht vorgenommen werden. Besonders hochwertige Gesteinskörnung sollte deshalb auch nur bei höheren Anforderungen verwendet werden.

Zu Anforderungen an Gesteinskörnungen gehören insbesondere Eigenfestigkeit, Kornform, Korngröße, Kornverteilung und das Fehlen schädlicher Bestandteile. Bei besonderen Gebrauchs- und Umweltbedingungen sind erhöhte Forderungen zu erfüllen, wie beispielsweise Frost- und Verschleißwiderstand. Die Alkali-Richtlinie gilt in Deutschland weiter, da in den europäischen Normen keine eigenständigen Regelungen enthalten sind.

Die Gesteinskörnungen können infolge der natürlichen Lagerung (Fluss- und Grubensand bzw. -kies) eine Reihe von schädlichen Bestandteilen enthalten, die die Eigenschaften des Betons vermindern oder den Korrosionsschutz der Bewehrung beeinträchtigen. Schädliche Bestandteile sind anhaftender Lehm oder Ton, verwitterungsfähige Bestandteile, chemische Verunreinigungen, z. B. Schwefelverbindungen und organische Stoffe, vor allem Humus. Diese müssen entfernt werden. Im Zuge der Aufbereitung sind deshalb entsprechende Prüfungen durchzuführen und es ist eine Selektion bzw. Trennung vorzunehmen. Zum Beispiel sind folgende Prüfungen durchzuführen: Probenahme, Petrografie nach DIN EN 932, Kornzusammensetzung, Kornform nach DIN EN 933, Wassergehalt, Verschleißwiderstand nach DIN EN 1097, Frostwiderstand nach DIN EN 1367, Feinanteil, Chloride nach DIN EN 1744.

Die Entstehung der Lagerstätten ist die Ursache für das breite Spektrum an Gesteinsarten, die bei der Gewinnung angetroffen werden und die nicht gleichermaßen für die Herstellung des Betons geeignet sind.

1.2.1.3 Arten von Gesteinskörnungen und deren Eignung für den Beton

Gesteinskörnungen unterscheiden sich grundsätzlich durch die Rohdichte, die Genesis und die Eignung für Beton.

1.2.1.3.1 Normale Gesteinskörnungen

Nach Entstehung, Zusammensetzung und Gefüge der Gesteine kann hinsichtlich der Eignung unterschieden werden:

- **Erstarrungsgesteine oder Magmatite** besitzen die größte Festigkeit und sind die besten Gesteinskörnungen für Beton. Zu ihnen gehören Granit und die Abarten Diorit, Gabbro, Basalt und Diabas. Vorsicht ist angebracht bei Trachyt (teilweise nicht wit-